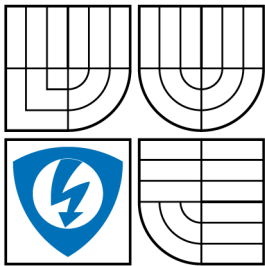


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATION

MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI MEZI UZLY V BEZDRÁTOVÝCH SÍTÍCH

RANGE MEASUREMENT IN WIRELESS NETWORKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

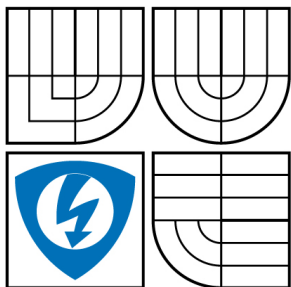
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ ZIKMUND

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PATRIK MORÁVEK

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Lukáš Zikmund
Ročník: 3

ID: 71986
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Měření vzdálenosti mezi uzly v bezdrátových sítích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Student se seznámí s metodami měření vzdálenosti v bezdrátových sítích. Porovná jejich výhody a nevýhody, dosahovanou přesnost a omezení použitelnosti. Součástí práce bude reálné měření a odhad vzdálenosti za různých podmínek u dostupných metod pomocí produktového řešení Cricket a IRIS. Tyto dva systémy budou srovnány z hlediska přesnosti odhadu a použitelnosti v reálných aplikacích.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] HOLGER, K., ANDREAS, W. Protocols and Architectures for Wireless Se Networks. John Wiley & Sons Inc., 2005. 481 s. ISBN 978-0-470-09510-2.
[2] Guoqiang Mao, Baris Fidan, Brian D.O. Anderson, Wireless sensor network localization techniques, Computer Networks, Volume 51, Issue 10, 11 July 2007, Pages 2529-2553, ISSN 1389-1286,

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 2.6.2011

Vedoucí práce: Ing. Patrik Morávek

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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.

ANOTACE:

Tato bakalářská práce je zaměřena na možnosti měření vzdálenosti mezi uzly v bezdrátových senzorových sítích. Jsou zde popsány jednotlivé metody, porovnány jejich výhody a nevýhody a možnosti použití v reálném světě. Součástí této práce je měření za pomoci produktového řešení Cricket a IRIS, porovnání jejich výhod a nevýhod a použitelnost v reálném prostředí.

Klíčová slova: WSN, lokalizace, RSS, AOA, TOA, TDOA, Cricket, IRIS

ABSTRACT:

This bachelor thesis is focused on possibilities of distance measurement in wireless sensor networks. It describes various methods, compares their advantages and disadvantages and their potential applications in the real world. A part of this work presents a real measurement using product solution Cricket and IRIS. It compares their advantages and disadvantages and applicability in the real environment.

Keywords: WSN, localization, RSS, AOA, TOA, TDOA, Cricket, IRIS

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE :

ZIKMUND, L. *Měření vzdálenosti mezi uzly v bezdrátových sítích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Patrik Morávek.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Měření vzdálenosti mezi uzly v bezdrátových sítích jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této 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 bakalářské práce Ing. Patriku Morávkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

podpis autora

Obsah

1	BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ	8
2	LOKALIZACE	11
2.1	TRIANGULACE	11
2.2	TRILATERACE	12
2.3	LOKALIZAČNÍ TECHNIKY	13
3	ZPŮSOBY MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI	15
3.1	RSS	16
3.2	ANGLE OF ARRIVAL	18
3.3	TIME OF ARRIVAL (TOA).....	20
3.4	TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA).....	21
3.5	MĚŘENÍ POMOCÍ ULTRAZVUKU	22
4	MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI V REÁLNÉM PROSTŘEDÍ	24
4.1	SCÉNÁŘE MĚŘENÍ	25
4.2	MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI POMOCÍ CRICKETŮ	27
4.3	MĚŘENÍ SMĚROVOSTI CRICKETŮ.....	30
4.4	MĚŘENÍ PŘES PŘEKÁŽKY A VLIV ODRAZU	34
4.5	VÍCEBODOVÉ MĚŘENÍ, ZÁKLADNÍ LOKALIZACE	36
4.6	MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI POMOCÍ IRIS MODULŮ	37
4.7	MĚŘENÍ SMĚROVOSTI IRIS MODULŮ	42
4.8	MĚŘENÍ PŘES PŘEKÁŽKY	44
4.9	PROPAGAČNÍ MODEL V NĚKOLIKA SMĚRECH	45
5	ZÁVĚR	49
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	51

Seznam obrázků

obr. 1: Schéma sensorové sítě [2]	8
obr. 2: Schéma sensorového uzlu [1].....	9
obr. 3: Výpočet vzdálenosti bodu C pomocí triangulace	11
obr. 4: Výpočty metodou trilaterace	12
obr. 5: Active bat location system	14
obr. 6: Model patternu horizontální antény. Nejsilnější signál přichází od severu (0°). [6]...	18
obr. 7: Lokalizace uzlu U [6].....	19
obr. 8: Lokalizace pomocí time difference of arrival	21
obr. 9: ukázka a popis cricketu [10].....	23
obr. 10: Vzdálenost měřená pomocí cricketů na volném prostranství	27
obr. 11: Průměrné odchylky vzdálenosti změřené pomocí cricketů ve volném prostranství od reálné vzdálenosti	28
obr. 12: Vzdálenost měřená pomocí cricketů v uzavřeném prostoru	29
obr. 13: Odchylky vzdálenosti změřené pomocí cricketů v uzavřeném prostoru od reálné vzdálenosti.....	29
obr. 14: Nákres měření horizontální směrovosti cricketu	30
obr. 15: Výsledky měření horizontální směrovosti cricketu.....	31
obr. 16: Nákres měření vertikální směrovosti cricketu.....	32
obr. 17: Výsledky měření vertikální směrovosti cricketu	33
obr. 18: Rozmístění uzlů během měření.....	36
obr. 19: Síla signálu změřená pomocí IRIS modulů v nezarušeném prostředí s nastaveným vysílacím výkonem +3 dBm	38
obr. 20: Síla signálu změřená pomocí IRIS modulů v nezarušeném prostředí s nastaveným vysílacím výkonem -17 dBm	38
obr. 21: Odhad vzdálenosti na základě změřené síly signálu při nastaveném maximálním vysílacím výkonu, pro útlumový činitel $\eta = 2$	39
obr. 22: Rozdíl reálné a změřené vzdálenosti pomocí RSS při útlumovém činiteli $\eta = 2$ a $\eta = 3,23$	40
obr. 23: Síla signálu změřená pomocí IRIS modulů v prostředí zarušeném wifi sítěmi	41
obr. 24: Odhad vzdálenosti na základě změřené síly signálu v zarušeném prostředí.....	41
obr. 25: Nákres měření směrovosti IRIS modulů	42
obr. 26: Síla signálu v závislosti na natočení IRIS modulu.....	43
obr. 27: Výsledky měření síly signálu po průchodu přes jednotlivé překážky.....	44
obr. 28: Síla signálu změřená při měření ve volném prostoru v různých směrech	46
obr. 29: Propagační model rádiového signálu v uzavřeném prostoru	47
obr. 30: Modely šíření signálu v jednotlivých směrech při měření v uzavřeném prostoru	48

Úvod

V dnešním moderním světě, kde jsme prakticky obklopeni technikou a nejrůznějšími senzory, je do jejich vývoje investováno nemalé množství času a peněz. To má za následek neustálé zvětšování počtů těchto senzorů. Sensory jsou využívány k daleko většímu počtu úkolů a sledují daleko větší množství věcí než tomu bylo v minulosti.

S narůstajícím počtem senzorů a množstvím získaných dat, byly kladeny i větší nároky na to, jak data převést do počítače, kde jsou dále zpracovávány a vyhodnocovány. Postupem času bylo třeba vymyslet i bezdrátový přenos dat, který by byl schopen nahradit původní spojení pomocí klasických síťových kabelů. Nabízely se možnosti přenosu dat pomocí již známých bezdrátových technologií, jako například přenos pomocí infračerveného záření nebo pomocí, zejména v mobilních telefonech rozšířeného, bluetooth. Tyto technologie však měly několik podstatných nevýhod. Přenos pomocí infraportu je možné realizovat pouze za předpokladu přímé viditelnosti mezi zařízeními, jejichž počet je omezen pouze na dvě, a i dosahovaná rychlost přenosu nebyla tak vysoká, jak by bylo třeba.

Technologie bluetooth je na tom o něco lépe, i když v prvních verzích této technologie i zde mohly být tímto způsobem spojeny pouze dvě zařízení. Dosahovaná vzdálenost a rychlosti jsou o něco vyšší než u infračerveného přenosu, ale pořád ne dostatečně.

Klasická bezdrátová síť wifi sice dosahuje požadované propustnosti i dosahu, je však poměrně energeticky náročná a u senzorů by vznikal problém s jejich napájením. Baterie by nestačily sensor napájet příliš dlouho nebo by musely zabírat velké množství místa, což by naopak komplikovalo umístění senzorů. A tak vznikla nová technologie označovaná jako bezdrátová senzorová síť nebo-li WSN (Wireless Sensor Network), která umožnila vývoj malých, levných a energeticky nenáročných senzorů, které mají díky malým hardwarovým nárokům nízkou spotřebu energie a dokáží tak pracovat dlouhou dobu.

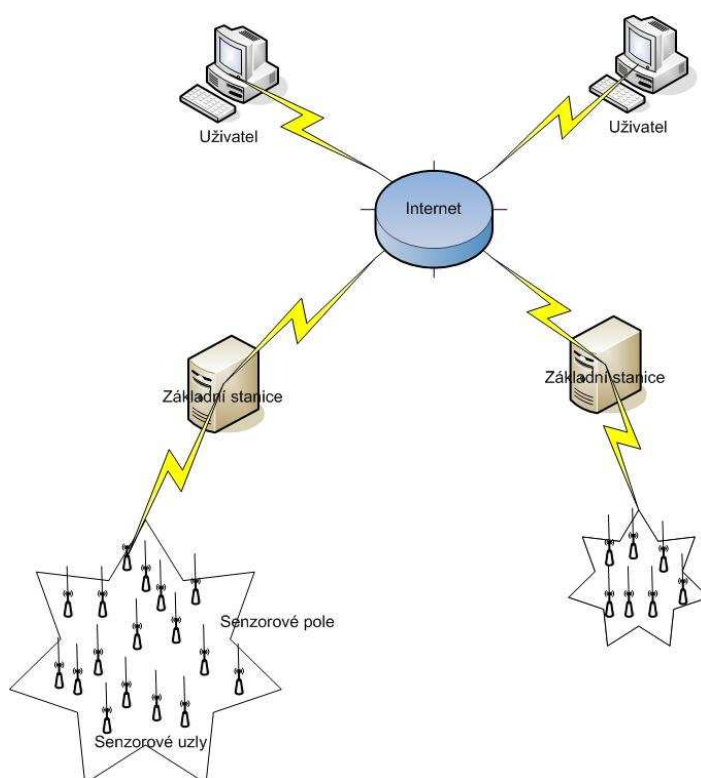
Další potřebnou vlastností senzorů je schopnost určit svou polohu. Známe-li polohu, můžeme rychleji a přesněji lokalizovat problém a vyřešit ho. Metod, jak zjistit jejich polohu, je několik. Lze je však rozdělit na tři základní, a to na zjišťování vzdálenosti pomocí poklesu signálu (RSS – received signal strength), dále pomocí úhlu odkud signál přišel (AOA – Angle of arrival) a pomocí měření času mezi vysláním a příjmem signálu (TDOA – Time difference of arrival). A právě tyto tři metody jsou hlavním předmětem této práce.

Cílem této semestrální práce je shrnout, popsat a vysvětlit různé metody měření vzdálenosti mezi jednotlivými uzly v bezdrátových sítích, porovnat jejich vlastnosti, jako je například jejich přesnost, možnosti jejich použití, a porovnat jejich výhody a nevýhody v různých situacích, které mohou nastat v reálných podmínkách.

1 Bezdrátové senzorové sítě

Technologie bezdrátových senzorových sítí (WSN) se stává neustále významnější technologií, na kterou se soustřeďuje stále více pozornosti. V dnešním světě neustále roste potřeba sledovat pokud možno co nejvíce věcí a dají se využít téměř v jakékoli oblasti života. Své uplatnění najdou v zemědělství, kde například sledují vlhkost půdy nebo obsah živin v půdě a na základě výsledků měření zapnou zavlažovací nebo hnojící systém. Uplatní se rovněž u ekologů, kteří pomocí senzorů sledují obsah škodlivin ve vzduchu a podle naměřených hodnot se například omezí povolená rychlost na dálnicích a tím i vypouštění škodlivin z automobilů. Senzorové sítě se dají využít i k vojenským účelům, kde mohou například sledovat pohyby nepřátel a měnit tak automaticky cíl naváděných raket.

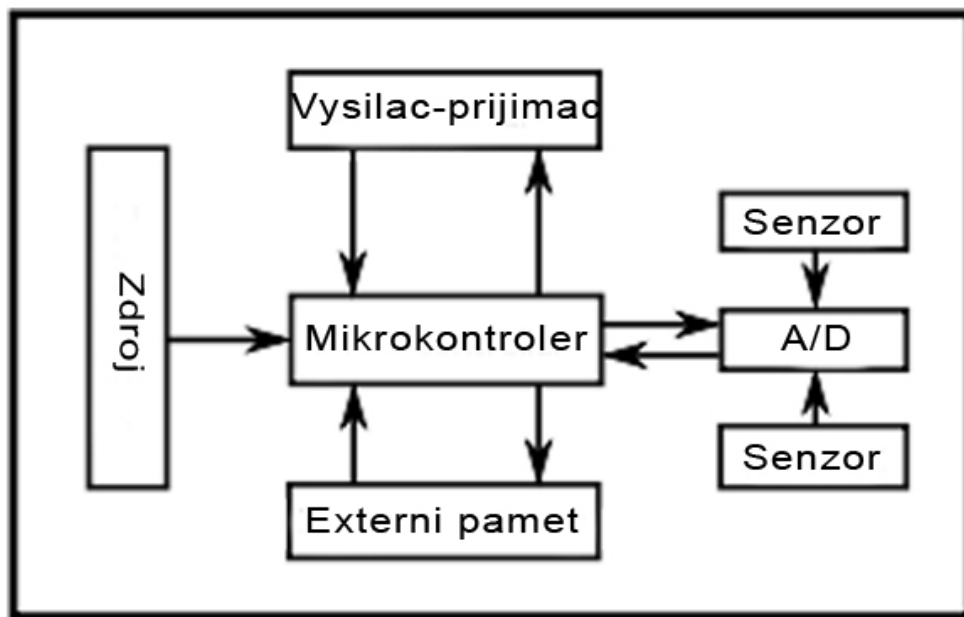
Senzorové sítě se skládají z takzvaných senzorových polí. Tato pole obsahují několik senzorových uzlů rozmístěných podle potřeb a dále obsahují základní stanice, do které senzory posílají naměřené údaje. Základnová stanice slouží jako rozhraní pro ovládání dat. Data zpracovává a buď je odesílá prostřednictvím internetu na vzdálenější počítače nebo sama vytváří na základě naměřených hodnot vlastní závěry a chová se podle naprogramovaného algoritmu. [5]



obr. 1: Schéma senzorové sítě [2]

Senzorový uzel je složen z několika dílčích částí:

- Mikrokontroler
- Přijímač-vysílač
- Sensory
- Paměti
- Zdroje energie



obr. 2: Schéma senzového uzlu [1]

Mikrokontroler

Mikrokontroler je důležitou částí senzového uzlu mající na starost chod a fungování uzlu. Jeho úloha je totožná s procesorem v počítačích, pouze s tím rozdílem, že pracuje na mnohem nižších frekvencích. Tím dosahuje daleko menší spotřebu energie a tím prodlužuje životnost baterií. [5]

Přijímač-vysílač

Tato dvojice má za úkol vytvořit spojení mezi uzlem a základní stanicí nebo mezi ostatními uzly. V poslední době se spojení realizuje nejčastěji pomocí rádiových vln. Technologie WSN využívá pásmo od 433 MHz do 2,4 GHz. Funkce vysílání a přijímání je

spojená do jednoho zařízení zvaném transceiver (kombinovaný vysílač a přijímač). Transceiver může pracovat ve čtyřech režimech: přenos, příjem, nečinný a spánek. [5]

Paměti

V sensorových uzlech se využívají nejčastěji flash paměti opět pro jejich nízkou energetickou náročnost. [5]

Zdroje energie

Jako každé zařízení, tak i sensorové uzly potřebují ke své funkci zdroj energie. Energeticky nejnáročnější bývá u sensorových uzlů právě komunikace, i když u některých sensorů je energeticky náročné i delší snímání některých informací. To však záleží na povaze senzoru. Jako zdroj energie se nejčastěji používají různé baterie ať už klasické typu AA nebo i menší např. AAA. Zajímavým řešením je i použití nabíjecích baterií. Ty lze dobíjet například pomocí fotovoltaických panelů umístěných na povrchu sensorů. [5]

Senzory

Senzory jsou zařízení, která sbírají fyzická data z prostoru. Pomocí A/D převodníku převedou spojitý signál na signál digitální a odesílají je do mikrokontroleru k dalšímu zpracování. Hlavními parametry sensorů jsou citlivost, práh citlivosti, dynamický rozsah reprodukovatelnost (podle odchylky na naměřených hodnotách jedné veličiny) a chyby senzoru (aditivní, multiplikativní). [6] [5]

Hlavními požadavky na sensorové uzly jsou především malá velikost a z toho vyplývající snadná instalace i na špatně přístupná místa, dále pak co možná nejnížší energetická náročnost a téměř nulová potřeba údržby. A to opět z důvodu, aby bylo možné senzory instalovat i na špatně přístupná místa. [5]

Senzory dále dělíme podle typu spojení na pasivní všesměrové, pasivní úzkopaprskové a aktivní.

Pasivní všesměrové senzory sbírají data, aniž by sledovaly prostor. energii využívají jen pro zesílení analogového signálu. Pasivní úzkopaprskové senzory mají již přesně daný směr šíření. Aktivní senzory nepřetržitě sledují okolní prostředí (například radar nebo sonar v ponorkách), ale ke své práci potřebují neustálý příjem energie.

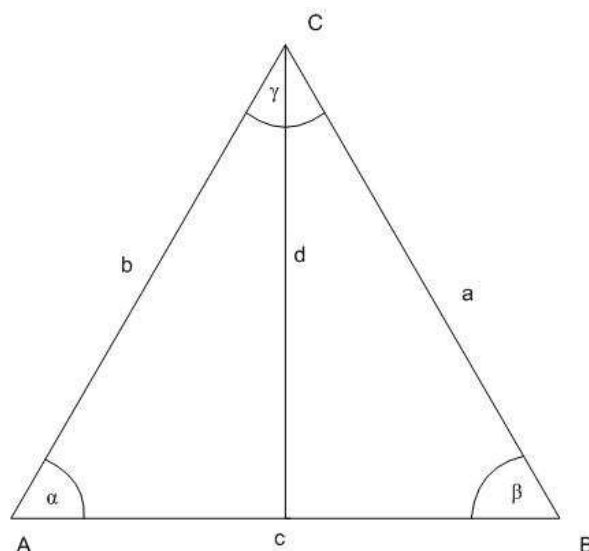
V bezdrátových sensorových sítích se nejčastěji využívají pasivní všesměrové senzory, které mají svým umístěním předem vymezený prostor, ze kterého sbírají data, a data složená z jednotlivých uzlů pak vytvářejí celkový obraz o situaci v daném prostoru. [5]

2 Lokalizace

Pojmem lokalizace se rozumí snaha o zjištění polohy nějakého objektu. V našem případě se jedná o zjištění polohy uzlu nebo senzoru v bezdrátové síti, kterou lze využít k mnoha účelům. Na základě znalosti této polohy a naměřených výsledků je pak možné zjistit, dopočítat nebo si alespoň představit celkový obraz o situaci, kterou sledujeme. V internetové síti se na základě zjištěné polohy počítače například odesílají různé informace o dění v blízkosti, předpovědi počasí i reklamy různého charakteru.

