

Mendelova univerzita v Brně
Provozně ekonomická fakulta

Metody určování polohy v uzavřených prostorech prostřednictvím technologie iBeacon

Bakalářská práce

Vedoucí práce:
Ing. David Procházka, Ph.D.

Jan Snopek

Brno 2015

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Davidu Procházkovi, Ph.D., jako vedoucímu mé práce, za ochotu a trpělivost, kterou mně věnoval. Dále bych chtěl poděkovat svým nejbližším za podporu v mém studiu a obzvláště při psaní této práce.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci: **Metody určování polohy v uzavřených prostorech prostřednictvím technologie iBeacon**

vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 Autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity o tom, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne 30. prosince 2015

.....

Abstract

This thesis compares indoor location methods with emphasis on iBeacon technology and its potential. In the review part of the thesis, basic technological properties are outlined. Further, a concept of application for indoor location is proposed. Finally, a set of experiments is described and the results are evaluated.

Keywords

Indoor, position, GPS, signal, iBeacon, Bluetooth

Abstrakt

Tato práce porovnává metody určování polohy uvnitř budov a zkoumá především technologii iBeacon a její možnosti. V práci jsou popsány základní vlastnosti této technologie. Dále je navržen koncept aplikace, která ji využívá, a jsou provedeny experimenty zkoumající její možnosti. Na závěr jsou vyhodnoceny výsledky experimentů.

Klíčová slova

Indoor, pozice, GPS, signál, iBeacon, vnitřní prostory, Bluetooth

Obsah

1	Úvod	11
2	Cíl práce	12
3	Rešerše technologií	13
3.1	Vysvětlení pojmů	13
3.2	Porovnání technologií	15
3.3	Současná řešení	16
3.4	Metody určení polohy v síti vysílačů	18
4	Metodika	23
5	Koncept experimentální aplikace	24
5.1	Popis aplikace vysílače	24
5.2	Popis aplikace přijímače	24
6	Určení vzdálenosti zařízení od vysílače	26
6.1	Výsledky ve volném prostoru	26
6.2	Výsledky v budově	28
6.3	Problémy při měření	29
7	Určení polohy s více vysílači	31
7.1	Určení polohy statického přijímače	31
7.2	Průchod polem vysílačů	33
8	Závěr	38
8.1	Návrh na další rozvoj	38
9	Reference	39
	Přílohy	42
A	Přílohy na CD	43

1 Úvod

Potřebu znát svoji polohu měli lidé již před naším letopočtem. Na tomto vědění mnohdy záležel jejich život. Museli se spoléhat především na někoho, kdo se v daném místě vyznal, nebo na znalost hvězdné oblohy.

V dnešním světě je situace stejná, jen se již můžeme opřít o moderní přístroje, metody a myšlenky. Například letecká doprava by bez spolehlivé navigace byla komplikovaná a méně bezpečná.

Určení pozice v otevřeném prostoru je velmi dobře řešeno satelitními navigačními systémy, zejména systémem GPS. Problém je však v uzavřených budovách. Zde je obvykle GPS signál poměrně slabý až nepoužitelný. Hledají se proto technologie jak toto omezení eliminovat. Rámcově tento problém řeší technologie označovaná jako asistovaná GPS (A-GPS). Ta kombinuje signál ze satelitů se signálem ze základových stanic mobilních vysíláčů, wi-fi hotspoty atp. Nicméně lokalizace založená na této technologii není zpravidla příliš přesná. Proto se hledají alternativní přístupy, které umožní přesnost zvýšit. Jednou z možností je využít technologie založené na rádiovém přenosu s krátkým dosahem mezi které patří například řešení *iBeacon* firmy *Apple*.

2 Cíl práce

Cílem této práce je porovnat přístupy pro zjišťování polohy uvnitř budov. Budou popsány technické vlastnosti, přednosti a omezení jednotlivých postupů. Následně bude vytvořen projekt využívající vybranou technologii a provedeno praktické měření. V závěru budou výsledky porovnány s teoretickými předpoklady a budou navrhována možná rozšíření.

3 Rešerše technologií

Pro zaměření polohy uvnitř budov nejde použít, dnes již konvenční, družicové systémy. Jejich signál totiž není dostatečně silný, aby prošel zdmi. Proto se využívají systémy, které fungují uvnitř budov, za cenu menšího dosahu signálu.

Tento přístup využívá principu znalosti vlastností signálu při šíření prostorem a dodatečných informací, které zdroj signálu vysílá.

3.1 Vysvětlení pojmů

WSN

WSN (*Wireless Sensor Networks*, bezdrátová senzorová síť) je složena z prostoro-
vě rozmístěných autonomních senzorových uzlů, vybavených radiovým vysílačem
a přijímačem. Systémy tvořené pro zjišťování polohy objektů uvnitř budov jsou kla-
sifikovány podle technologie, metriky měření a procesní metody. (Blumrosen et al.,
2013)

RSSI

RSSI (*Received Signal Strength Indicator*, indikátor síly přijatého signálu) může být
využíván jako základ v WSN postavené na rádiové technologii. RSSI je měření síly
signálu na rádiové lince a může být použito pro zaměření polohy, zjištění přenosové
kvality a kontrole výkonu. (Andersen, Rapparot a Yoshida, 1995; Blumrosen et al.,
2013)

Systém postavený na bázi RSSI je obvykle složen z několika mobilních zařízení
a skupiny statických zařízení, uvedené jako ukotvené zařízení. (Blumrosen et al.,
2013)