K vyhledání pozice nějakého předmětu či zařízení se nejčastěji využívá metoda triangulace a metoda trilaterace.

2.1 Triangulace



obr. 3: Výpočet vzdálenosti bodu C pomocí triangulace

Triangulace je metoda zjišťování polohy, kdy se využívá znalosti polohy alespoň dvou bodů. Pozice třetího bodu se zjišťuje pomocí trigonometrického výpočtu tak, že se sestrojí pomyslný trojúhelník mezi dvěma body (A, B) jejichž pozici známe a třetí vrchol trojúhelníku tvoří právě bod, jehož pozici hledáme (bod C). Změříme tedy úhly α a β , které jsou sevřeny

spojnicí mezi známými body a bodem hledaným a poté vypočítáme souřadnice hledaného bodu pomocí vzdálenosti mezi oběma pevnými body a změřených úhlů podle sinové věty:

$$\frac{\sin \alpha}{a} = \frac{\sin \beta}{b} = \frac{\sin \chi}{c}, \quad (1)$$

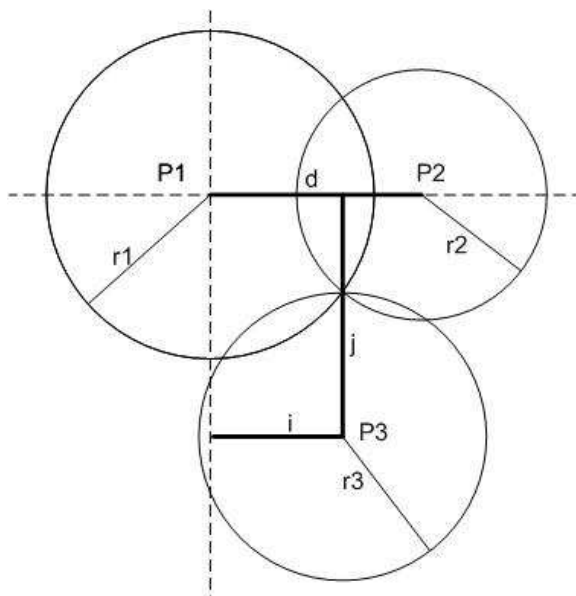
kde a je vzdálenost mezi body B a C, b je vzdálenost mezi A a C a c je vzdálenost mezi A a B. Nakonec je možné podle definice goniometrické funkce sinus vypočítat vzdálenost d :

$$\sin \alpha = \frac{d}{b} \quad \text{nebo} \quad \sin \beta = \frac{d}{a}. \quad (2)$$

2.2 Trilaterace

Trilaterace je metoda velmi podobná metodě triangulační. Pro určování pozice objektů také využívá vztahy, které platí uvnitř trojúhelníku. Na rozdíl od triangulace, kde se při výpočtu počítá s úhly, které svírají spojnice jednotlivých bodů, se při využití metody trilaterace využívá dvou a více bodů se známými souřadnicemi a naměřených délek mezi hledaným objektem a již známými referenčními body. K přesnému určení je tedy potřeba znát pozici opět alespoň dvou bodů.[7]

Výpočty jsou nyní demonstrovány pomocí následujícího obrázku:



obr. 4: Výpočty metodou trilaterace

Z obrázku vycházejí tři základní rovnice:

$$\begin{aligned} r_1^2 &= x^2 + y^2 + z^2 & x, y, z &- \text{souřadnice} \\ r_2^2 &= (x - d)^2 + y^2 + z^2 & d, i, j &- \text{posuny v poloze kružnic} \\ r_3^2 &= (x - i)^2 + (y - j)^2 + z^2 & r_1, r_2, r_3 &- \text{poloměry kružnic} \end{aligned} \quad (3)$$

Po několika úpravách rovnic dostaneme výslednou rovnici pro výpočet souřadnice bodu který hledáme:

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{r_1^2 - y^2 - z^2} \\ y &= \sqrt{r_1^2 - x^2 - z^2} \\ z &= \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 Lokalizační techniky

Asi nejznámější technologií, která využívá znalosti pozice, je GPS (Global positioning system). Tato technologie, která před pár lety zažila v naší zemi obrovský vzestup, využívá informace o vzdálenosti od jednotlivých družic, jejichž poloha je známa. Na jejich základě se pomocí trojúhelníkové (triangulační) metody dopočítává, kde se daný přijímač nachází. Čím více družic je v dosahu, tím je měření samozřejmě přesnější, minimální počet jsou však dvě družice. Třetí bod trojúhelníku tvoří přijímač. Problémy však nastávají zejména v kopcovitém terénu, kde je přijímač blíže k družicím a dochází tak k chybám. Proto je lepší přijímat signál od většího počtu družic. Spojením znalosti polohy a zmapování terénu pak vznikají navigace jaké známe z běžného života.

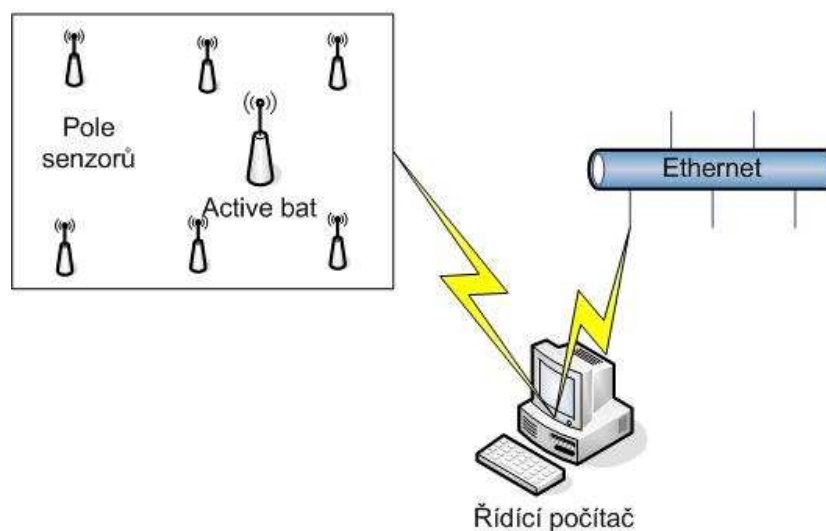
Tento systém je však energeticky náročný (i poměrně velká baterie uvnitř navigačních přístrojů vydrží jen několik hodin) a není proto vhodný pro zjišťování polohy například ve výše uvedených sensorových sítích. Jeho další nevýhodou je, že ho nelze použít v uzavřeném prostoru (tunely, budovy). [3]

Další oblastí, kde se zjišťuje pozice přístroje je mobilní síť GSM. Tato síť je rozdělena na buňky, které obsluhují jednotlivé základní stanice (vysílače a přijímače) označované jako BTS (Base transceiver station). Základní odhad polohy přístroje určíme tím, že víme, ve které buňce se telefon nachází či ke kterému vysílači je telefon právě připojen. Přesnější metodou ke zjištění polohy přístroje je metoda označovaná jako CGI+TA (Cell global identity + Timing advance). Tato metoda využívá toho, že základní stanice obsahuje několik směrových

antén namířených tak, aby vytvářely kolem základní stanice kruh. A víme-li, se kterou anténou telefon komunikuje, známe alespoň přibližný směr od stanice, kde se telefon nachází. Vezmeme-li v úvahu ještě parametr Timing advance, který představuje čas šíření signálu mezi základní stanicí a přístrojem, získáme přibližnou představu o vzdálenosti přístroje od vysílače. A pokud spojíme tyto dva údaje dohromady, zjistíme polohu telefonu s přesností na přibližně 500 metrů. [3] [8]

Další způsob, jak určit polohu nějakého zařízení se nazývá Active badge system. Jedná se o jeden z prvních systémů, které byly schopny lokalizovat zařízení uvnitř budov. Fungují na principu přijímání infračerveného signálu, který vysílá mobilní stanice. Senzory umístěné uvnitř budovy signál zachytávají a poté ho předávají základnové stanici, která údaje sensorů dále zpracovává a vypočítává polohu zařízení. Tato metoda je poměrně přesná, má však základní nevýhodu a to, že ji lze použít pouze na přímou viditelnost a vykazuje velké chyby při záření přímého slunečního světla. [3]

Active bat location system je další technologie na určování polohy pomocí odhadu vzdálenosti. Používá kombinaci radiového a ultrazvukového signálu. Řídící počítač vyšle radiový signál na frekvenci 430 MHz. Přenosný sensor active bat signál zachytí a vyšle ultrazvukový signál, který je zachycen soustavou sensorů umístěných na stropě místnosti. Ve stejný okamžik vyšle počítač směrem k sensorům synchronizační signál. Senzory pak na základě rozdílné doby příchodu jednotlivých signálů zjistí vzdálenost mobilní stanice a na základě trilaterační metody pak dopočítají, kde se stanice nachází. Nevýhodou této metody je poměrně velká investice do sítě sensorů umístěných na stropě. Na druhou stranu pomocí této technologie je možné zjistit polohu s přesností až na 9 cm. [3]



obr. 5: Active bat location system

Velmi podobným způsobem jako active bat pracuje i metoda cricket. Ta také využívá rádiového a ultrazvukového signálu, pouze s tím rozdílem, že veškerá data zpracovává mobilní stanice. Na stropě místnosti je umístěn vysílač, který vyšle ve stejný okamžik rádiový i ultrazvukový signál. Po zachycení rádiového signálu mobilní stanicí, tato stanice aktivuje ultrazvukový příjem a čeká na ultrazvukový signál. Poté na základě rozdílného času příchodu jednotlivých signálů dopočítá vzdálenost od vysílače a opět je schopna pomocí trilaterální metody zjistit svou polohu. [3]

Lokalizační metodou používanou v sítích wifi je Microsoft research RADAR location system. Tento způsob zjišťování polohy potřebuje tři stolní počítače, sloužící jako access point a jeden přenosný, jehož poloha se určuje. Tři počítače měří RSS (received signal strength) od přenosného počítače s data následně vyhodnocuje centrální počítač. Výsledná měření jsou pak porovnávána s již dříve provedenými měřeními v pevně stanovených bodech. Ve výsledku jsou pak hodnoty RSS od všech počítačů použity jako otisk signálu.

K vytvoření otisku signálu je možné použít i empirický model šíření. Ten je popsán rovnicí:

$$P(d)[dBm] = P(d_0)[dBm] - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) - \begin{cases} nW \cdot WAF & nW < C \\ C \cdot WAF & nW \geq C \end{cases}, \quad (5)$$

kde $P(d_0)$ je výkon ve známé referenční vzdálenosti, d je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem, C je maximální počet zdí, pro který je ještě rozdíl v útlumu významný, nW je počet zdí mezi vysílačem a přijímačem a WAF je útlum zdi. [3]

Tento způsob vytvoření otisku signálu však vyžaduje poměrně přesná vstupní data pro vytvoření modelu a i přesto přináší horší výsledky, než když otisky signálu získáme měřením. [3]

3 Způsoby měření vzdálenosti

S rostoucím počtem mobilních zařízení, ať už mobilních telefonů nebo notebooků, stále roste význam přesného určení pozice daného zařízení. Znalost této pozice pak může být dále využita k mnoha účelům, ať už je pro společnost nebo daného člověka příjemná či nikoli. Znalost pozice lze využít například k přizpůsobení aplikace k danému prostředí, monitorování pohybu zaměstnanců, navigace nebo v oblasti veřejné bezpečnosti (například vyhledání nejbližší pomoci).

Mezi základní způsoby měření vzdálenosti uzlů v bezdrátových sítích patří měření na základě poklesu signálu (RSS), měření podle úhlu, ze kterého signál přišel (AOA), pomocí rozdílu času mezi vysláním a příjmem signálu (TDOA) a pomocí ultrazvuku.

3.1 RSS

RSS neboli received signal strength je jednou ze základních lokalizačních technik. Její hlavní výhodou je, že není třeba příliš investovat do hardwaru, protože většina zařízení již od základu obsahuje možnost měření síly signálu označované jako RSSI (received signal strength indicator). Tato vlastnost je již přímo definována ve standardu 805.12.4.

Při měření vzdálenosti na volném prostranství lze použít vztah mezi silou signálu a vzdáleností pomocí Friisovy rovnice:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}, \quad (6)$$

kde $P_r(d)$ je síla vyslaného signálu, P_t je síla přenosu, G_t je zisk antény vysílače, G_r je zisk antény přijímače, λ je vlnová délka signálu v metrech a d je vzdálenost vysílače a přijímače. Tento model použití samozřejmě není ideální, protože Friisův vzorec vyjadřuje útlum přímého signálu a nepočítá s odrazy jednotlivých paprsků od předmětů. Z toho pak vznikají difrakce a rozptylování rádiového signálu. V prostředí, kde jsou nějaké překážky ať už budovy nebo stromy, je šíření signálu daleko komplikovanější, zejména pak v interiérech budov. [4]

Protože však většina vysílačů a přijímačů je umístěna ve městech, bylo třeba nějakým způsobem vytvořit model, který by fungoval i v takto ztížených podmínkách. Na základě empirických měření byl vytvořen vztah pro výpočet síly signálu jako střední hodnota závislá na logaritmicko-normálně rozložené náhodné veličině

$$P_r(d) [dBm] = P_0(d_0) [dbm] - 10n_p \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma, \quad (7)$$

kde $P_0(d_0)$ je známá referenční hodnota síly v dBm při referenční vzdálenosti d_0 od vysílače, n_p je koeficient ztráty signálu, který určuje poměr mezi vzdáleností a poklesem signálu, X_σ představuje nulovou střední hodnotou Gaussovského rozložení náhodné proměnné se standardní odchylkou σ a vyjadřuje náhodný efekt stínění.

Z rovnice (7) lze pak odvodit, že z měření RSS, P_{ij} , mezi vysílačem i a přijímačem j , je maximální věrohodnost odhadu vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem rovna

$$\hat{d}_{ij} = d_0 \left(\frac{P_{ij}}{P_0(d_0)} \right)^{-1/n_p}, \quad (8)$$

přičemž P_{ij} a $P_0(d_0)$ jsou v této rovnici měřeny v mW na rozdíl od předchozí rovnice, kde jsou hodnoty uváděny v dBm.

Spojením rovnice (7) a (8) dostaneme vztah mezi odhadovanou a skutečnou vzdáleností

$$\hat{d}_{ij} = d_{ij} 10^{\frac{X\sigma}{10n_p}} = d_{ij} 10^{\frac{\ln(10)X\sigma}{10n_p \ln(10)}} = d_{ij} e^{\frac{X\sigma}{\eta n_p}}, \quad (9)$$

kde $\eta = \frac{10}{\ln(10)}$

Předpokládaná hodnota \hat{d}_{ij} je:

$$E(\hat{d}_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} d_{ij} e^{\frac{X\sigma}{\eta n_p}} e^{-\frac{X\sigma}{2\sigma^2}} dX_{\sigma} = d_{ij} e^{\frac{\sigma^2}{2\eta^2 n_p^2}} \quad (10)$$

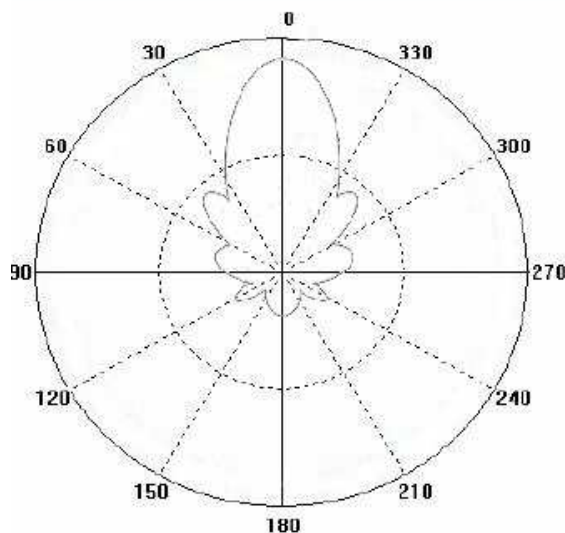
Největší odhad pravděpodobnosti v rovnici (4) je zkreslený odhad skutečné vzdálenosti a objektivní odhad je dán rovnicí:

$$\hat{d}_{ij} = d_0 \left(\frac{P_{ij}}{P_0(d_0)} \right)^{-1/n_p} e^{-\frac{\sigma^2}{2\eta^2 n_p^2}} \quad (11)$$

Dalším způsobem jak zjistit umístění na základě metody poklesu signálu spočívá ve vytvoření mapy síly signálu v uzavřeném prostoru. Mapu je možné vytvořit buď takzvaně offline přímým měřením nebo online, kdy jsou použita sniffovací zařízení, která měří sílu signálu na předem známých místech. Těto metody je hojně využíváno při určování polohy v bezdrátových WLAN sítích, ale její použití je vhodné i pro bezdrátové senzorové sítě. [4]

3.2 Angle of arrival

Další metodou pomocí které je možné zjistit vzdálenost mezi uzly je metoda označovaná jako Angle of arrival (AOA). Tato metoda pracuje na principu měření úhlu mezi směrem odkud signál přišel a takzvaným referenčním směrem, který je pevně stanoven.



obr. 6: Model patternu horizontální antény. Nejsilnější signál přichází od severu (0°). [6]

Tento směr je definován jako 0° a odchylky pak ve stupních ve směru hodinových ručiček od severu (viz obr. 4). Možností jak měřit směr, odkud signál přišel, je opět několik.

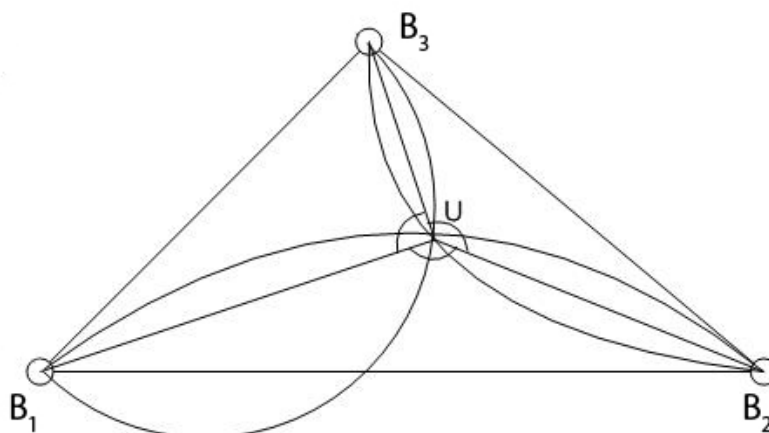
První způsob spočívá v tom, že se využije směrová anténa, která se otáčí kolem své osy, nejčastěji pomocí nějakého elektromotoru. Anténa zaznamenává sílu signálu a směr natočení vzhledem ke směru, kde se nachází referenční uzel. Zdroj signálu se nachází v místě, kde je síla signálu největší. Důležitými parametry jsou citlivost antény a šířka vysílaného svazku.

Problém však může nastat v případě, že síla příchozího signálu není vždy stejně velká, například vlivem nějakého rušení a rotující anténa může mít s příjmem signálu potíže. V tomto případě se využívá ještě jedna, stacionární všesměrová anténa. Síla signálu změřená jednotlivými anténami je pak porovnávána a následně může být vliv různé intenzity signálu do značné míry odstraněn. [4]

Další způsob jak zjistit směr příchodu signálu využívá minimálně dvě (většinou však čtyři) stacionární směrové antény s pevně daným směrem natočení. Porovnáme-li síly signálu změřené každou anténou v témže čase a vezmeme-li v úvahu směr natočení jednotlivých antén, dostaneme směr, odkud signál přišel, a to i v případě, kdy se síla signálu v důsledku rušení mění.

Směr se nejprve určí jen přibližně podle toho, která anténa má nejsilnější signál, a poté se pomocí výsledku měření z ostatních antén dopočítává přesnější pozice vysílače a to opět triangulační metodou. I zde však měření není zcela bezchybné a záleží na počtu zúčastněných antén. Čím více antén, tím samozřejmě lépe. Z tohoto důvodu se například v senzorových sítích instaluje na každý senzor anténa. Vznikne tak celé pole antén a měření je tak mnohem přesnější. Chyby měření se při použití čtyř antén pohybují kolem 10-15°, při využití šesti antén bývá chyba kolem 5° a při měření s osmi už je chyba jen kolem 2°. [4]

Tento postup však předpokládá, že známe pozici i orientaci každého uzlu v síti. To by však při instalaci znamenalo, že se musí každý uzel pevně umístit, což je časově i finančně velice náročné a nepraktické. Z tohoto důvodu se pevně instaluje pouze několik uzlů označovaných jako maják. Zbytek uzlů se rozmístí podle potřeby aniž by byla předem známa jejich poloha a mnohdy není známa ani jejich orientace. Zjišťování jejich polohy je tedy o něco složitější, ne však nemožné.



obr. 7: Lokalizace uzlu U [6]

Pokud není známa jejich orientace, tedy není-li znám úhel jejich natočení vůči referenčnímu bodu, můžeme použít relativní natočení vzhledem k pevně instalovaným uzlům (majákům). Podle obr. 7 úhly B_1UB_2 , B_1UB_3 a B_2UB_3 mohou být spočítány s využitím znalosti relativních úhlů. Známe tedy polohu dvou bodů, a známe úhel, který svírají jejich spojnice s bodem U, jehož polohu hledáme. Bod U je tedy umístěn tak, aby polopřímky, které svírají daný úhel, procházely právě body B_1 a B_2 . [6]

Při hledání bodu U nejprve zjistíme poloměr kružnice, po které se bod U pohybuje. To zjistíme díky rovnici

$$r = \frac{c}{2 \sin \chi}, \quad (12)$$

kde c značí vzdálenost mezi body B_1 a B_2 a χ značí velikost úhlu B_1UB_2 .

Známe-li poloměr kružnice určíme její střed, který leží ve stejné vzdálenosti od bodu B_1 a od bodu B_2 pomocí rovnic

$$\begin{aligned}(x - x_{B_1})^2 + (y - y_{B_1})^2 &= r_{B_1}^2 \\ (x - x_{B_2})^2 + (y - y_{B_2})^2 &= r_{B_2}^2.\end{aligned}\tag{13}$$

Teď již známe vše potřebné k tomu, abychom sestrojili rovnici kružnice trojúhelníku B_1B_2U opsané. Totéž je třeba udělat pro trojúhelník se základnou B_2-B_3 a B_1-B_3 .

Výsledné rovnice tedy budou:

$$\begin{aligned}(x_1 - x_{k1})^2 + (y_1 - y_{k1})^2 &= r_1^2 \\ (x_2 - x_{k2})^2 + (y_2 - y_{k2})^2 &= r_2^2 \\ (x_3 - x_{k3})^2 + (y_3 - y_{k3})^2 &= r_3^2\end{aligned}\tag{14}$$

kde x_{kn} a y_{kn} určuje souřadnice středu kružnic a r_n určuje jejich poloměr. Bod U se nachází v průsečíku těchto tří kružnic.

3.3 Time of Arrival (TOA)

Pod tímto označením se skrývají dva podobné způsoby měření podle doby, kterou zabere cesta signálu z vysílače do přijímače. Jedná se o jednosměrné šíření signálu v čase (One-way propagation time measurement) a zpáteční (oboustranné) šíření signálu v čase (Roundtrip propagation time measurement).

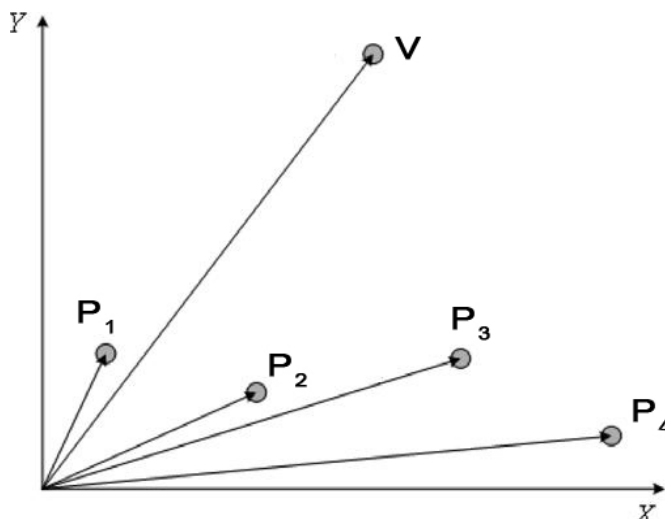
Jednosměrné šíření signálu se měří tím způsobem, že se změří doba mezi vysláním signálu z vysílače a příjmem stejného signálu přijímačem. Je ale potřeba, aby byla obě zařízení synchronizována. Pokud by nebyla, byl by výsledný čas vždy o nějakou část posunut. Tato synchronizace však vyžaduje vyšší nároky na vybavení senzorů časovou synchronizací a z toho samozřejmě vyplývá i vyšší finanční náročnost celé sítě. Tato potřeba synchronizace tak dělá z této metody nejméně výhodnou možnost měření vzdálenosti.

Zpáteční měření času signálu je na tom o něco lépe. Tato metoda rovněž měří čas, který signál potřebuje k překonání dané vzdálenosti, avšak oproti předchozí metodě je signál přijatý

přijímačem odeslán zpět k vysílači. Odpadá tím problém se synchronizací jednotlivých senzorů. Problém zde představuje pouze doba zpracování signálu přijímačem, tedy doba mezi příjmem signálu a jeho zpětnému vyslání. Tuto dobu je tedy potřeba změřit a odečíst od doby přenosu signálu. [4]

3.4 Time difference of arrival (TDOA)

Tato metoda využívá ke zjištění polohy rozdíly v čase mezi příchody signálů z jednotlivých stacionárních bodů se známým umístěním. Opět ke svému správnému fungování potřebuje několik bodů, které jsou pevně umístěny, a je známá jejich pozice. Tyto vysílače musejí být časově synchronizovány, aby byly schopny vysílat signály ve stejný čas a přijímač na základě pořadí jejich příchodu a rozdílů v čase mezi jednotlivými příchody pak vypočítá, jak daleko se od kterého vysílače nachází, a pomocí trilaterální metody zjistí svou polohu vůči vysílačům.



obr. 8: Lokalizace pomocí time difference of arrival

Existují lokalizační algoritmy, kdy sílu signálu vysílače měří několik přijímačů se známou polohou, aby zjistily polohu vysílače. Tento postup teď budeme demonstrovat pomocí obr. 8.

Máme skupinu přijímačů P1, P2, P3 a P4 a jeden vysílač V. Časovou prodlevu mezi časy, kdy přijímač zachytí signál jednotlivých vysílačů je dán vztahem:

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j = \frac{1}{c} (\|P_i - V\| - \|P_j - V\|), \quad i \neq j, \quad (15)$$

kde t_i a t_j představují čas, kdy je signál vyslaný vysílačem V přijat přijímači P_i a P_j , c je rychlost šíření signálu, a $\| \cdot \|$ představuje Euklidovskou normu, která je dána vztahem:

$$\|p\| = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2} = \sqrt{\mathbf{p} \cdot \mathbf{p}}, \quad (16)$$

kde p_n jsou souřadnice bodu p .

Měření TDOA dvou různě rozmístěných přijímačů je již poměrně vyspělá technologie. Nejpoužívanější metodou je křížová korelace, kdy funkce křížové korelace mezi dvěma signály S_A a S_B , které přijaly přijímače A a B je dána tím, že integruje součin zpoždění dvou přijímaných signálů nad dostatečně dlouhou dobou T .

$$\rho_{ij}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T s_A(t) s_B(t - \tau) dt \quad (17)$$

Křížová korelační funkce může být získána i z inverzní Fourierovy transformace z očekávané frekvence křížové spektrální hustoty funkce. Tato metoda bývá upřednostňována, protože signály mohou být filtrovány před výpočtem křížové korelační funkce. To vyžaduje poměrně přesnou synchronizaci mezi přijímači, ale neklade požadavky na signál vysílaný vysílačem. Přesnosti a schopnosti časového rozlišení z TDOA měření se zlepšují, pokud se zvětší i vzdálenost mezi přijímači, neboť se tím zvětší i rozdíly mezi časy příchodu signálu. Pokud jsou příliš blízko u sebe, nemusí dojít k rozlišení jednotlivých signálů. TDOA mnohonásobného signálu, které nejsou rozlišeny o více než šířku jejich křížové korelačních vrcholů, většinou nemohou být rozeznány standardním měřicím postupem.

Dalším problémem, který snižuje přesnost této metody je vícečetný signál způsobující překrývání vrcholů křížové korelační funkce a metoda nefunguje korektně. V tomto případě je nutné, aby byla vybrána správná hodnota vrcholu signálu, tzn. výběr nejvyššího nebo prvního vrcholu. [4]

3.5 Měření pomocí ultrazvuku

Měření pomocí ultrazvuku vychází z metody měření jednosměrného šíření signálu. Již zmíněný problém se synchronizací je zde vyřešen právě pomocí ultrazvuku. Jak je známo, rádiový signál se šíří daleko rychleji než zvuk. A právě tento rozdíl v rychlostech šíření se využívá k synchronizaci. Vysílač vyšle ve stejný okamžik rádiový i ultrazvukový signál.

Přijímač přijme rádiový signál a čeká na signál ultrazvukový. Z doby, která uplynula mezi příjmem jednotlivých signálů se pak na základě znalosti prostředí, kudy signál procházel (nejčastěji vzduch), a jejich vlastností (frekvence rádiového signálu, teplota prostředí) vypočítá na základě následujících vzorců rychlost, jakou se signál pohyboval.

Rychlost rádiového signálu: $c = f \cdot \lambda$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

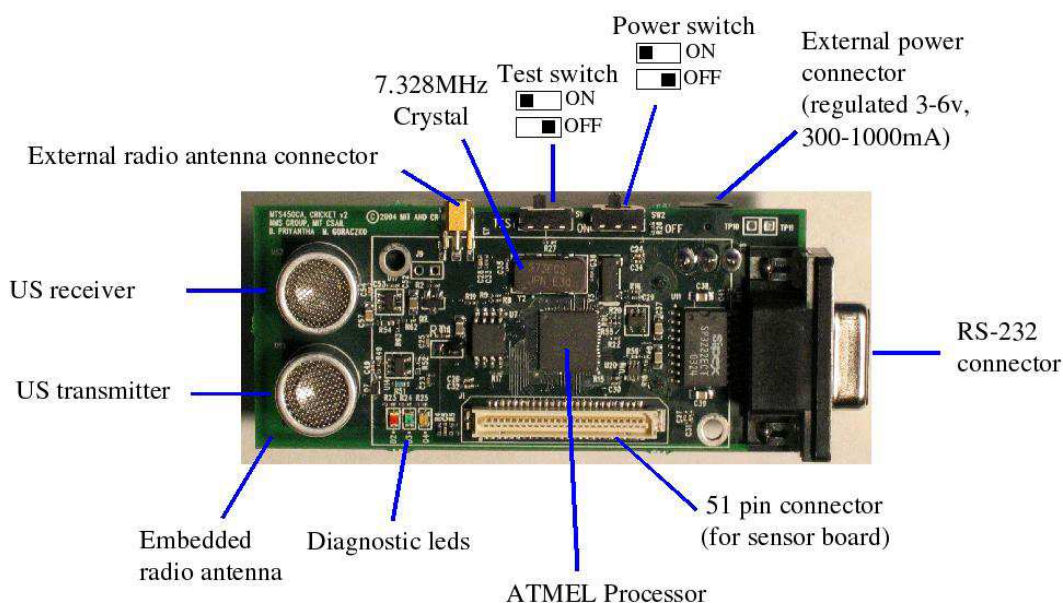
f – frekvence signálu, λ - vlnová délka

Rychlost zvuku ve vzduchu: $c = (331,57 + 0,607 \cdot t)$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

t – teplota vzduchu

Využívá se tak toho, že rychlost elektromagnetického vlnění (300 000 000 m/s ve vakuu) je několikanásobně vyšší, než rychlost ultrazvuku (344 m/s při 21°C).

Jedním ze zařízení, které využívají právě metodu určování polohy pomocí ultrazvuku je zařízení firmy Crosbow označované jako Cricket.



obr. 9: ukázka a popis cricketu [10]

Jedná se o zařízení velké přibližně 10 x 4 cm. Napájeno je buď pomocí baterií umístěných ve spodní části nebo pomocí adaptéru z elektrické rozvodné sítě. Dále je zde umístěn vysílač a přijímač ultrazvukového signálu (US receiver a US transmitter) a pro lepší příjem rádiového signálu je možné připojit i externí anténu.

Další důležitou součástí je konektor pro sériový kabel nutný pro spojení s počítačem, díky němuž lze s cricketem komunikovat a zachytávat tak naměřené hodnoty. Dále je zařízení vybaveno souborem několika indikačních LED diod, pomocí kterých je možné zjistit, zda spolu crickety komunikují a zda dochází k příjmu ultrazvukového signálu, který je náchylnější na rušení okolními vlivy a i dosah je daleko menší než dosah signálu elektromagnetického.

4 Měření vzdálenosti v reálném prostředí

První část praktického měření bude prováděna na základě metody určování vzdálenosti pomocí ultrazvuku. Měření bude realizováno se systémem Cricket. Dosah jejich ultrazvukového signálu je podle přiloženého manuálu 10,5 metru [10]. Předběžné měření ukázalo, že jsou schopny zachytit signál až do vzdálenosti 12,5 metru na volném prostranství. Měřením se tedy pokusíme zjistit, zda je tato vzdálenost dosažitelná i uvnitř budovy, případně určíme maximální měřitelnou vzdálenost v uzavřeném prostoru.

Další parametr, který budeme sledovat, je přesnost určování vzdálenosti. Toto měření bude tedy probíhat od 0 do maximální možné měřitelné vzdálenosti (přibližně 12 metrů) s krokem po 0,5 metru. V každém kroku bude naměřeno několik hodnot, z nichž bude spočítán průměr a následně určena odchylka od průměrné odhadnuté vzdálenosti.

Dále budeme testovat, jak se změní změřená vzdálenost a dosah, nebudou-li crickety namířeny přímo na sebe, ale budou-li natočeny o určitý úhel.

Měření bude probíhat tedy tak, že beacon uzel bude připojen pomocí kabelu k počítači a bude umístěn v referenčním bodu 0. Od tohoto bodu se pak bude listener umisťovat ve vzdálenosti od 0,5 metru, dokud bude přijímač schopen zachytávat ultrazvukový signál s krokem 0,5 metru. U každé vzdálenosti od referenčního bodu 0 bude změřeno přibližně 20 hodnot, aby bylo možné eliminovat náhodné vlivy na změřenou výslednou vzdálenost. Z těchto hodnot bude následně vypočítána průměrná hodnota, která bude reprezentovat výslednou změřenou hodnotu pro každou vzdálenost a bude pak porovnána se skutečnou vzdáleností.

Tímto způsobem budeme crickety testovat jak na volném prostranství, jako je například pole či louka, tak uvnitř nějakého uzavřeného prostoru. Dále vyzkoušíme přesnost a dosah, když umístíme mezi crickety nějakou překážku např. ruku, celé tělo, nebo umístíme-li cricket například do tašky či batohu.

Dále budeme porovnávat, jak se naměřené hodnoty pro jednotlivé vzdálenosti lišily od průměrné vzdálenosti a jak přesné bude měření, budeme-li mít pouze jednu hodnotu od dané vzdálenosti.

Obdobně by mělo měření probíhat i při určování vzdálenosti pomocí RSS. Opět vyzkoušíme maximální dosah, přesnost měření, odchylky, náchylnost na různá rušení vyvolaná okolními vlivy a to jak ve volném prostoru, tak i uvnitř budovy.

Na tyto dvě metody měření se zaměříme především proto, že jsou poměrně snadno dostupné a práce s nimi není příliš složitá.

Úkolem měření tedy bude změřit vzdálenost mezi uzly pomocí cricketů a IRIS modulů a porovnat jimi změřené hodnoty vzdálenosti s reálnou vzdáleností.

Výsledkem měření bude porovnání obou metod a určení, jak jsou spolehlivé a přesné při zjišťování vzdálenosti, jak na ně působí prostředí, ve kterém se nacházejí, a jak jsou náchylné k chybám, pokud budou vystaveny nějakým rušivým vlivům.

4.1 Scénáře měření

Scénář 1:

Cíl: Cílem tohoto měření bude změřit vzdálenost pomocí cricketů a pomocí IRIS modulů od referenčního bodu 0 ve volném prostranství a výsledky porovnat se skutečnou vzdáleností.

Místo měření: Volné prostranství - louka nebo pole

Vzdálenost: 0 - 13m s krokem 0,5m

Pokud to okolnosti dovolí zkusit měřit za podmínek různého počasí - jasno, déšť, sněžení a za různých teplot - 0°, 10°, 20°, 30°

U každé vzdálenosti změřit přibližně 20 hodnot vzdálenosti, časový rozdíl a pokles síly signálu.

Určit chyby mezi změřenou vzdáleností pomocí RSS a pomocí ultrazvuku a porovnat hodnoty se skutečnou vzdáleností

Scénář 2:

Cíl: Cílem tohoto měření bude změřit vzdálenost pomocí cricketů a pomocí IRIS modulů od referenčního bodu 0 v uzavřeném prostoru a výsledky porovnat se skutečnou vzdáleností.

Místo měření: uvnitř budovy, měření na přímou viditelnost - chodba

Referenční uzel je umístěn při jednom měření na podlaze, při druhém u stropu

Vzdálenost: 0 - 13m s krokem 0,5m

U každé vzdálenosti změřit 20 hodnot vzdálenosti, časový rozdíl, pokles síly signálu.

Určit chyby mezi změřenou vzdáleností pomocí RSS a pomocí ultrazvuku, porovnat hodnoty změřené při umístění na podlaze a při umístění u stropu a porovnat výsledky jednotlivých měření se skutečnou vzdáleností.

Určit, která z metod je k měření v daných podmínkách vhodnější

Scénář 3:

Cíl: Cílem tohoto měření bude změřit vzdálenost pomocí cricketů a pomocí IRIS modulů od referenčního bodu 0 v uzavřeném prostoru, kde bude měření vystaveno překážkám. Dalším cílem bude výsledky porovnat se skutečnou vzdáleností a se vzdáleností změřenou ve scénáři 2.