Je možné určit hrubou vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem použitím získané
síly signálu u přijímače pomocí vztahu:

$$P_R = P_0 - 10\gamma \log d \quad (1)$$

kde P_R je naměřená síla signálu

P_0 je síla signálu na vzdálenost 1 m od vysílače

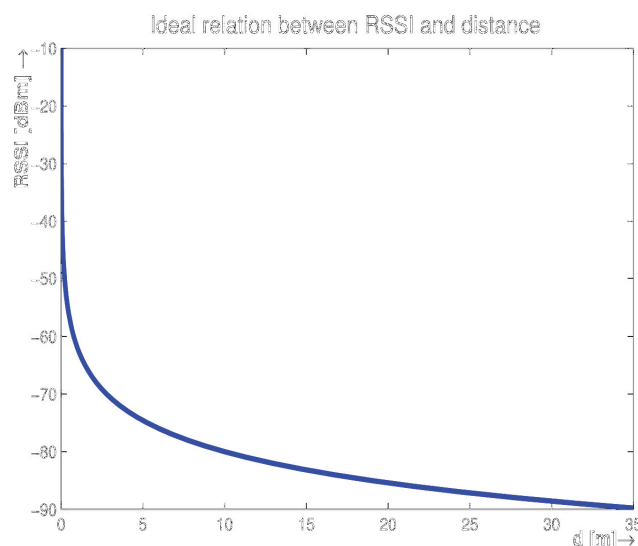
d je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem v metrech

γ je koeficient úbytku síly signálu

γ závisí na charakteristice propagování přijatého signálu. (Sen et al., 2013)

Mnohocestnost

V prostředí uvnitř budov se signál typicky šíří od vysílače k přijímači několika
cestami. Každá cesta přispívá k různým zpožděním, oslabení a posunutí fáze signálu.
Proto je přijatý signál kombinací několika verzí původního signálu. (Sen et al., 2013)



Obrázek 1: Ideální průběh závislosti hodnoty RSSI a vzdálenosti
Zdroj: Botta a Simek, 2013

Bluetooth Low Energy

Malá komplexita specifikace *Bluetooth Low Energy* (BLE) byla navržena pro velmi nízké napájecí nároky. Pro dosažení dlouhé životnosti baterie mají BLE zařízení nižší špičkový odběr a jsou schopny připojit se k ostatním zařízením mnohem rychleji. Dotazovací a vysílací stavy *Bluetooth Low Energy* byly nahrazeny inzertním (propagačním) stavem, který je zároveň spojovací. (Sommer et al., 2011)

iBeacon

iBeacon je nová technologie, která rozšiřuje polohové služby systému *iOS*. *iOS* zařízení může upozornit aplikace, když vstoupí do prostoru s *iBeacon*, nebo jej opustí. Navíc k monitorování pozice aplikace může určit vzdálenost od *iBeacon* zařízení. K definování polohy používá *iBeacon* namísto zeměpisné šířky a délky BLE signál, který *iOS* zařízení dokáže detekovat. (Apple, 2014)

iBeacon vysílače poskytují cestu k vytváření a monitorování signálů které poskytují určité informace za použití technologie BLE. Signál z BLE poskytuje stejné UUID z oblasti určené signálem, který dokáže vaše aplikace monitorovat skrz podporu monitorování prostoru v *Core Location*. Signály se stejným UUID mohou být rozlišeny pomocí dodatečných informací, které poskytují. Dokud je signál v dosahu uživatelského zařízení, aplikace na nich můžou také monitorovat relativní vzdálenost od zdroje signálu.

UUID a doplňující informace

UUID (*Universally Unique Identifier*, univerzální jedinečný identifikátor), též známý jako GUID (*Globally Unique Identifier*, globálně jedinečný identifikátor) je 128 bitová hodnota. Standardní formát pro UUID je reprezentován jako text v ASCII oddělený pomlčkami, například 68753A44-4D6F-1226-9C60-0050E4C00067. Dále signál poskytuje hodnotu *major* a *minor*. Obě hodnoty jsou nepovinné, mají velikost 2 bity, jsou celočíselného formátu a dále rozlišují region identifikovaný pomocí UUID na další sub-regiony. V případě použití i *minor* hodnoty, bude region rozdělen prvně podle *major* a v případě shody ještě rozdělen podle *minor*. (Apple, 2013)

Rádiová nepravidelnost

Rádiová nepravidelnost je způsobena dvěma kategoriemi faktorů: zařízení a médium pro šíření signálu. Vlastnosti zařízení zahrnují typ antény (směrová, všesměrová), vysílací výkon, zisk antény (jak na vysílači, tak na přijímači) a práh rozlišení signálu od šumu (*Signal-Noise-Ratio*, SNR). Vlastnosti přenosového média zahrnují typ média, šum prostředí a dále faktory prostředí, jako je teplota a překážky uvnitř přenosového média.

Wi-Fi

Technologie bezdrátového přenosu dat označující standardy IEEE 802.11. V dnešním světě je toto nejpoužívanější technologie pro bezdrátovou komunikaci. Spotřeba energie u zařízení používající tuto technologii je poněkud vyšší než u BLE a proto není efektivní používat baterie pro provoz.

ZigBee

Podobně jako Wi-Fi je *ZigBee* technologie přenosu dat pod standardem IEEE 802.15.4. Využívá nízkoenergetický bezdrátový přenos dat na frekvenci 2.4 GHz. Rychlost přenosu dat dosahuje až 250kB/s.

3.2 Porovnání technologií

Systém pro určení polohy je složen ze dvou částí, a to vysílače signálu, který je statický, a přijímače s obslužnou aplikací. Je důležité, aby uživatel měl při využívání tohoto systému co největší komfort a nepotřeboval u sebe mít další zařízení. A proto se použitelnost spousty technologií sníží na ty, které máme téměř vždy u sebe – chytrý mobilní telefon, tablet a další multimediální zařízení, čili Wi-Fi a BLE.