Místo měření: uvnitř budovy, měření na přímou viditelnost - chodba

Referenční uzel je umístěn na zemi a během měření je mezi něj a měřicí uzel umístováno rušení způsobené pohybem osob, umístováním překážek, popřípadě natáčením uzlů pod určitým úhlem

Vzdálenost: 0 - 13m s krokem 0,5m

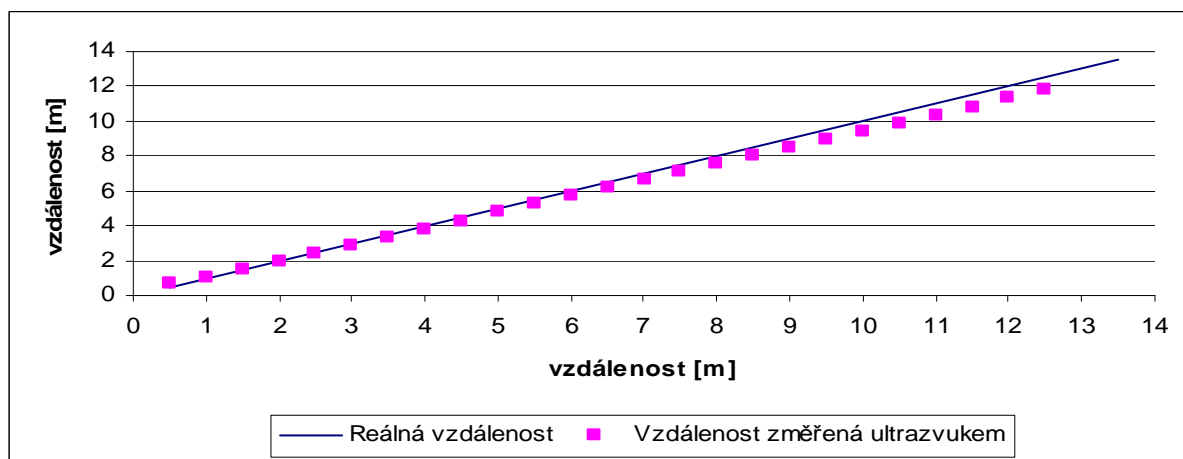
U každé vzdálenosti naměřit 20 hodnot, časový rozdíl, pokles síly signálu.

Určit chyby mezi naměřenou vzdáleností pomocí RSS a pomocí ultrazvuku, porovnat hodnoty změřené při umístění na podlaze a při umístění u stropu a porovnat výsledky jednotlivých měření se skutečnou vzdáleností a určit, která z metod je k měření v daných podmínkách vhodnější.

Na závěr pak porovnáme výsledky měření obou metod, porovnáme jejich přesnost při měření v daných podmínkách a zjistíme tak, která metoda je pro měření za daných podmínek vhodnější nebo spolehlivější a jak jsou jednotlivé metody náchylné k chybám při měření za nepříznivých podmínek.

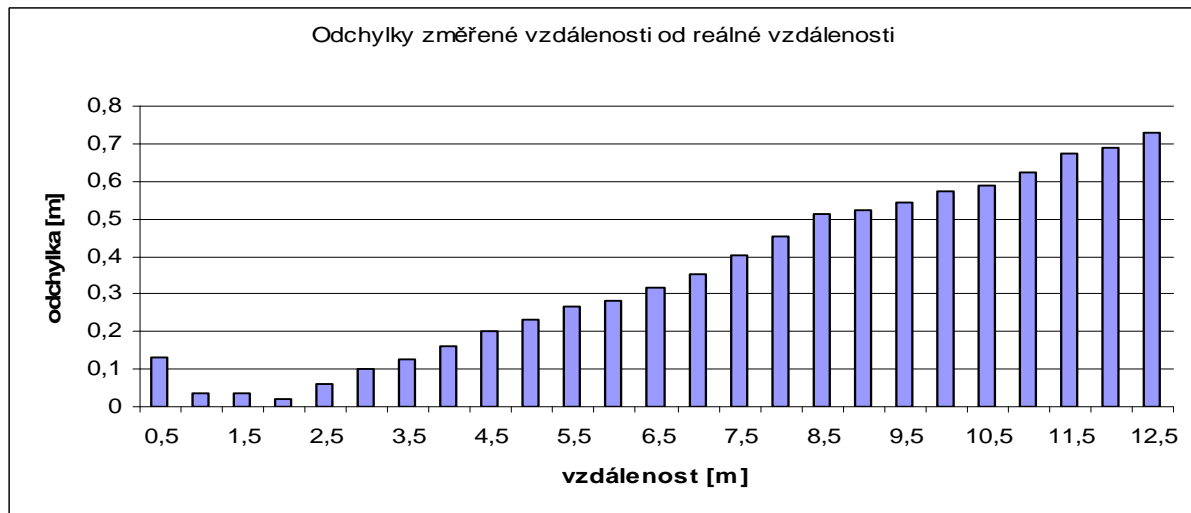
4.2 Měření vzdálenosti pomocí cricketů

První zkušební měření s cricketama proběhlo podle scénáře 1, tedy na volném prostranství. Teplota okolí se při měření pohybovala kolem bodu mrazu $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Měřila se vzdálenost od 0,5 metru do maximální možné vzdálenosti, kdy bylo ještě možné zachytávat ultrazvukový signál. Tato vzdálenost byla 12,5 metru, což je o 2 metry více, než udává výrobce v manuálu. Měření při této vzdálenosti však již bylo poměrně komplikované, neboť velmi záleželo na nasměrování obou zařízení přesně na sebe a už jen malé odchylky se projevovaly jako výpadky signálu. Na vzdálenost větší než 10 metrů tedy není měření pomocí cricketů příliš spolehlivé.



obr. 10: Vzdálenost měřená pomocí cricketů na volném prostranství

V grafu na obr.10 je modrou křivkou zobrazena reálná vzdálenost mezi crickety a růžovou křivkou zobrazena vzdálenost změřená pomocí cricketů. Zobrazené hodnoty jsou výsledkem průměru hodnot pro jednotlivé vzdálenosti. Tyto hodnoty se pohybovaly kolem průměrné hodnoty s odchylkou několik centimetrů. S rostoucí vzdáleností se samozřejmě jejich rozdíly zvětšovaly, jejich nárůst však nebyl nijak výrazný (maximální odchylka byla 10 cm ve vzdálenosti 12,5 metru, kde, jak již bylo řečeno, bylo měření velmi obtížné). Daleko větší je odchylka od reálné vzdálenosti. Ta se, jak je vidět z grafu, od reálné vzdálenosti s rostoucí vzdáleností čím dál více liší a ve vzdálenosti 10 metrů od referenčního bodu je již tato odchylka téměř 60 cm. Ještě lépe tyto odchylky zobrazuje následující graf na obr. 11.



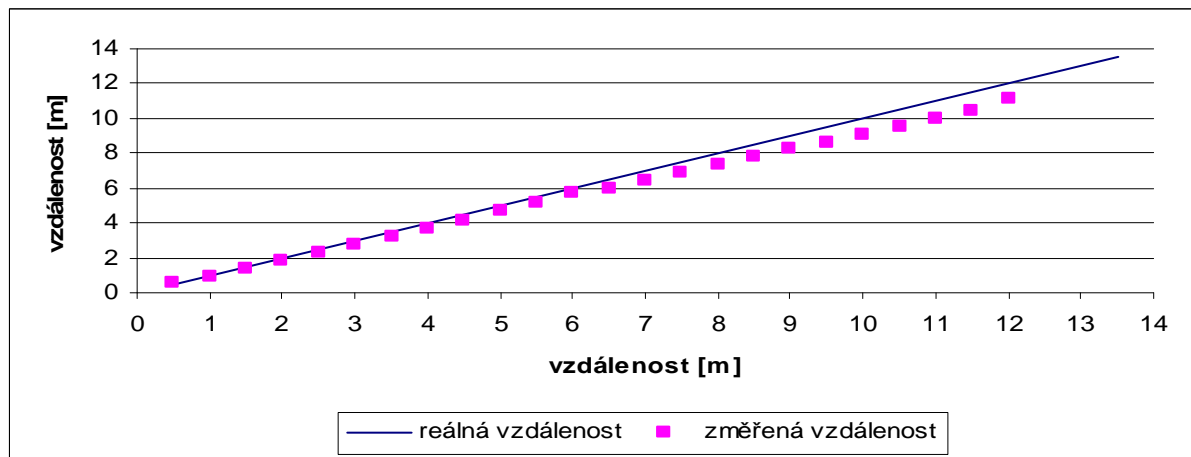
obr. 11: Průměrné odchylyky vzdálenosti změřené pomocí cricketů ve volném prostranství od reálné vzdálenosti

Na tomto grafu jsou znázorněny odchylyky od reálné vzdálenosti. Nejmenší odchylka je ve vzdálenosti 2 metrů. Zajímavá je odchylka ve vzdálenosti 0,5 metru, která je stejně velká jako odchylka ve vzdálenosti 3,5 metru a vzdálenosti mezi nimi byly změřeny přesněji. Tento jev je nejspíše způsoben nějakou chybou během měření na vzdálenost 0,5 m, kdy možná crickety nebyly dostatečně teplotně přizpůsobeny a následná korekce vzdálenosti podle okolní teploty byla z tohoto důvodu chybná. Tuto chybu lze odůvodnit i tím, že zpočátku měření na tuto vzdálenost byly hodnoty o několik centimetrů větší než na jeho konci. Pak už odchylyky podle předpokladu lineárně stoupají s rostoucí vzdáleností od referenčního uzlu.

Druhé zkušební měření probíhalo v uzavřeném prostoru, na dlouhé úzké chodbě za pokojové teploty. Nejdelší vzdálenost, která se podařila pomocí ultrazvuku změřit, byla 12 metrů, což je o 0,5 metru méně než při měření na volném prostranství. Tento rozdíl můžeme pravděpodobně odůvodnit tím, že na chodbě se ultrazvukové vlny odrážely od stěn a od stropu a tím docházelo k interferencím a rušení signálu vlastním signálem. Na volném prostranství se signál odrážel pouze od země, takže k rušivým interferencím docházelo pouze minimálně v porovnání s interferencemi vznikajícími na chodbě.

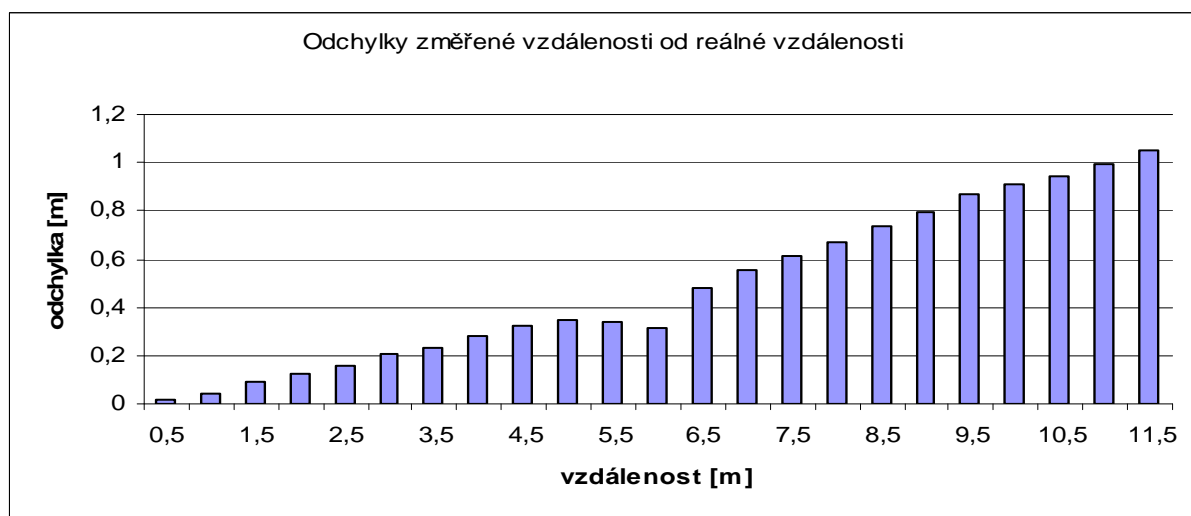
Dalším rušivým jevem byl občasný pohyb osob po chodbě. Pokud se někdo nacházel mezi měřícími uzly, docházelo velmi často k výpadkům. Z toho vyplývá, že měření pomocí ultrazvuku je velmi náchylné na jakoukoli překážku a měření na tak velkou vzdálenost není téměř možné realizovat. Důkladnějšímu prozkoumání rušících vlivů se budeme věnovat v další části práce.

Při měření na kratší vzdálenost opět měření probíhalo bez vážných komplikací. Ty začaly až při vzdálenosti kolem 7 metrů, kdy došlo k rušení a vypadávání ultrazvukového signálu ať už vlivem interferencí nebo pohybem osob, který nebylo možné eliminovat.



obr. 12: Vzdálenost měřená pomocí cricketů v uzavřeném prostoru

Obr. 12 zobrazuje vzdálenost změřenou nejprve pomocí metru (modrá křivka) a poté pomocí cricketu (růžová křivka). Opět je zde vidět, že měření pomocí cricketů není zcela přesné a že se zvětšující se vzdáleností se zvětšuje i odchylka od reálné vzdálenosti. Odchytky jsou opět zobrazeny v následujícím grafu.



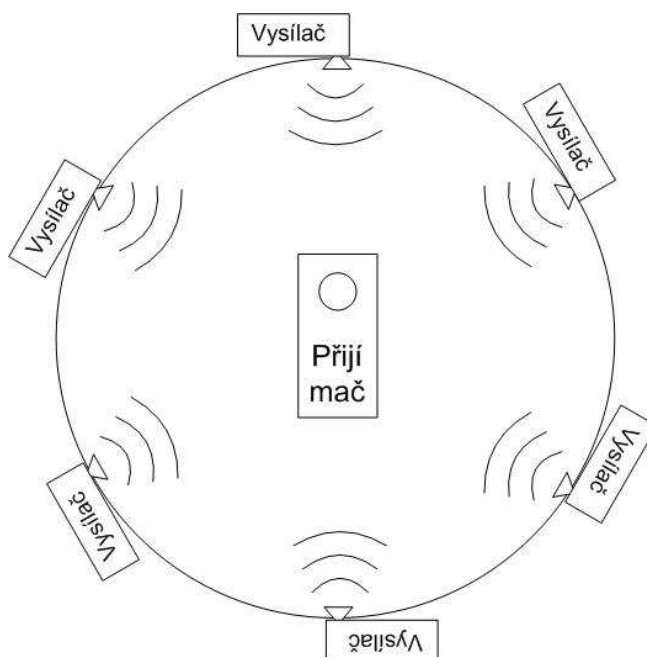
obr. 13: Odchytky vzdálenosti změřené pomocí cricketů v uzavřeném prostoru od reálné vzdálenosti

Jak je vidět, tak i zde roste odchylka se zvětšující se vzdáleností lineárně. Porovnáme-li hodnoty odchylek změřených na volném prostranství (obr. 11) a hodnoty odchylek v uzavřeném prostoru (obr. 13), zjistíme, že odchylky z měření ve volném prostoru se pohybují kolem 5%, zatímco odchylky z měření v uzavřeném prostoru se pohybují spíše kolem 7%. Jejich velikost však není tak lineární jako u odchylek vzniklých při měření ve volném prostranství, ale vykazují větší rozptyl.

4.3 Měření směrovosti cricketů

Během měření jsme zjistili, že crickets jsou poměrně hodně závislé na nasměrování vysílače ultrazvukového signálu. Hlavně při vzdálenosti větší jak 10 metrů bylo měření poměrně složité, protože i odchylka o pouhých několik stupňů znamenala ztrátu ultrazvukového signálu a tím pádem nebylo možné vzdálenost změřit.

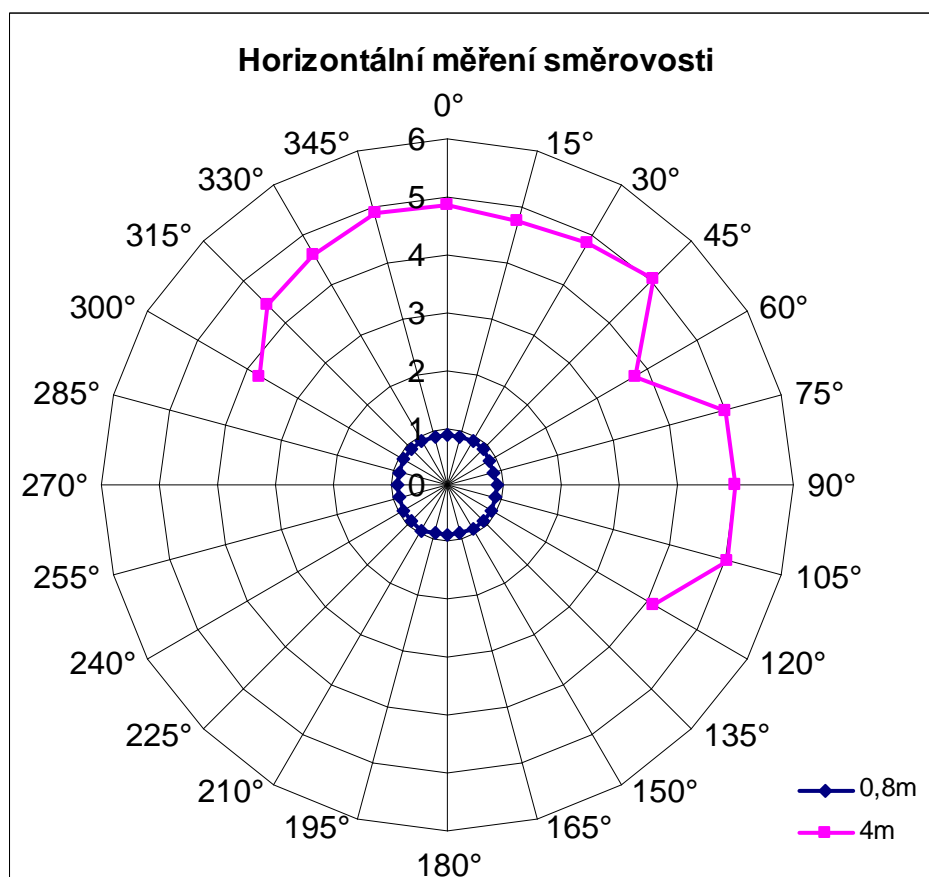
V následujícím měření tedy provedeme měření směrovosti, abychom zjistili, do jaké míry se odchylka projeví na výsledném odhadu vzdálenosti. Měřit budeme jak v horizontálním tak ve vertikálním směru kolem cricketu. Přijímač připojený k počítači bude umístěn uprostřed kružnice, po jejímž obvodu se nejprve ve vzdálenosti 84 cm a poté ve vzdálenostech 5 m a 8 m bude pohybovat vysílač a při odchylce každých 15° bude vzdálenost přeměřena.



obr. 14: Náskres měření horizontální směrovosti cricketu

Jako první budeme měřit směrové šíření signálu v horizontálním směru. To znamená, že přijímač bude nasměrován směrem nahoru a vysílač bude nasměrován vždy tak, aby vysílal směrem k přijímači. Předpokládaným výsledkem bude, že se nebudou hodnoty příliš měnit během měření po celém obvodu kruhu. To by mělo být z toho důvodu, že směr vysílání a příjmu bude vždy svírat stejný úhel o velikosti 90°. Hodnoty se samozřejmě mohou trochu lišit, ale odchylky by neměly mít zásadní vliv a ve výsledném grafu by se změny neměly téměř projevit. Rovněž výsledné hodnoty by se neměly příliš lišit od těch reálných.