Dostupnost této části systému není nutné příliš komentovat, neboť se jedná o zařízení, dostupnou ve většině státech světa s cenou od několika tisíc korun, až po desítky tisíc korun.

Cena součástek a licenčních poplatků pro část vysílače je u obou technologií natolik nízká, že téměř nic nebrání v implementaci obou typů. Ta se v době psaní této práce pohybuje okolo 20 USD za modul. Avšak není to jen pořizovací cena, která rozhoduje o použitelnosti. Dalším faktorem při výběru je suma peněz, které budeme muset investovat do provozu, tedy spotřeba jednotlivých zařízení. Tady vítězí BLE, kde komerční produkty slibují provoz na baterii až několik let (Estimote, 2012). To je obzvláště výhoda v situaci, kdy není možné přivést k zařízení jiný zdroj napájení.

V případě Wi-Fi obsahuje standard IEEE 802.11 k dnešnímu dni 8 jednotlivých specifikací, které mluví spíše v jeho neprospěch, protože je nutné, aby se použitím jedné konkrétní specifikace nevyloučila použitelnost zařízení, které nepodporují právě tuto specifikaci. Dále přichází problém s frekvenčním prostorem. Ten je již tak přeplněný Wi-Fi signálem, používaným pro počítačové sítě, že by nastávalo rušení, a k nelibosti uživatelů, zpomalení většiny, ne-li všech, okolních sítí. Dalo by se využít již stávající AP pro určení polohy, avšak bylo by nutné zajistit tyto AP proti změně polohy a přesně zaměřit jejich polohu. Přesnost určení polohy při použití Wi-Fi se pohybuje okolo 20–30 m avšak s dosahem až okolo 100 m. Navzdory tomu uvnitř budov je důležitější spíše přesnost, než dosah.

Standard pro *Bluetooth* technologii specifikuje tři výkonnostní třídy. První s dosahem okolo jednoho metru, druhou s dosahem 10 m a třetí s dosahem až 100 m. Každá třída má maximální povolený výkon, ze kterého se odvíjí i spotřeba energie. V mobilních zařízeních se využívá právě třetí třída se sníženým výkonem pro snížení energetických nároků.

3.3 Současná řešení

V současnosti existují různé systémy pro určení polohy. Zde si popíšeme několik přístupů.

GSM

V práci Otsasona a spol. (2002) byl použit signál GSM a tabulka otisků (viz strana č. 20). Myšlenka stojící za tímto přístupem spočívá ve využití značkování pomocí GSM základových stanic, jejichž signál je dostatečně silný na zachycení, avšak příliš slabý na přenos dat.

Pro vytvoření tabulky otisků byly použity signály ze šesti nejsilnějších signálů základových stanic v okolí. Navíc bylo využito až 29 různých GSM kanálů pro větší přesnost. Hodnoty signálů byly odečítány na šachovnicově rozdělené ploše s rozestupy 1.5 m.

Medián chyby určení polohy se pohyboval v rozmezí od 2.5 m do 5.4 m.

Výhodou tohoto přístupu je, že pro zjištění polohy, může být použito jakékoli zařízení využívající GSM technologii, velká plocha pokrytí a nízká energetická náročnost. Navzdory těmto pozitivům je potřeba vytvořit dostatečně přenos tabulku otisků a distribuovat ji do všech zařízení, které chtějí zjišťovat svoji polohu. Ta se

navíc může změnit v důsledku oprav, či modernizace základové stanice. V hustě zastavěném prostředí se navíc kvalita signálu podstatně snižuje.

ZigBee

Benkič a spol. (2008) využili technologie *ZigBee* a hodnot RSSI pro určování polohy zařízení. Cílem bylo porovnání naměřených hodnot RSSI převedených na vzdálenost s reálnou vzdáleností.

Byly využity bezdrátové nízkoenergetické moduly MRF24J40 značky *Microchip* a CC2420 značky *Texas Instruments*. Dále byl využit síťový analyzátor ZENA značky *Microchip*. Pro měření byl použit jeden vysílač a jeden přijímač. Měření probíhalo v chodbě 4 m široké, 5 m vysoké a 30 m dlouhé. Odečítání hodnot bylo prováděno v rozestupech od 0 m do 25 m mezi vysílačem a přijímačem. Pro zjištění co nejreálnějších hodnot neprobíhalo měření v bezrádiovém laboratorním prostředí, ale v běžné budově, kde se vyskytují zdroje rušení.

V závěru byly porovnány zjištěné hodnoty vzdáleností s reálnými a byla zjištěna odchylka v rozmezí od 0.5 m po 4 m. Následovalo doporučení, že hodnota RSSI není příliš vhodná pro přesné zjišťování vzdálenosti u technologie *ZigBee* kvůli velké odchylce.

Rádiový signál a ultrazvuk

Priyantha a jeho tým (2000) vytvořili systém *Cricket* pro určování polohy zařízení pomocí rádiového signálu a ultrazvuku. Důvod pro toto byl, že rádiový signál prostupuje prostředím nelineárně a často též nepředvídatelně uvnitř budov.

Jednotlivé prvky systému mezi sebou komunikují bezdrátovým signálem, který iniciuje odposlouchávání ultrazvukového signálu. Pro výpočet se poté používá jak hodnota RSSI přijatého rádiového signálu, tak časový rozdíl přijetí rádiového a ultrazvukového signálu, protože ultrazvukový signál se šíří mnohem pomaleji.