Výsledná hodnota je opět průměr z přibližně 20 změřených hodnot, aby se případná náhodná chyba během měření projevila co nejméně.



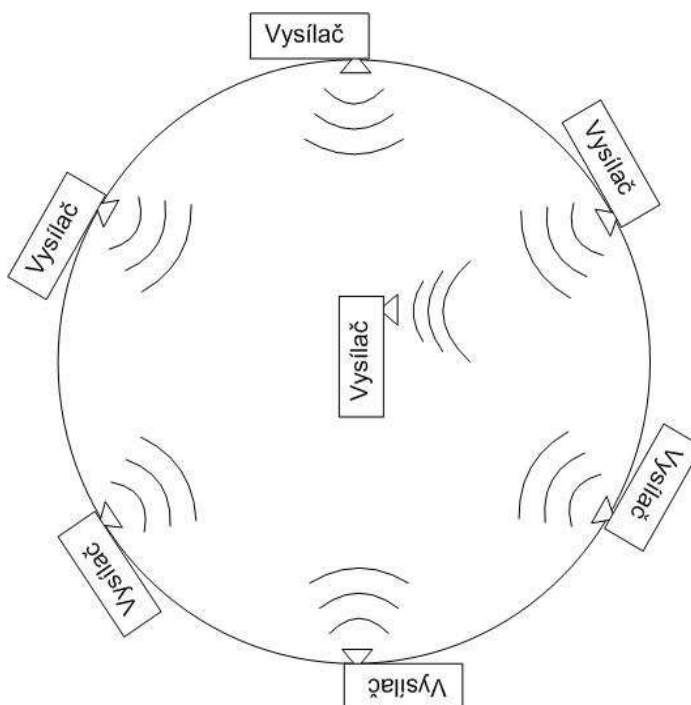
obr. 15: Výsledky měření horizontální směrovosti cricketu

Při měření směrovosti v horizontálním směru, tedy ve směru, kdy je cricket umístěn tak, že vysílaný signál má směr kolmý k ploše papíru, je z výsledného grafu vidět, že při vzdálenosti 0,8 m nemá úhel v této rovině prakticky žádný vliv na měření, což byl i náš předpoklad. Výsledné hodnoty se lišily pouze o několik málo centimetrů, což se však ve výsledném grafu téměř neprojevilo. Tuto odchylku je možné odůvodnit vlivem okolí, kdy docházelo k odrazu signálu od okolních objektů.

Daleko problematictější bylo měření na vzdálenost 5 metrů, kdy na tuto vzdálenost nebyl cricket schopen signál vůbec zachytit a proto byla vzdálenost snížena na 4 metry. V této vzdálenosti byl cricket schopen signál zachytit, ale pouze do 120° v jednom směru a do 60° v opačném směru měření od ideálního nasměrování (to znamená, že cricket byl natočen tak, aby ultrazvukové senzory umístěné na jednom okraji desky byly co nejbližší k přijímači). Při úhlu větším jak 30° v každém směru cricket zachytil pouze jeden impuls ultrazvukového signálu. To lze s největší pravděpodobností odůvodnit hardwarovou konstrukcí cricketu, která nedovoluje rovnoměrnému šíření ultrazvukového signálu. Měření tedy nemůžeme pokládat za

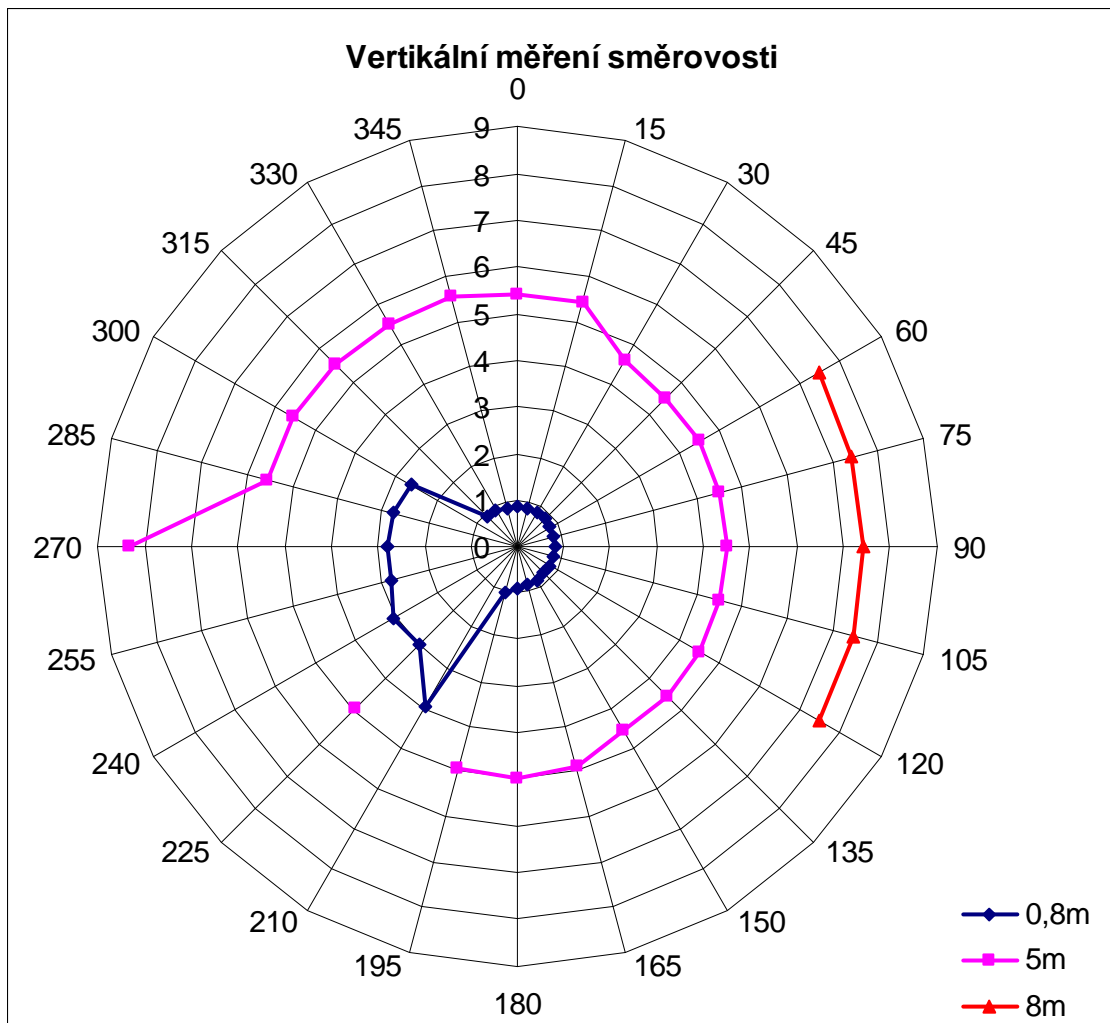
věrohodné. To je patrné i z grafu, kdy se změřená vzdálenost v některých úhlech poměrně hodně liší od vzdálenosti reálné. Měření na vzdálenost 8 metrů nebyla vůbec prováděna, protože nebyl-li cricket schopen signál zachytit ve vzdálenosti 5 metrů, ve vzdálenosti 8 metrů by ho rovněž nezachytil.

Dále budeme provádět měření ve vertikálním směru, cricket bude natočen tak, aby vysílal signál směrem označeným jako 90° . Budeme měřit opět na vzdálenost 0,8 m, 5 m a 8 m. Předpokladem je, že právě ve směru 90° , bude změřená vzdálenost nejpřesnější, protože signál zde má nejkratší cestu. V grafu se to projeví tím, že vzdálenost bude nejkratší, neboť nebude docházet k žádným okolním rušivým vlivům, nebo pouze k minimu z nich. Jedná se tak o téměř ideální stav. Dále očekáváme, že čím bude větší odchylka od přímého směru, tím bude změřená vzdálenost větší, až do míst kolmých k přímému směru vysílání, tedy 0° a 180° .



obr. 16: Náčrt měření vertikální směrovosti cricketu

Jak bude měřená vzdálenost vypadat ze zadní části cricketu je velkou otázkou a bude záležet do jaké vzdálenosti cricket signál zachytí i z opačného směru vysílání, než jak byl nastaven. Dalším faktorem, který může měření za takovéto situace nastat, je, jak se bude signál odrážet od překážky umístěné před cricketem. Všechny tyto nepříznivé situace by se měly projevit tak, že vzroste výsledná vzdálenost nebo při větších vzdálenostech nebude vzdálenost vůbec změřena. Účelem tohoto měření je zjistit, jak moc se výsledná vzdálenost bude lišit od skutečnosti a jestli je možné použít crickety v praktickém využití i za takto nepříznivých podmínek.



obr. 17: Výsledky měření vertikální směrovosti cricketu

Z výsledného grafu je vidět, že pravá polovina grafu, tedy směr vysílání ultrazvukového signálu, dopadla podle očekávání a v přímém směru (90°) je změřená hodnota opravdu nejmenší a směrem k 0° a 180° se změřená vzdálenost pomalu zvětšuje. To je patrné především u křivky zobrazující vzdálenost 5 metrů. Při měření na vzdálenost 8 metrů už bylo možné měřit pouze do odchylky 30° od ideálního nasměrování. Při větším úhlu již nebyl přijímač schopen ultrazvukový signál zachytit.

Poměrně přesné hodnoty mezi 315° a 0° při měření na vzdálenost 0,8 m je možné vysvětlit hardwarovou konstrukcí cricketu. Právě na této straně na kraji má cricket umístěn ultrazvukový senzor a ten tak mohl přijímat ultrazvukový signál i z druhé strany desky. Naopak největší odchylka byla naměřena při úhlu 210°, kdy musel ultrazvukový signál procházet skrz celé zařízení a výsledná hodnota je nejspíše vzdálenost dráhy od vysílače k objektu, od kterého se signál odrazil zpět k cricketu a zrovna v tomto směru byla vhodná překážka nejdále.

Podobně lze vysvětlit i odchylky při měření na vzdálenost 5 metrů. Poměrně přesné hodnoty mezi 0° a v tomto případě až 285° opět odpovídají teorii o hardwarové konstrukci cricketu, i když zde je úhel snad až příliš velký a možná došlo ke vhodnému odrazu ultrazvukových vln tak, aby byla výsledná hodnota takto blízká skutečné vzdálenosti.

Hodnoty mezi 270° a 195° nebyly vůbec změřeny, protože přijímač nebyl schopen ultrazvukový signál zachytit. Jedinou výjimku tvoří úhel 225° , kdy došlo opět nejspíše ke vhodnému odrazu signálu. Tak tomu bylo pravděpodobně i u 270° , kdy byl cricket namířen přesně obráceně proti ideálnímu stavu a signál se odrazil od objektu za cricketem. Tomu napovídá i velká změřená vzdálenost.

Z měření tedy vyplývá, že zařízení by mělo být umístěno tak, aby bylo co nejbližší a směřovalo co nejvíce tím směrem, kde se bude cricket s největší pravděpodobností nacházet. Tím by docházelo k minimu odrazů, které mohou výsledné hodnoty velmi zkreslit. Pokud tyto podmínky nelze zajistit, je buď nutné výsledné hodnoty zkontrolovat nebo podrobit nějaké korekci. Nejlepším řešením by ale nejspíše bylo vyzkoušet nějakou jinou technologii na měření vzdálenosti.

4.4 Měření přes překážky a vliv odrazu

Dalším závažným problémem, se kterým se musí crickety potýkat spočívá v tom, že ultrazvukový signál není schopen projít jakoukoli překážkou. Pokusy ukázaly, že umístíme-li mezi vysílač a přijímač jakoukoli překážku, i například list papíru, ultrazvukový signál neprojde a vzdálenost tak nelze změřit. Jediným způsobem je možnost využít možnosti odrazů signálu. V tomto případě se však naměřená vzdálenost může výrazně lišit od reality, což mimo jiné ukázalo i předchozí měření, kdy sice vzdálenost byla pouze 84 cm, ale cricket ji změřil jako téměř 4 m. Tímto problémem se budeme zabývat v následujícím měření, kdy budeme zkoušet, zda je možné měřit vzdálenost mezi crickety i když nejsou přímo viditelné, tedy je-li mezi nimi nějaká překážka.

Při tomto měření jsme postupovali tak, že jsme nejprve změřili vzdálenost mezi crickety pomocí metru, abychom určili skutečnou vzdálenost. Ta činila 4,5 metru. Poté jsme změřili jejich vzdálenost pomocí samotných cricketů bez jakýchkoli překážek a cricket naměřil 4,2 metru. To odpovídá i výsledkům z prvního měření, kdy jsme měřili maximální možnou měřitelnou vzdálenost a odchylky od reálné vzdálenosti.

Dále jsme zkusili mezi crickety umístit dřevěnou desku a sledovali jsme, jak se vložená překážka projeví na výsledné vzdálenosti. Tuto novou vzdálenost cricket změřil jako 5 metrů.

Došlo tedy podle předpokladů k prodloužení doby šíření ultrazvukového signálu. Následně jsme zkusili zkrátit vzdálenost mezi crickety na polovinu, tedy na 2,2 m. Opět jsme změřili vzdálenost nejprve bez překážky, kdy byla odhadnuta na 2 m. Následně jsme opět mezi vysílač a přijímač vložili dřevěnou desku a pozorovali, jak se výsledná vzdálenost změní. Zde už bylo měření zajímavější, protože cricket chvíli odhadoval vzdálenost na 3,2 m a chvíli na 4,7 m. Tyto hodnoty se nějakou dobu střídaly a nakonec se hodnota ustálila na 3,2 m.

Dále jsme vrátili crickety zpět do vzdálenosti 4,5 metru a umístili jsme mezi ně dvě překážky v podobě jedné dřevěné a jedné sololitové desky. Vzdálenost byla opět odhadnuta na 5 metrů. Při rozmístění cricketů na poloviční vzdálenost, tedy na 2,2 m, a umístění překážek mezi ně nebyly už crickety schopny zachytit ultrazvukový signál a tím změřit vzdálenost. Z toho vyplývá, že signál neprochází skrz překážku, ale dochází zde k odrazům od okolních objektů a následně pak po několika odrazech dojde k příjmu signálu cricketem, který vzdálenost vyhodnotí. Nevyhodnotí však přímou vzdálenost mezi uzly, ale vzdálenost, kterou musel ultrazvukový signál urazit, než se dostal k přijímači.

Abychom tuto teorii potvrdili, udělali jsme ještě jeden pokus. Crickety jsme umístili jako na začátku měření, tedy do vzdálenosti 4,5 metru, ale překážky jsme rozestavěli tak, aby se signál odrazil od jedné překážky ke druhé a od druhé překážky teprve k druhému cricketu. Tuto předpokládanou dráhu signálu jsme změřili pomocí metru a byla rovna 6 metrům. Poté jsme spustili měření a vzdálenost kterou cricket odhadoval byla rovna také přibližně 6 metrům, tedy o 1 metr víc, než naměřil cricket při měření pouze s jednou překážkou. Ještě jsme zkusili obě překážky natáčet, nepodaří-li se nám najít vhodnější úhly natočení, ale místo toho se stalo, že se odhadovaná vzdálenost zvětšovala a nebo se signál zcela ztratil a vzdálenost se odhadnout vůbec nedala. Z toho jsme tedy usoudili, že naše teorie o odražení signálu je pravdivá.

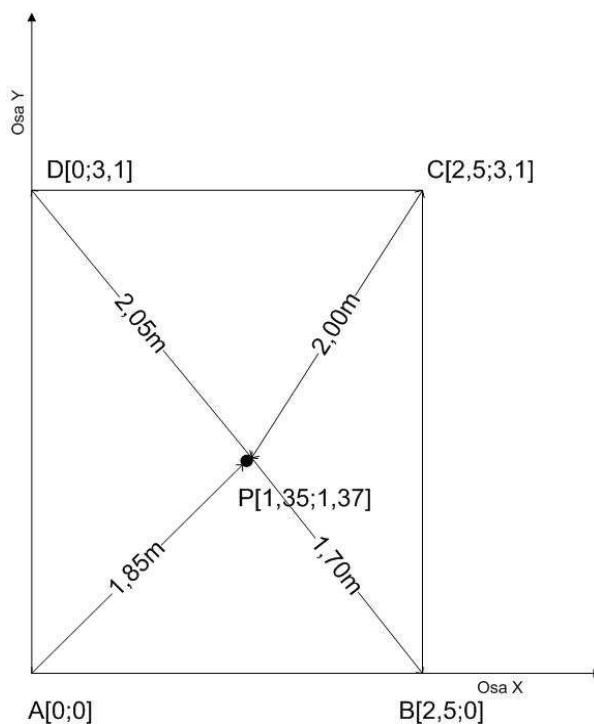
Díky této teorii lze také odůvodnit to, že nám vycházely při jednom měření dvě různé vzdálenosti. K tomuto jevu došlo patrně díky tomu, že se signál odrážel od dvou různých objektů a vlivem interferencí byl jednu chvíli silnější jeden nebo druhý signál.

Lze tak rovněž vysvětlit, proč nebyl cricket schopen změřit vzdálenost na pouhé dva metry při použití dvou překážek. Překážky byly patrně tak blízko u vysílače nebo přijímače, že ani pomocí odrazů nebylo možné ultrazvukový signál k přijímači dovézt.

Z tohoto všeho lze tedy vyvodit závěr, že crickety jsou na nepřímou viditelnost velmi špatně použitelné a správnost jejich výsledků tedy nelze zaručit, nebude-li zajištěna přímá viditelnost mezi jednotlivými uzly.

4.5 Vícebodové měření, základní lokalizace

Jako poslední měření s crickety jsme provedli vícebodové měření, kdy nás zajímalo, jestli bude možné na základě změřených vzdáleností zjistit polohu hledaného uzlu. Měření probíhalo tak, že byly rozmístěny 4 vysílače a mezi nimi jeden přijímač. Na základě znalosti polohy každého vysílače a jeho vzdálenosti od přijímače jsme se pak pokusili zjistit polohu přijímače. Jedná se tedy o kompletní lokalizaci, jak bude probíhat v praktickém použití.



obr. 18: Rozmístění uzlů během měření

Pro zjednodušení případu byly vysílače rozmístěny tak, že tvořily vrcholy obdélníku s délkami stran 2,5 a 3,1 m. Přijímač připojený k počítači byl umístěn uprostřed. Pro snadnější orientaci je možné použít náhled výše. Body A, B, C, D označují místa umístění vysílačů a bod P představuje přijímač jehož pozici budeme hledat. Jednotlivé vzdálenosti od bodu P jsou zobrazeny na obrázku. Změřených hodnot bylo opět více a výslednou hodnotou byl jejich průměr.

Změřené hodnoty jsou tedy následující: vzdálenost přijímače od bodu A byla změřena jako 1,87 m, vzdálenost od bodu B byla 1,76 m, vzdálenost od bodu C byla 2,07 m a vzdálenost od bodu D byla 2,05 m.

Na základě těchto hodnot pak byly sestaveny rovnice kružnic se středem v jednotlivých bodech vysílačů a s poloměrem rovným změřené vzdálenosti od bodu P:

$$\begin{aligned}
\text{A: } & x^2 + y^2 - 3,5 = 0 \\
\text{B: } & x^2 + y^2 - 5x + 3,1 = 0 \\
\text{C: } & x^2 + y^2 - 5x - 6,2y + 11,45 = 0 \\
\text{D: } & x^2 + y^2 - 6,2y + 5,4 = 0
\end{aligned}
\tag{18}$$

Hledaný bod P by se měl nyní nacházet v průsečíku těchto kružnic, který by měl být v ideálním případě v jednom bodě. Nám díky nepřesnostem během měření a zaokrouhlování při výpočtech vzniknou 4 průsečíky jednotlivých dvojic kružnic a výsledný bod se pak bude vyskytovat mezi nimi.