Výhoda tohoto přístupu spočívá ve velmi nízkých pořizovacích nákladech potřebného vybavení. Ovšem velkou nevýhodou je vysoká úroveň chyb, která se pohybovala okolo 20–25 %.

Infračervený paprsek

Firma *Hewlett-Packard* (Kindberg a Barton, 2001) vytvořila v rámci svého projektu *CoolTown* systém určování polohy pomocí infračerveného (IR) paprsku. Tento systém byl určený pouze pro orientační určení polohy. Princip spočíval v nasměrování zařízení na IR vysílač. Na základě přijatých informací (např. ID vysílače) zjistí aplikace v přijímači o jaký vysílač se jedná a vyhledá příslušný kontext. Takovéto zjištění informací již probíhá centralizovaně na serveru.

Výhodou je uživatelské soukromí, protože používá zmíněný systém jen pokud sám chce. Nevýhodou je nutnost interagovat se systémem, čili nasměrovat zařízení na vysílač. Dále také jen velmi nepřesná informace o poloze.

Bluetooth zařízení

González-Castaño a Garcia-Reinoso (2002) vytvořili systém pro poskytování polohy uživateli pouze pomocí *Bluetooth* zařízení.

Systém byl rozdělen na statické stanice (SN) a mobilní, uživatelské, stanice (UN). SN byly rozmístěny rovnoměrně v ploše do tvaru pravidelných šestiúhelníků s jednou Master stanicí (MN) v jejich středu. UN byl zde v pozici vysílače a SN v pozici přijímače i vysílače. UN periodicky vysílal signál k dosputným SN, které zjistily jeho adresu. Tento údaj, spolu s informací o příslušném SN, byl poslán do MN po nejkratší cestě skrz ostatní SN, kde byly provedeny veškeré výpočty a obsluha všech dalších akcí.

Určení polohy následně probíhalo pomocí znalosti kolik a které SN zachytily signál z UN. Přesnost tedy záležela na množství SN, rozestupech mezi nimi a vysílací třídou UN. Výhodou je jednoduchý systém, který velké možnosti pro rozšiřování pokraté plochy nejen pomocí SN, ale i MN. Nevýhodou je pouze přibližně určená poloha a rozporuplná ochrana soukromí uživatele, protože uživatel nemá naměřené a zpracované údaje o poloze a jeho zařízení pod svou kontrolou. Dále se může stát, že MN je přetížený z důsledku velkého množství zpracovávaných informací, což může vést k nepříjemným zpožděním.

3.4 Metody určení polohy v síti vysílačů

Pro určení polohy v prostoru je možno použít více různých přístupů. Některé vybrané si zde popíšeme.

Trilaterální triangulace

Pro určení polohy v prostoru je nutná znalost několika údajů. Ve dvourozměrném prostoru (2D) je pro přesné určení polohy potřeba tři vysílačů. (Obr. 2)

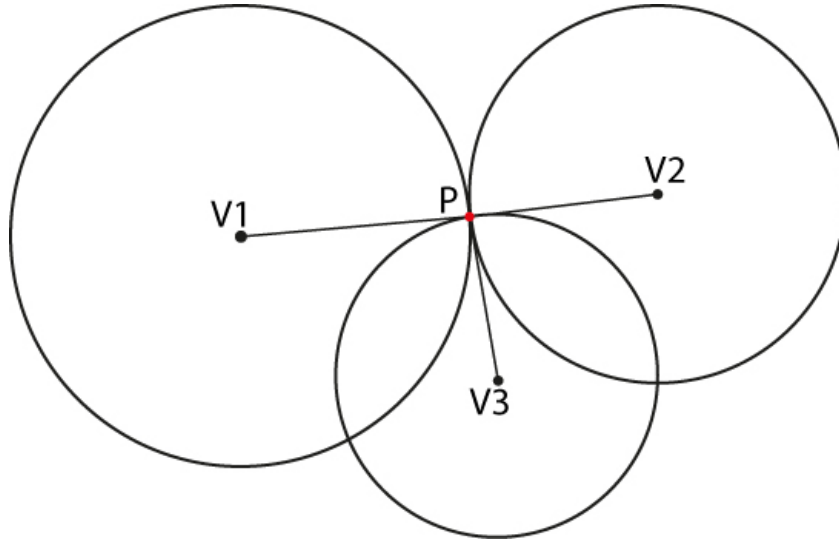
Ve trojrozměrném prostoru (3D) je potřeba minimálně čtyř vysílačů. Poté jsme již schopni určit polohu přijímače.

V praxi se ale často využívají metody, které převedou problém z 3D do 2D. Je totiž výpočetně méně náročný. Jedna z metod, která snižuje náročnost na prostorový model, a tedy i výpočty z něj, se jmenuje COLA. Tato technika nabízí efektivní a úsporné řešení pro určení polohy v 3D prostoru pomocí rozšíření existujících přístupů pro 2D prostor. Pro jednoduchost si ale ukážeme základní způsob výpočtu. Pro 2D prostor se tak dají určit rovnice pro výpočet souřadnic takto:

$$\begin{aligned}(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= d_1^2 \\(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= d_2^2 \\(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 &= d_3^2\end{aligned}\tag{2}$$

Kde d_i je naměřená vzdálenost

x_i a y_i jsou souřadnice vysílačů x a y jsou hledané souřadnice



Obrázek 2: Situace v 2D prostoru

Tento systém kvadratických rovnic se dá přepsat pomocí substitucí a rozdílů na tuto soustavu:

$$\begin{aligned}\alpha &= (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \\ \beta &= (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2)\end{aligned}\quad (3)$$

Pro 3D se soustava vytvoří analogicky:

$$\begin{aligned}\alpha &= (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \\ \beta &= (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2)\end{aligned}\quad (4)$$

Pro výpočet bodu $P[x, y]$ ve 2D se poté použijí rovnice a maticové operace:

$$\begin{aligned}x = f(d_1, d_2, d_3) &= \frac{\begin{vmatrix} \alpha & 2Y_1^2 \\ \beta & 2Y_1^3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2X_1^2 & 2Y_1^2 \\ 2X_1^3 & 2Y_1^3 \end{vmatrix}} \\ y = g(d_1, d_2, d_3) &= \frac{\begin{vmatrix} 2X_1^2 & \alpha \\ 2X_1^3 & \beta \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2X_1^2 & 2Y_1^2 \\ 2X_1^3 & 2Y_1^3 \end{vmatrix}}\end{aligned}\quad (5)$$

kde X_j^i a Y_j^i odkazuje na $(x_i - x_j)$ respektive $(y_i - y_j)$. Obdobně pro bod $P[x, y, z]$ ve 3D prostoru se jeho souřadnice spočítají následovně:

$$\begin{aligned}
x = f(d_1, d_2, d_3) &= \frac{\begin{vmatrix} \alpha & 2Y_1^2 & 2Z_1^2 \\ \beta & 2Y_1^3 & 2Z_1^3 \\ \gamma & 2Y_1^4 & 2Z_1^4 \end{vmatrix}}{M} \\
y = g(d_1, d_2, d_3) &= \frac{\begin{vmatrix} 2X_1^2 & \alpha & 2Z_1^2 \\ 2X_1^3 & \beta & 2Z_1^3 \\ 2X_1^4 & \gamma & 2Z_1^4 \end{vmatrix}}{M} \\
z = h(d_1, d_2, d_3) &= \frac{\begin{vmatrix} 2X_1^2 & 2Y_1^2 & \alpha \\ 2X_1^3 & 2Y_1^3 & \beta \\ 2X_1^4 & 2Y_1^4 & \gamma \end{vmatrix}}{M}
\end{aligned} \tag{6}$$

kde

$$M = \begin{vmatrix} 2X_1^2 & 2Y_1^2 & 2Z_1^2 \\ 2X_1^3 & 2Y_1^3 & 2Z_1^3 \\ 2X_1^4 & 2Y_1^4 & 2Z_1^4 \end{vmatrix} \tag{7}$$

Výše zmíněné rovnice byly převzaty z práce Chia-Yen Shiha a Pedro José Marróna (Shih a Marrón, 2010). Takto vypočtené souřadnice jsou zatíženy chybou, která vzniká na různých místech celého výpočtu. Nejvíce se zde projeví, jak dobře jsme na začátku popsali prostor pomocí parametru míry prostupu signálu prostorem a jak přesně jsme schopni určit vysílací výkon vysílače a hodnotu RSSI. Dále se na výsledku projevuje samotný prostor, čím je tvořen, jestli jsou překážky v dráze signálu, nebo z jakého materiálu překážky jsou. Toto všechno způsobuje chybu ve výpočtu a zkreslení výsledku.

Lokalizace pomocí otisků

Tato metoda je poměrně jednoduchá a nevyžaduje znalost vzdálenosti od vysílače. Jako předpoklad k určení polohy máme sestavenou tabulku pro každé možné místo prostoru, kde je potřeba určovat polohu, která obsahuje hodnoty RSSI pro každý z vysílačů dostupných v tomto místě a k tomu odpovídající polohu. Neprobíhá zde žádný výpočet, pouze se prochází tabulka se záznamy a hledá se nejvíc vyhovující položka. (Bolliger, 2008)

V tabulce č. 1 jsou ilustrační hodnoty pro vyhledávání pomocí otisků. V prvním sloupci je pouze označení bodu, kde byla naměřena hodnota. Druhý sloupec značí hodnotu, podle které bude provedeno hledání. V posledním sloupci je již přesně zaměřená poloha ve zmíněném bodě.

Tato metoda má ovšem velkou nevýhodu, a to že pro každý prostor musíme dopředu naměřit všechny dostupné hodnoty a ty pak zakomponovat do vlastní aplikace, která svoji polohu určuje.