Průsečíky jednotlivých kružnic vyšly v bodech: $P_1[1,32;1,33]$, $P_2[1,34;1,35]$, $P_3[1,21;1,44]$ a $P_4[1,2;1,43]$. Přesná poloha přijímače se tedy nachází mezi těmito souřadnicemi. Jelikož se jedná o oblast s rozměry přibližně 10x10 cm, můžeme říci, že cricket se svou velikostí vejde přesně do středu. Pokud bychom chtěli být přesní a použít přesný bod pro porovnání s naměřenou hodnotou, dá se střed přijímače označit bodem $P[1,27;1,38]$.

Srovnáme-li tedy skutečné souřadnice přijímače a jeho změřené a vypočítané souřadnice, zjistíme, že se změřená vzdálenost od té reálné liší o 8 cm. Tyto odchylky lze tedy vzhledem ke vzdálenostem jednotlivých uzlů a vzhledem k velikosti cricketů označit za velmi malé, až zanedbatelné, a měření tak lze označit za přesné.

4.6 Měření vzdálenosti pomocí IRIS modulů

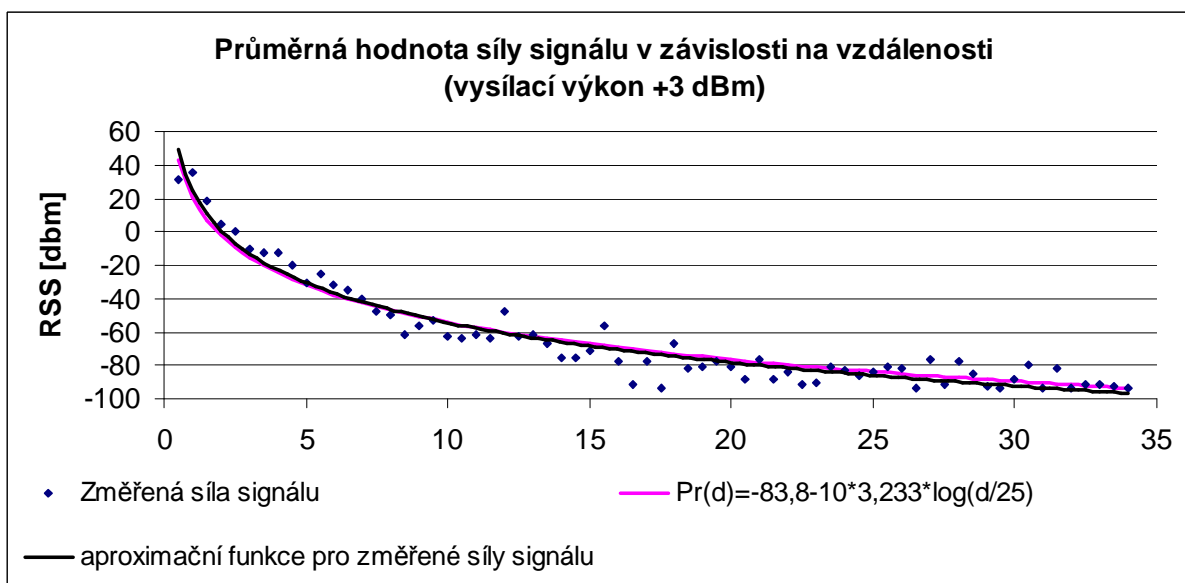
První měření pomocí uzlů IRIS bylo provedeno na volném prostranství a ve větší vzdálenosti od obydlených míst, kde je menší pravděpodobnost výskytu bezdrátových wifi sítí. Ty by mohly mít za následek silné rušení, protože IRIS moduly pracují podobně jako wifi síť na frekvenci 2,4 GHz.

Měření jsme prováděli jak s maximálním, tak s minimálním vysílacím výkonem a to od vzdálenosti 0,5 metru, až po maximální možnou vzdálenost s krokem 0,5 metru. Ta dosahovala při minimálním výkonu 5 metrů a při maximálním vysílacím výkonu 34 metrů. Hodnoty v grafech jsou průměrem 20 měření a tím je minimalizována RSS nejistota a náhodné interference.

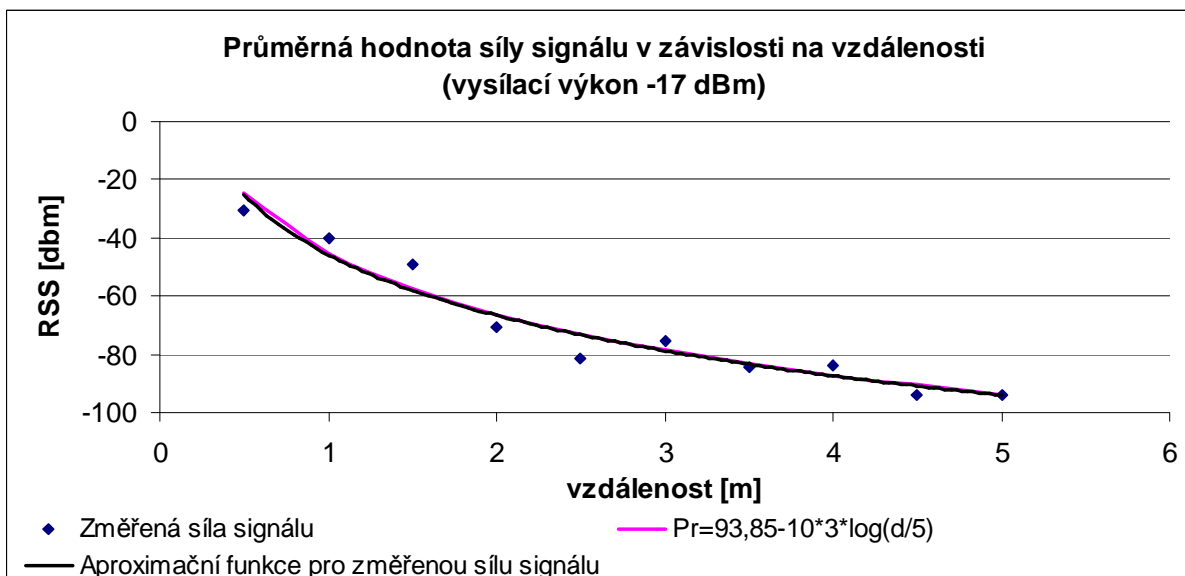
Nevýhoda při měření vzdálenosti pomocí IRIS modulů je v tom, že na výstupu není uvedena přímo vzdálenost, jak tomu bylo u cricketů, ale je zde pouze tzv. RSSI (received signal strength index), který je nutné následně přepočítat na skutečnou sílu signálu uváděnou

v dBm [12]. Z této hodnoty je teprve možné vypočítat přibližnou vzdálenost mezi uzly. K tomu však ještě potřebujeme znát tzv. referenční vzdálenost a sílu signálu v této vzdálenosti a rádiový útlumový činitel η . [4]

Referenční vzdálenost se určuje většinou experimentálně a je rovna hodnotě, při které se odhadnutý model nejvíce podobá modelu změřenému [9]. To je v našem případě vzdálenost 25 metrů pro vysílací výkon +3 dBm a pro vysílací výkon -17 dBm je tato vzdálenost rovna 5 metrům.



obr. 19: Síla signálu změřená pomocí IRIS modulů v nezarušeném prostředí s nastaveným vysílacím výkonem +3 dBm

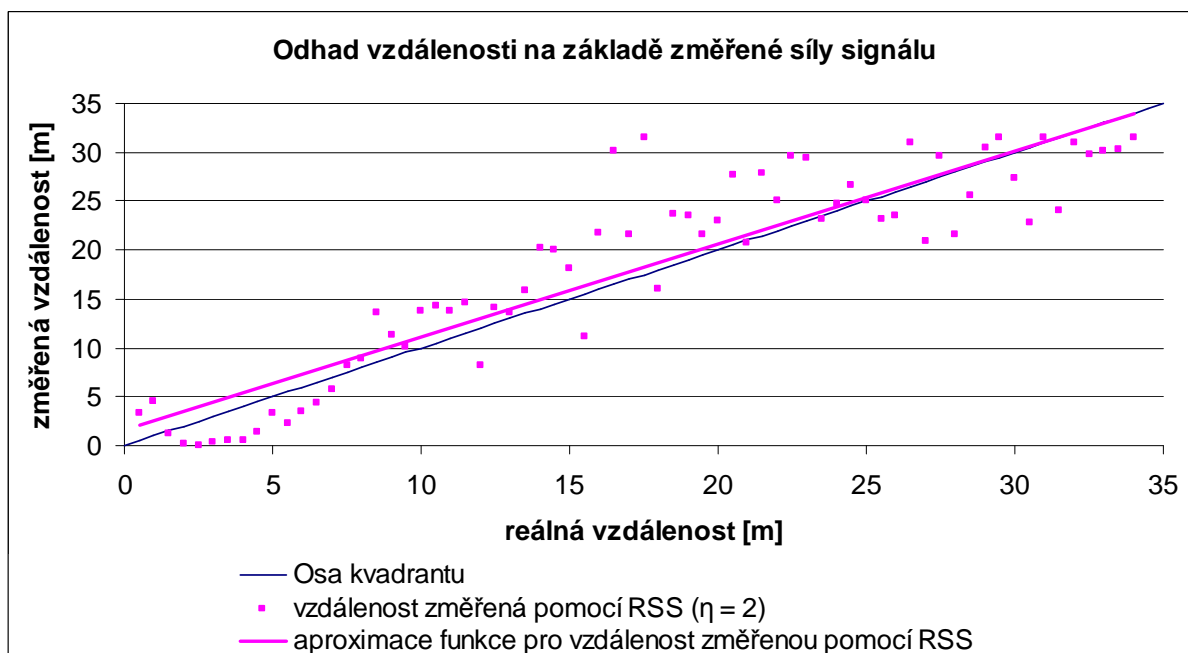


obr. 20: Síla signálu změřená pomocí IRIS modulů v nezarušeném prostředí s nastaveným vysílacím výkonem -17 dBm

Jak je vidět na grafech na obr. 19 a 20, je veliký rozdíl v dosahu při nastavení různého vysílacího výkonu. Zároveň je z grafů vidět, že síla signálu kolísá kolem ideálního průběhu, který je zobrazen černou souvislou čarou. Největší výkyvy byly zaznamenány mezi vzdálenostmi 15 - 20 metrů. Tyto výkyvy jsou způsobeny s největší pravděpodobností díky odrazům od země a okolních předmětů nebo slabým rušením wifi či jiných rádiových signálů, kterými je dnes protkána celá republika, a které byly pravděpodobně přítomny i během měření.

Z naměřených hodnot je však možné zjistit i přesnější útlumový činitel. Pokud dosadíme do rovnice (7) hodnoty referenční i odhadované vzdálenosti a příslušné síly signálů, jedinou proměnnou se stane námi hledaný útlumový činitel η (když zanedbáme X). Ten podle výpočtů nabývá hodnoty 3,23 pro nastavený vysílací výkon +3 dBm a pro vysílací výkon -17 dBm je roven 3. Křivka zobrazující rádiový model signálu po výpočtu útlumového činitele je v grafech zobrazena růžovou barvou.

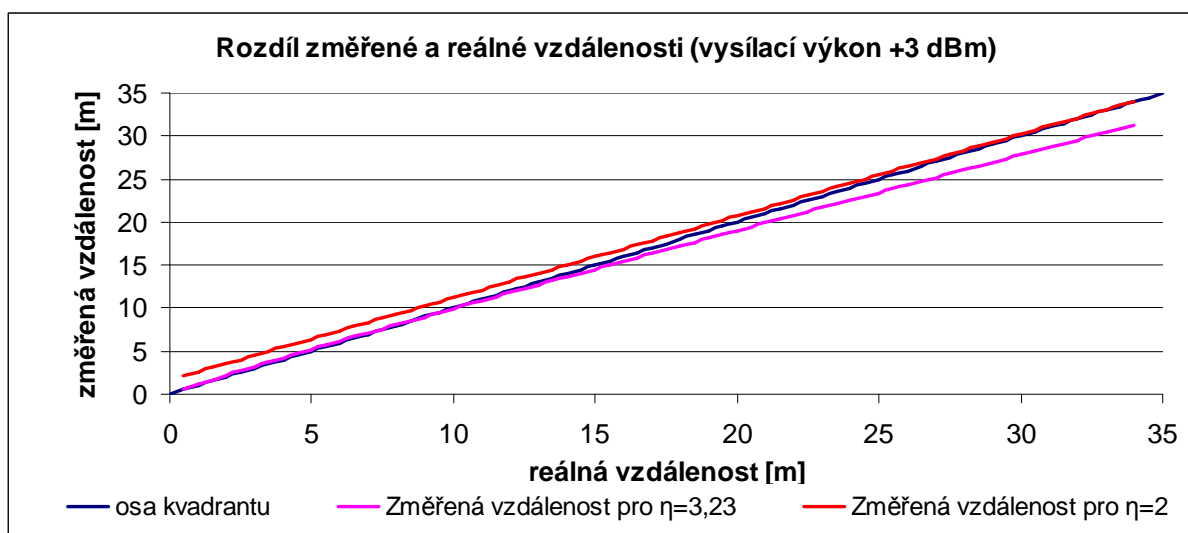
Z výsledků síly signálu v jednotlivých vzdálenostech při výkonu +3dBm byly vypočteny pomocí rovnice (8) hodnoty pro vzdálenost mezi uzly. Jako referenční vzdálenost při měření s nastaveným maximálním vysílacím výkonem bylo určeno 25 metrů. V této vzdálenosti je rozdíl hodnot reálné a změřené síly signálu nejmenší. Síla signálu v této vzdálenosti byla rovna -83,8 dBm. Rádiový útlumový činitel η ve volném venkovním prostředí bez překážek je dle literatury roven 2 [9]. Výsledky odhadu vzdálenosti pro tento útlumový činitel jsou zobrazeny v následujícím grafu.



obr. 21: Odhad vzdálenosti na základě změřené síly signálu při nastaveném maximálním vysílacím výkonu, pro útlumový činitel $\eta = 2$

Z výsledného grafu je patrné, že výchyly od reálné vzdálenosti jsou poměrně značné a jen v několika málo bodech se reálná a změřená hodnota shodují. Největší odchylka je ve vzdálenosti 17,5 metru, kdy se reálná a změřená vzdálenost liší o 14 metrů, což je o 80% více oproti reálné vzdálenosti. Po proložení změřených výsledků aproximační křivkou je vidět, že v globálním měřítku je měření poměrně přesné, avšak je-li potřeba znát jednu konkrétní hodnotu, je tato metoda velmi nepřesná a lze ji tedy doporučit pouze k orientačním odhadům vzdálenosti, kdy nám nevadí odchylka kolem několika metrů.

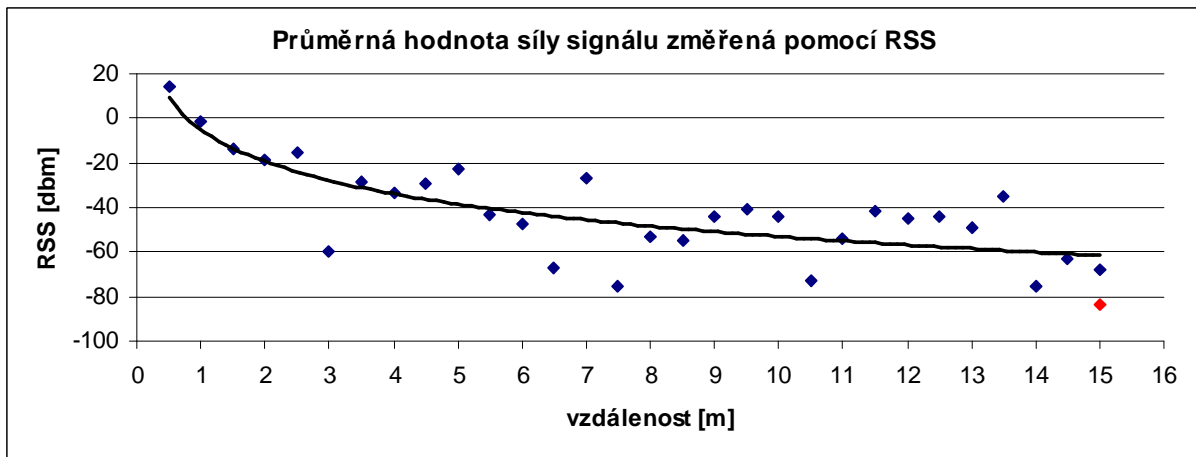
Následující graf již zohledňuje vypočítaný rádiový útlumový činitel (3,23) a zobrazuje tak rozdíl mezi reálnou a změřenou vzdáleností. Pro srovnání je zde uvedena i křivka zobrazující rádiový útlumový činitel $\eta = 2$.



obr. 22: Rozdíl reálné a změřené vzdálenosti pomocí RSS při útlumovém činiteli $\eta = 2$ a $\eta = 3,23$

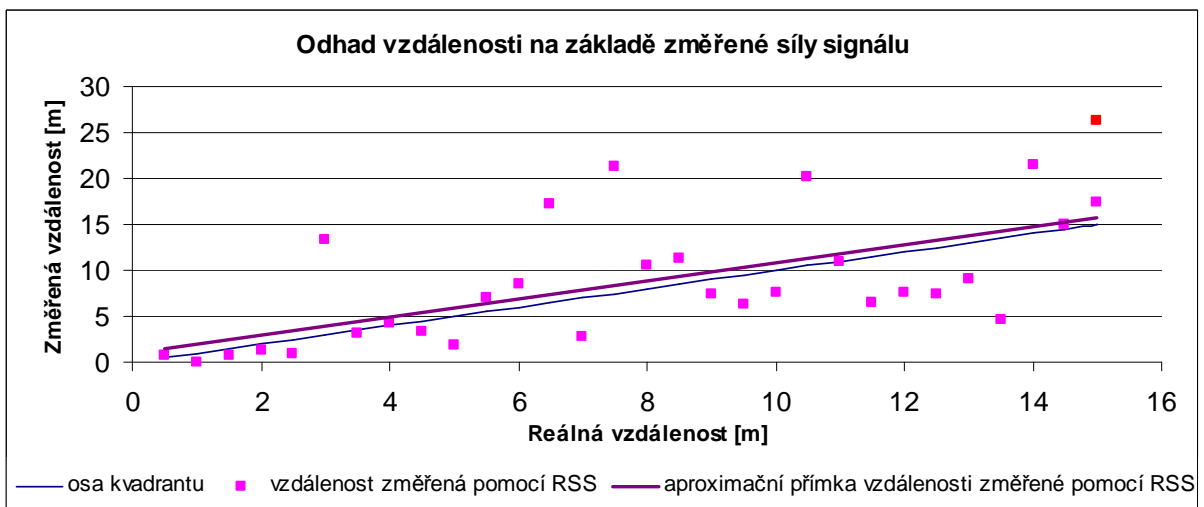
Z grafu je vidět, že výsledná vzdálenost je poměrně hodně přesná, a větších nepřesností dosahuje až při vzdálenostech větších než 15 – 20 metrů. Dále je z grafu vidět, že pro menší vzdálenosti (kolem 18 metrů) je k reálné vzdálenosti blíže křivka pro námi vypočtený útlumový činitel ($\eta = 3,23$) a pro větší vzdálenosti je naopak přesnější útlumový činitel podle [9] ($\eta = 2$). Bohužel se ale jedná pouze o aproximované průběhy.