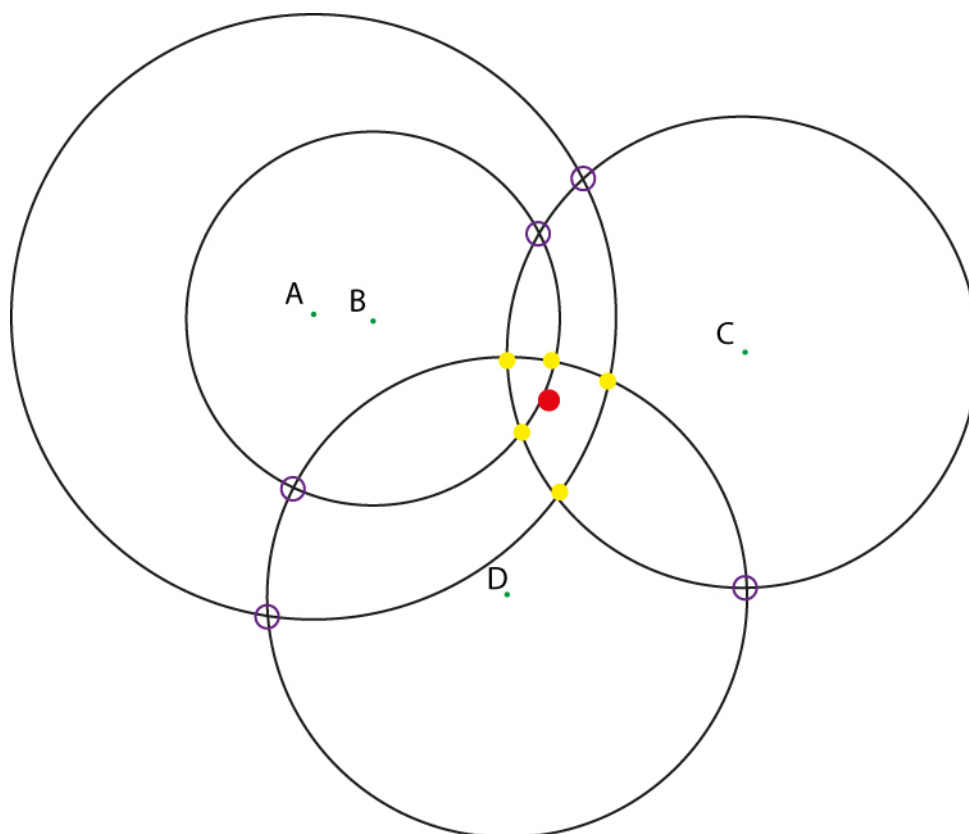
Tabulka 1: Takto může vypadat tabulka pro vyhledávání pomocí otisků

Bod	Hodnota	Pozice
1	54	49.203591, 16.614487
2	56	49.209372, 16.610374
3	61	49.205371, 16.620045
4	55	49.210023, 16.618643

Na druhou stranu má tato metoda výhodu v tom, že pokud máme dostatečně přesně naměřené hodnoty a polohu v tabulce pro hledání, jsme poměrně rychle schopni svoji polohu určit.

Lokalizace na základě algoritmu Geo-n

Tento algoritmus používá pro svůj výpočet převod RSSI na vzdálenost, ale počítá s tím, že tyto údaje mohou obsahovat chyby. Stejně jako v případě lokalizace pomocí trilaterace se používají průsečíky kružnic, ale díky dvoufázovému filtrování je tato metoda přesnější.



Obrázek 3: Schéma filtrování chybových vstupů

V situaci, kdy jsou v dosahu vysílače a máme změřeny vzdálenosti, přichází na řadu filtrování. Na obrázku (Obr. 3) je vidět situace, kdy naměřená vzdálenost mezi jednotlivými dvěma vysílači a hledanou pozicí (červený bod) určují vždy jeden nebo dva průsečíky kružnic. Tyto průsečíky se začnou porovnávat a ty, které přestávají být užitečné (fialové kolečka), jsou z výpočtu odfiltrovány a zůstanou jen ty výhodné pro výpočet (žluté body).

V první fázi jsou vytvořeny všechny průsečíky všech dvojic kružnic, které mají střed v jednotlivých vysílačích, a poloměry o velikosti naměřené vzdálenosti. Při hledání průsečíků mohou nastat jen tři situace. První a nejjobecnější je, že průsečíky máme dva. V druhém případě jeden, pokud se kružnice jen dotýkají, tedy vzdálenost středů je rovna součtu poloměrů. V posledním případě není žádný. Tady je průsečík aproximován na střed úsečky ležící mezi dvěma nejbližšími body těchto dvou kružnic. Tyto body též leží na spojnici středů těchto kružnic.

Dále jsou k těmto reálným a aproximovaným průsečíkům přidány váhy. Pro nejlepší výsledky je vhodné použít stejné váhy. Naopak pro nejlepší výpočetní časy by váha pro reálné průsečíky měla být $3\times$ větší než pro aproximované. Pro všechny průsečíky je spočítán součet vzdáleností do ostatních bodů. Z těchto hodnot je vypočten medián a všechny body, které mají součet vzdáleností větší jako tento medián, jsou z výpočtu vyloučeny.

Ze zbylých průsečíků je podle rovnice č. 8 vypočten střed váženého centroidu, který je zároveň i naším hledaným bodem.

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^{|WIP|} w_i \times x_i}{\sum_{i=1}^{|WIP|} w_i}, \frac{\sum_{i=1}^{|WIP|} w_i \times y_i}{\sum_{i=1}^{|WIP|} w_i} \right) \quad (8)$$

kde \hat{x} resp. \hat{y} je hledaná hodnota souřadnice x

WIP je množina všech průsečíků, které nebyly odfiltrovány

$|WIP|$ je počet prvků množiny WIP

w_i je váha prvku množiny WIP

x_i resp. y_i je hodnota souřadnice x, resp. y, z množiny WIP

(Will et al., 2012)

4 Metodika

Pro zvolení optimálního systému, který bude poskytovat informace o poloze, je třeba nejprve zvolit kritéria, která na něj budeme klást. Jde v první řadě o přesnost a jednoduchost. Dále také rychlost, možnosti rozšíření a v neposlední řadě také soukromí uživatelů.

Pro určování polohy proto budou použita zařízení využívající technologii *Bluetooth*. Bluetooth technologie byla vybrána proto, že je zastoupena v drtivé většině mobilních telefonů a dalších mobilních zařízení. Pro testovací systém bude použita platforma iOS společnosti *Apple*, která poskytuje dostatečně robustní a přitom jednoduché frameworky pro poskytování polohových a *Bluetooth* služeb. Jako nosná informace bude použita hodnota RSSI přijatého signálu.