V další části měření se tedy zaměříme na určení vzdálenosti, kdy je měření ovlivněno okolním rušením v městech a obcích, zejména tedy wifi sítěmi. Měření tentokrát dosahovalo pouze do vzdálenosti 15 metrů. Delší rovný úsek s přímou viditelností nebyl k dispozici a jakákoli jiná překážka by měření zkreslila ještě více. Výsledný graf porovnáme s grafem na obr. 19 zobrazující sílu signálu v nezarušeném prostředí a zaměříme se jak na velikost síly signálu, tak i na velikost jednotlivých odchylek od výsledné aproximované funkce a celkovou přesnost tohoto měření.



obr. 23: Síla signálu změřená pomocí IRIS modulů v prostředí zarušeném wifi sítěmi

Z grafu je vidět, že změřené hodnoty se od těch teoretických liší mnohem více, než při měření v prostředí, kde se nevyskytovaly žádné wifi sítě. Zajímavá je i hodnota změřená ve vzdálenosti 15 metrů. Zde byla provedena dvě nezávislá měření v časovém intervalu přibližně 1 minuty (hodnota druhého měření je zobrazena červenou barvou). Jak je vidět výsledek měření je o téměř 20 dBm rozdílný.

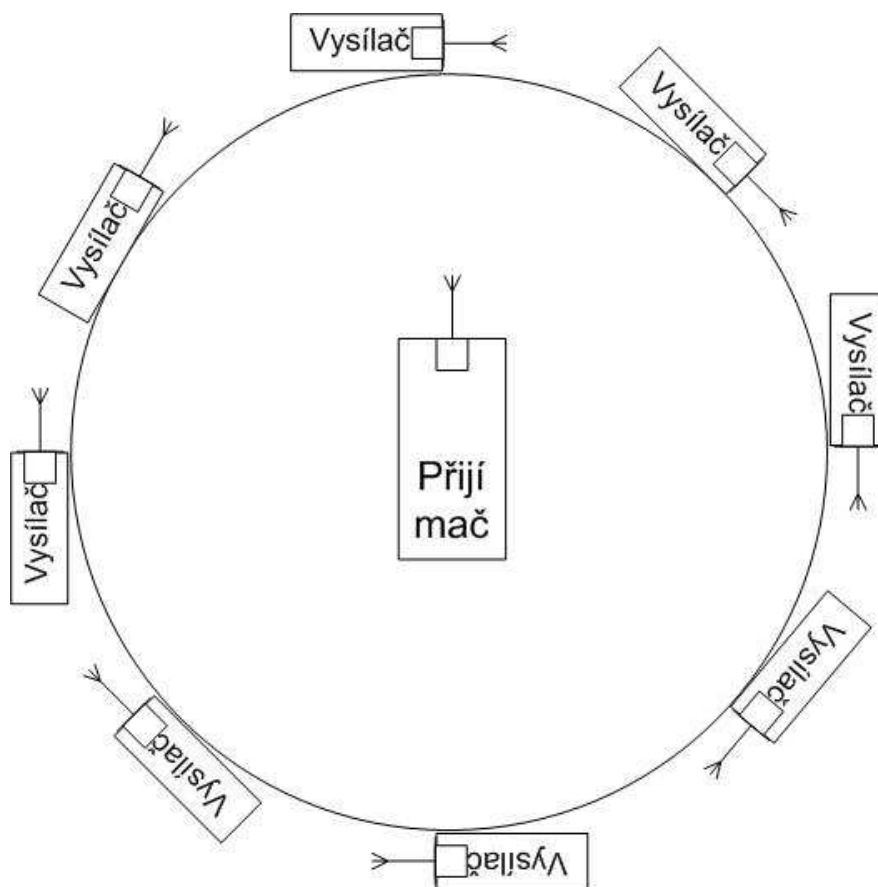


obr. 24: Odhad vzdálenosti na základě změřené síly signálu v zarušeném prostředí

Zde je vidět, že nebyť aproximované přímky, která v podstatě kopíruje reálnou vzdálenost, bylo by celé měření nic neříkající. Na kratší vzdálenost se sice reálná a změřená vzdálenost téměř shodují, ale od 2 metrů již odchylky narůstají a jen málo hodnot se reálné vzdálenosti přiblížilo. Největší odchylka je ve vzdálenosti 7,5 metru, kdy by uzel podle odhadu měl být ještě o 14 metrů dál, což představuje odchylku 285%. A zaměříme-li se opět na hodnoty ve vzdálenosti 15-ti metrů, tak jedna z nich se sice reálné hodnotě přiblížila, druhá je však o 11 metrů větší. A kdybychom neznali reálnou vzdálenost, jen těžko bychom poznali, která z hodnot je věrohodnější. V takovémto prostředí je tedy měření pomocí RSS nepřesné.

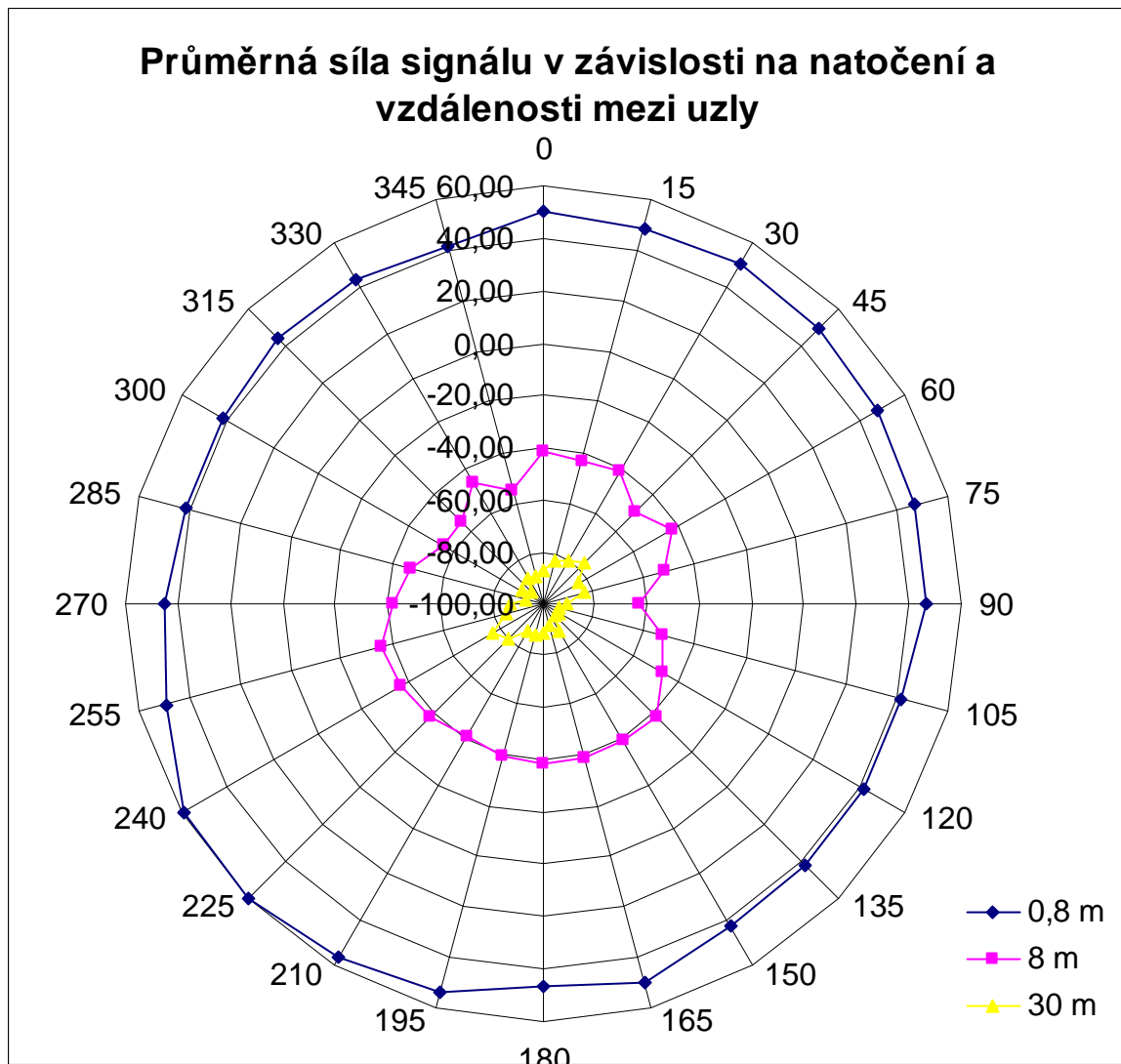
4.7 Měření směrovosti IRIS modulů

Při měření s cricketsy jsme zjistili, že jsou poměrně náchylné na natočení díky své hardwarové konstrukci, a je tedy třeba dbát na jejich správnou instalaci. Nyní se tedy pokusíme zjistit, zda IRIS moduly trpí podobnými problémy nebo jsou na natočení nezávislé. Během tohoto experimentu jsme měřili obdobným způsobem jako s cricketsy. Umístili jsme tedy jeden uzel do středu kružnice a po jejím obvodu jsme postupně umisťovali druhý uzel, opět s krokem 15°. Pro lepší orientaci opět slouží následující náskres.



obr. 25: Náskres měření směrovosti IRIS modulů

Měření probíhalo ve vzdálenosti 0,8 m, 8 m a 30 m na volném prostranství za minimálního rušení okolními vlivy. Předpokladem bylo, že by se síla přijatého signálu neměla příliš měnit. IRIS moduly jsou totiž vybaveny všesměrovou anténou, kterou je možné natočit tak, aby byla vlastním modulem stíněna jen minimálně. Očekává se tak, že IRIS moduly budou vůči natočení zcela inertní a síla přijatého signálu by se neměla s měnícím se směrem příjmu signálu příliš měnit.



obr. 26: Síla signálu v závislosti na natočení IRIS modulu

Jak je z grafu vidět, předpoklady se zcela nevyplnily, ale v porovnání s crickety není pro IRIS moduly natočení takový problém. Při měření na vzdálenost 0,8 metru se síla signálu téměř nezměnila, při měření na vzdálenost 8 metrů již síla signálu v určitých úhlech kolísala a maximální rozdíl 20 dBm již není zanedbatelný. Tyto výchyly mohou být způsobeny zakrytím antény sensorovou deskou umístěnou během měření na uzlu právě ve směru přicházejícího signálu a tedy opět hardwarovou konstrukcí. Nedošlo zde však na rozdíl od cricketů k úplné ztrátě signálu.

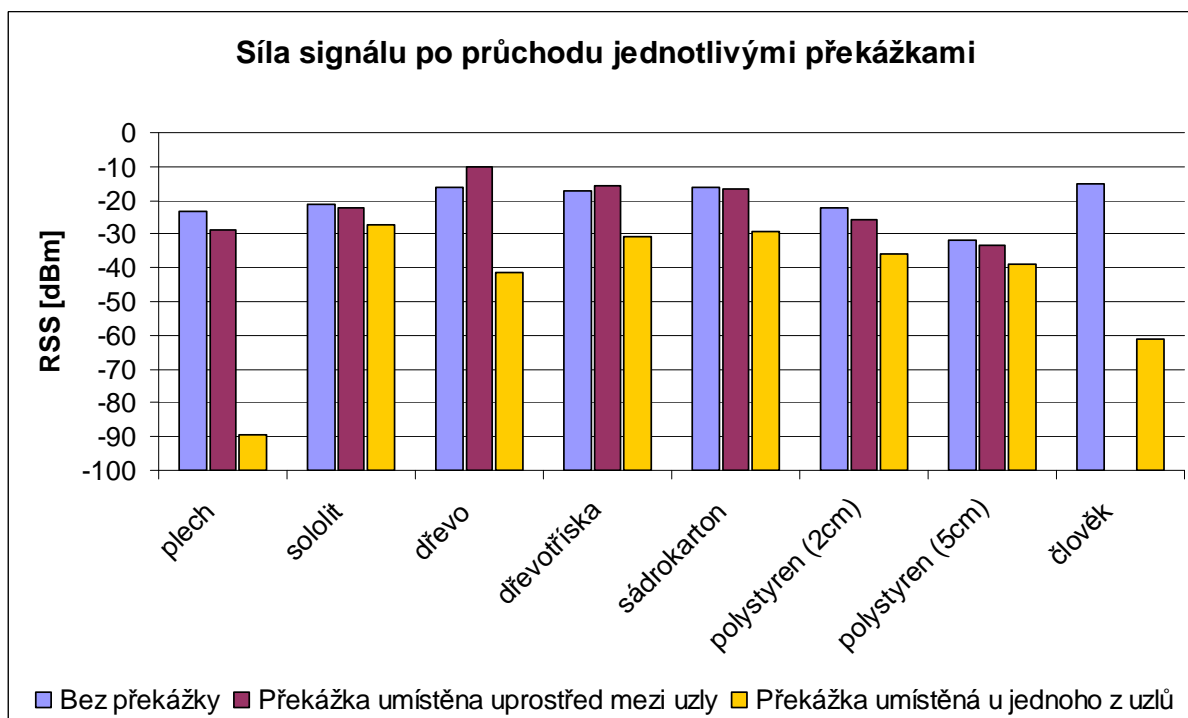
Při měření na vzdálenost 30 metrů je vidět, že tvarem je výsledný graf velmi podobný grafu ze vzdálenosti 8 metrů, a tím teorii o hardwarové konstrukci jen potvrzuje. Z tohoto měření tedy vyplývá, že i při použití IRIS modulů je třeba dbát na správnou instalaci a natočení modulů (zejména z hlediska zakrytí antény vlastní konstrukcí sensorového uzlu), chyby při špatné instalaci však nemají tak zásadní vliv jako u cricketů.

4.8 Měření přes překážky

Při použití IRIS modulů v reálném světě se nevyhneme kromě rušení rádiovými signály ani různým překážkám. V tomto experimentu jsme se tedy zaměřili právě na průchod signálu různými překážkami, na které můžeme v reálném životě narazit.

Měření bylo realizováno na louce za minimálního rušení rádiovými signály, aby jimi měření nemohlo být příliš ovlivněno, a výsledky nebyly příliš zkresleny. Vzdálenost mezi uzly byla 3 metry a byly umístěny přibližně 2 metry nad zemí. Měření probíhalo tak, že nejprve byla změřena síla signálu mezi uzly bez přítomnosti jakékoli překážky, následně byla překážka umístěna přibližně doprostřed mezi oba uzly a opět byla změřena síla signálu. Nakonec byla překážka umístěna přibližně 20 cm od vysílacího uzlu a znovu byla změřena síla signálu.

Hodnoty v grafech jsou opět průměrem 20 měření, jak tomu bylo i u předchozích měření. Výsledek měření je zobrazen na následujícím grafu.



obr. 27: Výsledky měření síly signálu po průchodu přes jednotlivé překážky

Modré sloupce představují hodnoty síly signálu změřené na přímou viditelnost, tedy bez jakékoli překážky mezi uzly. Fialové sloupce zobrazují sílu signálu po průchodu překážkou, která byla umístěna uprostřed mezi uzly, a žluté sloupce představují hodnoty síly signálu, byla-li překážka u jednoho z uzlů. U posledního měření, kdy byl mezi oba vysílače umístěn

člověk, se nepodařilo jej umístit doprostřed mezi oba uzly, ale pouze do blízkosti uzlu vysílajícího, a proto toto měření chybí.

Z grafu je tedy patrné, že byla-li překážka umístěna uprostřed mezi uzly, síla signálu příliš neklesla a v případě dřeva či dřevotřísky dokonce stoupla. Při tomto rozestavení došlo tedy patrně k odrazu signálu od země či okolních objektů nebo došlo k ohybu signálu, a následné konstruktivní interferenci. Výsledná síla signálu se tedy od síly přímého signálu příliš neliší.

Jinak je tomu v případě, že překážka byla umístěna v blízkosti jednoho z uzlů, čímž se minimalizoval vliv odrazů a ohybů a výsledná síla signálu tedy odpovídá síle signálu po průchodu skrz překážku. Největší útlum měla podle předpokladu plechová deska, která signál téměř zcela utlumila. Během měření docházelo dokonce k výpadkům. Poměrně velký útlum má i lidské tělo. Dřevěná deska signál sice také dost pohltila, ale vezmeme-li v úvahu tloušťku (přibližně 4 cm), která je větší než ostatní srovnávané desky, nebyl útlum výrazně větší oproti ostatním překážkám. Překážky tedy nejsou pro IRIS moduly tak velký problém jako pro crickety, u kterých signál neprošel ani skrz papír.

4.9 Propagační model v několika směrech

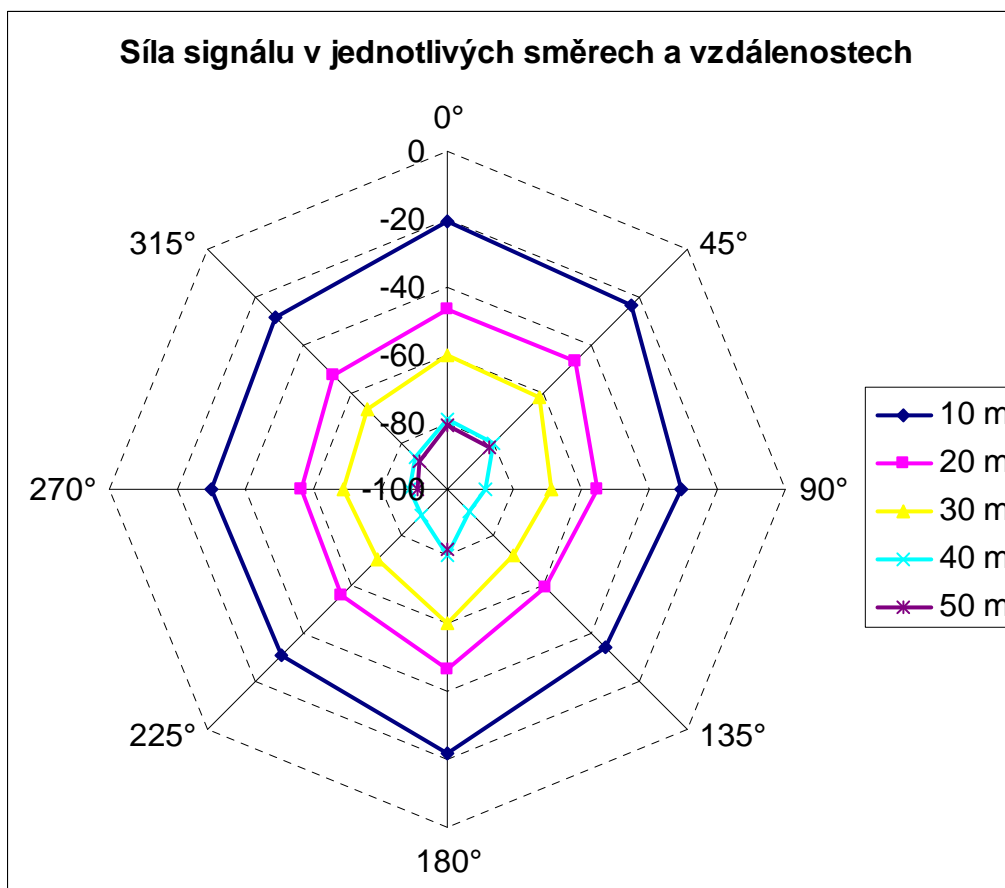
V uvažovaných scénářích jsme zjišťovali směrovost měření na několika vzdálenostech kolem dokola. Toto měření se zaměřovalo na natočení antén a v podstatě ukázalo ne příliš velkou důležitost v případě IRIS uzlů.