Protože je žádoucí, aby uživatel měl alespoň základní dohled nad informacemi o jeho poloze, bude systém obsahovat statické vysílače signálu, které budou pouze inzerovat informace, a mobilní přijímače, které budou zpracovávat signál. Pro jednodušší testování bude aplikace přijímače pouze zjišťovat základní údaje a všechny další výpočty budou prováděny na počítači.

V první fázi testování bude použit jeden vysílač a jeden přijímač s různými překážkami pro zjištění chování signálu v různých podmínkách. Následně bude využita síť vysílačů a bude určována poloha přijímače.

Pro co nejvyšší přesnost budou použity algoritmy trilaterální triangulace a Geo-

5 Koncept experimentální aplikace

Pro fungování technologie *iBeacon* je nutné, aby na cílovém zařízení fungoval iOS ve verzi 7 a vyšší a podporovány jsou zařízení:

- iPhone 4s a novější
- iPad třetí generace a novější
- iPad mini
- iPod Touch 5. generace a novější

Pro vysílač i přijímač byla zvolena zařízení iPod Touch.

5.1 Popis aplikace vysílače

Aplikace obsahuje jeden *ViewController*, který využívá frameworky *CoreLocation* a *CoreBluetooth*.

Skrze *CoreLocation* dostaneme přístup k objektu *CLBeaconRegion*, který definuje vysílaný signál. Pro nastavení byly použity hodnoty:

- UUID: 0e519dba-ad50-11e4-89d3-123b93f75cba
- Major: 1
- Minor: 1
- Identifier: com.ibeacon.test

Tato inicializace probíhá v metodě 9, která je vyvolána životní událostí nadřazeného objektu, čili *ViewControlleru*. (Neuburg, 2013) Po stisknutí tlačítka pro start začne aplikace vysílat *iBeacon* signál s těmito daty, pomocí nichž jsme schopni rozlišit různé vysílače.

-(void)viewDidLoad (9)

Hodnoty Major a Minor pro nás můžou mít různý význam. Při použití více vysílačů můžeme nastavovat tyto hodnoty na čísla, které reprezentují konkrétní místa. Například Major pro práci může být 1, pro domov 2, pro restauraci 3, atd. A pro každou hodnotu Major navíc definovat Minor pro jednotlivé pozice vysílače. Například pro domov můžeme určit Minor pro obývací pokoj jako 1, pro kuchyni 2, pro garáž 3, atd. A právě s touto znalostí jsme schopni pracovat dále v aplikaci přijímače.

5.2 Popis aplikace přijímače

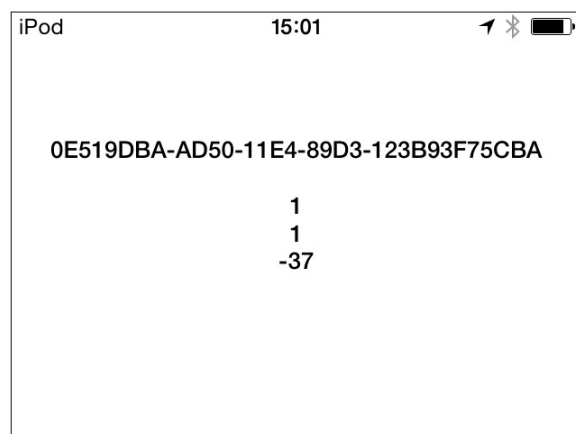
Tato aplikace opět používá jeden *ViewController* s frameworkem *CoreLocation*. Aby mohla aplikace zachytit signál z vysílače, je nutné nastavit proměnou UUID



Obrázek 4: Vysílání signálu

a identifier objektu `CLBeaconRegion` na stejnou hodnotu jako u vysílače. Ostatní parametry se nenastavují.

Po startu aplikace je ihned vidět, jestli jsme v oblasti pokryté signálem *iBeacon*. Pokud ano, na displeji se zobrazí dostupné informace o vysílači, tedy UUID, čísla major, minor a hodnota RSSI.



Obrázek 5: Informace o přijatém iBeaconu

Odchycení informací probíhá v metodě (10), která reaguje na systémové události a předává nám objekty, ve kterých jsou dostupné informace.

```

-(void)locationManager : (CLLocationManager*) manager
    didRangeBeacons : (NSArray*) beacons
    inRegion : (CLbeaconRegion*) region
  
```

(10)

6 Určení vzdálenosti zařízení od vysílače

Měření probíhalo ve dvou fázích. V první fázi bylo prováděno měření ve volném prostoru a ve druhé uvnitř budovy na chodbě. V každé fázi se měřilo bez překážek, s dřevěnou překážkou o tloušťce 2 cm, která měla imitovat dřevěnou stěnu a na závěr byl jako překážka použit člověk. V intervalech 1 m byly zaznamenávány hodnoty RSSI které byly následně převáděny na vzdálenost. Tento proces byl 10× opakován a poté zprůměrován.

Dosah signálu ve volném prostoru byl přes 50 m, ovšem okolo vzdálenosti 20 m, se hodnota RSSI přestala zvyšovat a spíše oscilovala u hodnot -90 až -95 dBm (obrázek č. 6). Proto bylo měření prováděno do vzdálenosti 17 m, kde byla ještě dostatečná přesnost.