V následujícím měření se tedy pokusíme změřit sílu signálu od 0,5 m do maximální vzdálenosti v osmi různých směrech, abychom zjistili, jak se mění rádiový kanál v různém směru. Měření tedy bude probíhat tak, že jeden uzel bude umístěn napevno (střed pomyslného kruhu) a druhý uzel bude postupně umisťován v jednotlivých vzdálenostech a směrech od pevného uzlu.

Toto měření bude probíhat jak ve volném prostoru, kde by se hodnoty síly signálu s měnícím se směrem neměly příliš měnit, tak i v uzavřeném prostoru, kde by se mělo projevit rozmístění stěn a různých předmětů, rozmístěných v měřeném prostoru. Výsledné hodnoty měření jsou opět průměrem 20-ti hodnot změřených v příslušném směru a vzdálenosti.

Při měření ve volném prostoru se nám maximální vzdálenost zvětšila z dříve naměřených 34 metrů na 56 metrů. Důvod k takovému nárůstu dosahované vzdálenosti patrně spočívá v umístění uzlů ve větší výšce během měření. Kvůli vyšší travě jsme uzly umístili do výšky přibližně 1 metru nad okolní terén. Při předchozím měření byla výška přibližně 0,5 metru.

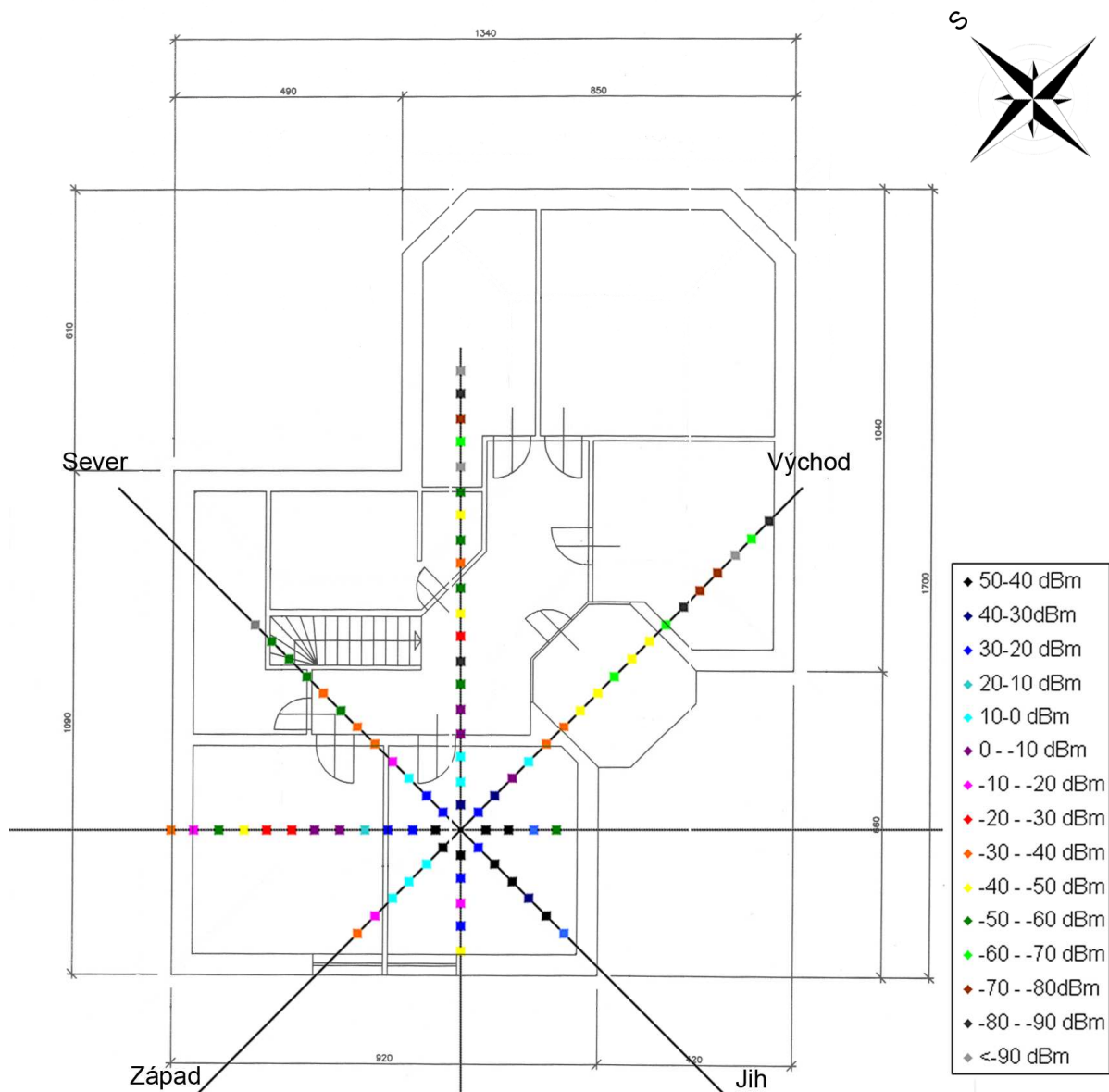
Docházelo tak pravděpodobně k menším odrazům od země a tím pádem i k menším destruktivním interferencím a tím i k větší síle signálu. Nejmenší vzdálenost během tohoto měření byla 49 metrů a to při úhlu 135° od směru prvního měření, kde byla maximální vzdálenost 56 metrů, což je pokles o 12,5%.



obr. 28: Síla signálu změřená při měření ve volném prostoru v různých směrech

Z výsledného grafu, který pro přehlednost zobrazuje pouze hodnoty změřené ve vzdálenostech po 10 metrech, je vidět, že ve volném prostoru má směr na výslednou sílu signálu jen minimální vliv. Námi vypočtený útlumový činitel pro jednotlivé směry se pohyboval v rozmezí od 3,12 do 3,2.

Daleko zajímavější bylo měření v uzavřeném prostoru. Bohužel se nepodařilo najít prostor, který by byl dostatečně velký na to, aby bylo možné kolem pevného uzlu udělat dostatečně velký kruh, kde by se dala zjistit maximální měřitelná vzdálenost. Z tohoto důvodu nebyl střed pomyslného kruhu umístěn uprostřed objektu, ale tak, aby alespoň v jednom směru bylo dostatek prostoru, k dosažení maximální vzdálenosti. V ostatních směrech bylo měření prováděno až k obvodové zdi. Středový uzel byl tedy umístěn přibližně uprostřed pokoje umístěného na okraji objektu. Návrh objektu, směry měření a příslušné síly signálu jsou zobrazeny na následujícím obrázku.

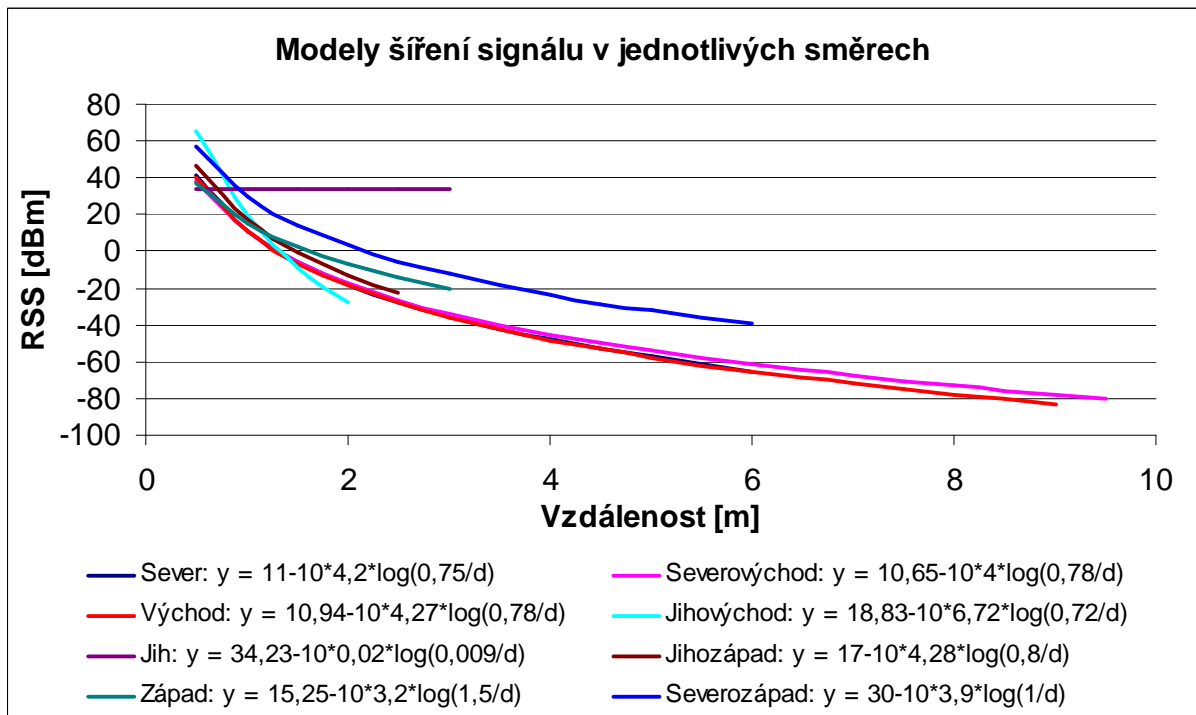


obr. 29: Propagační model rádiového signálu v uzavřeném prostoru

Největší vzdálenost byla naměřena směrem na severovýchod a dosahovala 9,5 metrů. V místnosti orientované na sever, která slouží jako skladiště, bylo uloženo mnoho kovových předmětů a proto byl útlum signálu natolik veliký, že zde maximální vzdálenost dosáhla pouze k 6 metrům.

Další zajímavostí zpozorovanou již během měření bylo, že při umístění uzlu ke zdi na vzdálenost přibližně 0,5 metru se signál zesílil. Došlo tak nejspíše k odrazu signálu od zdi a následná konstruktivní interference signál zesílila.

Z tohoto měření je tedy zřejmé, že rozmístění překážek se na síle signálu značně projeví a to zesílením signálu před zdí, a následným útlumem signálu za zdí. Je tedy vhodné mít při měření uvnitř budov nákres budovy, a je i vhodné proměřit jednotlivé směry a vzdálenosti.



obr. 30: Modely šíření signálu v jednotlivých směrech při měření v uzavřeném prostoru

Graf na obr. 30 zobrazuje aproximované křivky síly signálu v jednotlivých směrech a příslušné rovnice, z nichž je možné vyčíst i rádiový útlumový činitel pro jednotlivé směry. Ten se ve většině případů pohybuje kolem 4. Výjimku tvoří měření směrem k jihu, kde je útlumový činitel roven 0,02. Toho je dosaženo díky tomu, že tímto směrem se nachází roh domu. Navíc měření bylo prováděno v podkroví a do tohoto rohu se svažuje střecha z obou směrů. V tomto místě tak docházelo k silným odrazům nejen od obou zdí, ale i od střechy a podlahy a výsledné interference tak způsobily zesílení signálu a v grafu se výsledná křivka jeví jako přímka. Podobný jev nastal i při měření ve směru na jihovýchod. Nejedná se sice o roh, ale střecha se zde rovněž svažuje a dochází tak k silnějším odrazům oproti okolí. Ostatní útlumové činitele již odpovídají předpokladům podle zdroje [9], kde by se hodnoty v uzavřeném prostoru měly pohybovat v rozmezí od 2,7 do 4,3.

5 Závěr

Bezdrátové sensorové sítě hrají v našem životě stále větší roli a jejich využití je možné téměř v jakémkoli oboru, kde se vyskytuje elektronika. Ta je v dnešní době téměř nepostradatelná. Určování vzdáleností mezi jednotlivými senzory je jedna z důležitých vlastností, bez kterých by bylo zavádění a instalace sensorových sítí velmi náročné. Výsledky měření sensorů jsou sice velmi důležité, kdybychom však nevěděli, kde se daný sensor nachází, nebyly by nám výsledky zdaleka tak užitečné, jako když víme, z jakého prostředí výsledky pocházejí. A pokud bychom museli u každého senzoru ručně zavádět do databáze jejich přesnou polohu, byla by jejich instalace daleko nákladnější, a jejich rozšíření by nebylo tak masivní.

Způsobů jak změřit vzdálenost a z toho následně určit, kde přesně se sensor nachází, jsme uvedli několik. Na otázku, která z nich je nejlepší, není jednoduché odpovědět. Záleží na prostředí, požadované přesnosti, finančních možnostech atd.

Metoda RSS je levnou záležitostí, protože není třeba investovat do přídatného hardwaru, neboť zařízení sama o sobě již měří sílu signálu. Problém nastává s přesností měření. Signály mohou být vystaveny různým rušivým vlivům, a jejich síla může klesat více, než jsme předpokládali.

Měření pomocí TOA je sice přesnější, na druhou stranu je však náročné dosáhnout synchronizace. Proto se využívá metody měření pomocí ultrazvuku, kdy je problém se synchronizací elegantně vyřešen pomocí rozdílu v čase příjmu rádiového a ultrazvukového signálu. Tím tvoří takový mezistupeň mezi metodou TOA a TDOA, která využívá rozdílu časů v příjmu signálů, ovšem vyslaných z různých uzlů sítě.

Metoda AOA je také poměrně přesná, nevýhodou je však potřeba přesného nastavení směru antén, díky kterému se pak pomocí síly signálu z jednotlivých úhlů měří, odkud signál přišel.

Ve druhé části práce jsme se metodami RSS a ultrazvuku věnovali podrobněji a provedli jsme několik měření jejich použitelnosti v reálném světě. Z našeho měření vyplývá, že určování jednotlivých vzdáleností pomocí sensorových uzlů Cricket je sice přesnější (odchyly se pohybovaly do 0,5 metru) a i odchyly se s rostoucí vzdáleností lineárně zvětšovaly, nevýhodou však je jejich dosah, kdy určení vzdálenosti větší jak 10 metrů bylo již poměrně problematické.

U IRIS modulů byla přesnost měření méně přesná a hlavní problém spočívá v tom, že se odchylky jednotlivých měření od reality neliší lineárně, ale pohybují se kolem předpokládané hodnoty, a to nejčastěji s odchylkou do 5 metrů. Největší odchylka byla dokonce 14 metrů. Z tohoto důvodu tedy není možné IRIS moduly příliš doporučit.

Porovnáme-li náchylnost na natočení byly sensorové uzly Cricket oproti IRIS modulům v nevýhodě. Už při vzdálenosti 4 metrů hrálo jejich nasměrování velkou roli. To klade samozřejmě daleko větší nároky na instalaci na rozdíl od IRIS modulů, které disponují všesměrovými anténami.

Co se týká použitelnosti obou zařízení za přítomnosti rušení či překážek, IRIS moduly mají velkou nevýhodu v tom, že jsou náchylné na rušení radiovými signály, zvláště na frekvencích kolem 2,4 GHz, protože ony samy tuto frekvenci využívají. Bohužel tato frekvence je využívána i dnes značně rozšířenými bezdrátovými sítěmi (např. wifi, bluetooth). Na druhou stranu, nejsou tak náchylné na různé překážky, jak je tomu u sensorových uzlů Cricket, kdy byl pro ultrazvukový signál problém projít sebemenší překážkou a šíření signálu bylo možné pouze pomocí dorazů. Radiový signál IRIS modulů sice při průchodu skrz překážku ztratí na síle, je však schopen projít. Je sice nutné následně provést korekci při výpočtu vzdálenosti, ale jinak lze IRIS modul použít.

Z tohoto všeho tedy vyplývá, že sensorové uzly Cricket jsou vhodnější, měříme-li vzdálenost na přímou viditelnost a do vzdálenosti přibližně 10 metrů. V praktickém využití je tedy lepší je použít k určování polohy objektů v uzavřeném prostoru (strop místností), kde by vzdálenost od potenciálního umístění pohyblivých uzlů neměla přesáhnout jejich dosah rovný přibližně 10 metrům. IRIS moduly by v tomto případě mohly být vystaveny nežádoucímu rušení bezdrátovými sítěmi.

IRIS moduly jsou naopak vhodnější pro použití na větší vzdálenosti. Je sice třeba provést různé korekce a přizpůsobení prostředí, ale měření je realizovatelné. Mohly by tak být použity při určování polohy sensorů na volném prostranství, kde dosah uzlů Cricket (10 metrů) nemusí dostačovat, a kde nemusí být zarušení bezdrátovými sítěmi tak velké. Využity by tak mohly být např. v zemědělství, při sledování teploty či vlhkosti vzduchu.

6 Seznam použité literatury

- [1] GUSTAVSSON, F.; GUNNARSON, F. *Positioning using time difference of arrival measurements* [online] [cit. 2010-10-11]. Dostupný z WWW: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.64.3068&rep=rep1&type=pdf>
- [2] HOLEŠINSKÝ, P. *Výzkum lokalizačních algoritmů pro bezdrátové senzorové sítě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 49 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Šimek.
- [3] JEČNÝ, T. *Lokalizace v sítích wlan* [online]. 2005 [cit. 2010-10-28]. Dostupný z WWW: http://radio.feld.cvut.cz/personal/mikulak/MK/MK05_semestralky/Lokalizace_v_s%edt%edch_WLANshort.pdf
- [4] MAO, G.; FIDAN, B.; ANDERSON B.D.O. *Wireless sensor network localization techniques* [online]. 2006 [cit. 2010-10-28]. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com>
- [5] PEKÁREK, J. *Lokalizace komunikačních uzlů v bezdrátových senzorových sítích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Šimek.
- [6] PENG, R.; SICHITIU M. L. *Angle of arrival localization for wireless sensor network* [online] [cit. 2010-10-11]. Dostupný z WWW: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.134.5991&rep=rep1&type=pdf>
- [7] ŠUNKEVIČ, M. *Trilaterace* [online] [cit. 2010-11-20] Dostupný z WWW: <http://www.czechspace.cz/cs/galileo/aktuality-GPS-Glonass/GNSS-urcovani-polohy/trilaterace>
- [8] VALIÁN P. *Lokalizace v bezdrátových sítích* [online] 2007 [cit. 2010-10-28]. Dostupný z WWW: http://radio.feld.cvut.cz/personal/mikulak/MK/MK07_semestralky/Lokalizace_v_bezdr_sitich.pdf
- [9] ŠIMEK, M. *Senzorové systémy přednášky do předmětu MSSY* [online] 2010/2011 [cit. 2011-4-5] Dostupný z WWW: <https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?id=115161>
- [10] CROSSBOW *Cricket v2 manual* [online]. 2005 [cit. 2010-12-10]. Dostupný z WWW: <http://cricket.csail.mit.edu/v2man.pdf>

- [11] CROSSBOW *MoteWorks Getting Started Guide* [online] 2007 [cit. 2011-4-20]. Dostupný z WWW: http://www.dcs1-uhcl.net/Anil/reference/MoteWorks_Getting_Started_Guide.pdf
- [12] ATMEL *RF230 datasheet* [online] 2009 [cit. 2011-4-25]. Dostupný z WWW: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc5131.pdf

Seznam zkratek

WSN – wireless sensor network
RSS – received signal strength
AOA – angle of arrival
TOA – time of arrival
TDOA – time difference of arrival
GPS – global positioning system
BTS – base transceiver system
CGI+TA – cell global identity + timing advance