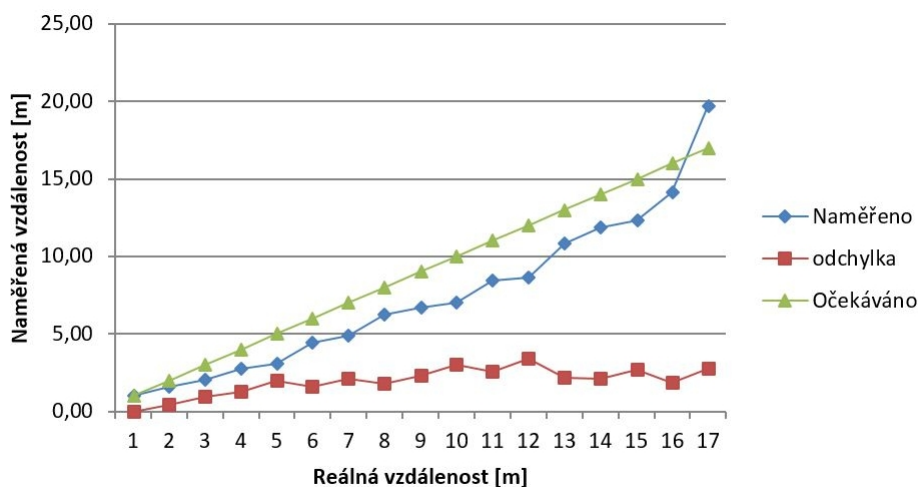
Obrázek 6: Průběh hodnoty RSSI ve volném prostoru

U každého typu překážky se pro výpočet vzdálenosti použila jako referenční hodnota RSSI průměrná naměřená hodnota ze vzdálenosti 1 m.

6.1 Výsledky ve volném prostoru

Měření bez překážek

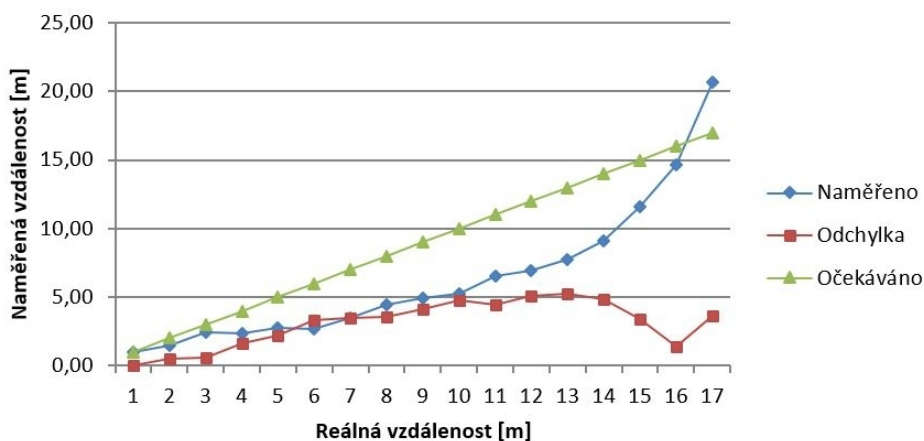
Ve volném prostoru se signál šířil podle předpokladu a naměřená odchylka byla v průměru 1.93 m (Obr. 7).



Obrázek 7: Graf naměřených vzdáleností ve volném prostoru bez překážek

Měření s překážkou–dřevo

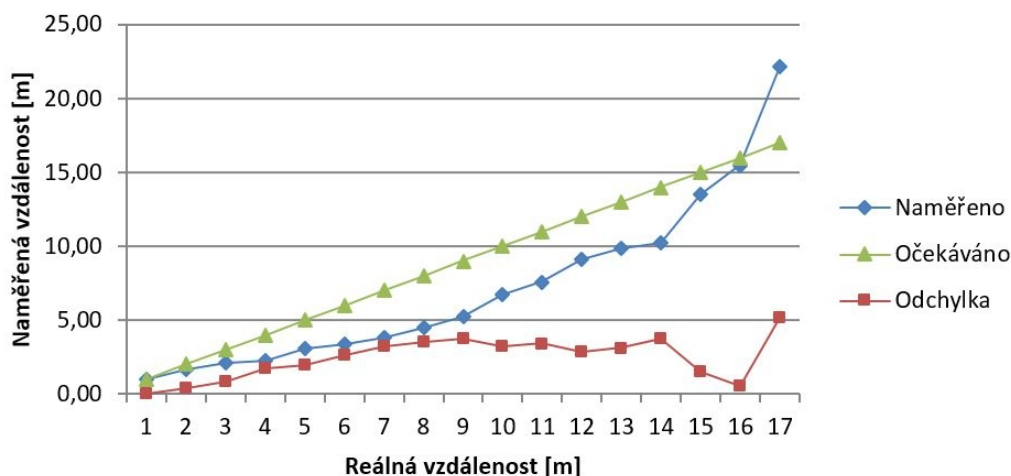
Při měření s dřevěnou překážkou byl vysílač umístěn doprostřed dřevěné desky o rozměrech $1.5 \times 1.5 \times 0.02$ m, přes kterou následně procházel signál. Z následujícího grafu je patrné, že odchylka se již poměrně zvýšila. Překvapivé ovšem je, že naměřená vzdálenost je spíše nižší, než v situaci bez překážky. Ale opět je vidět, že ve vzdálenosti 15 m naměřená vzdálenost prudce stoupá. V této situaci byla průměrná odchylka 3.07 m. (Obr. 8)



Obrázek 8: Graf naměřených vzdáleností ve volném prostoru s dřevěnou překážkou

Měření s překážkou–člověk

Při posledním měření měl figurant v ruce před sebou zařízení s aplikací pro příjem signálu a byl vždy zády k vysílači. A stejně jako v předchozích případech, od 15 m se naměřená vzdálenost prudce zvyšovala. Průměrná odchylka tohoto měření byla 2.44 m. (Obr. 9)



Obrázek 9: Graf naměřených vzdáleností ve volném prostoru s člověkem jako překážkou

6.2 Výsledky v budově

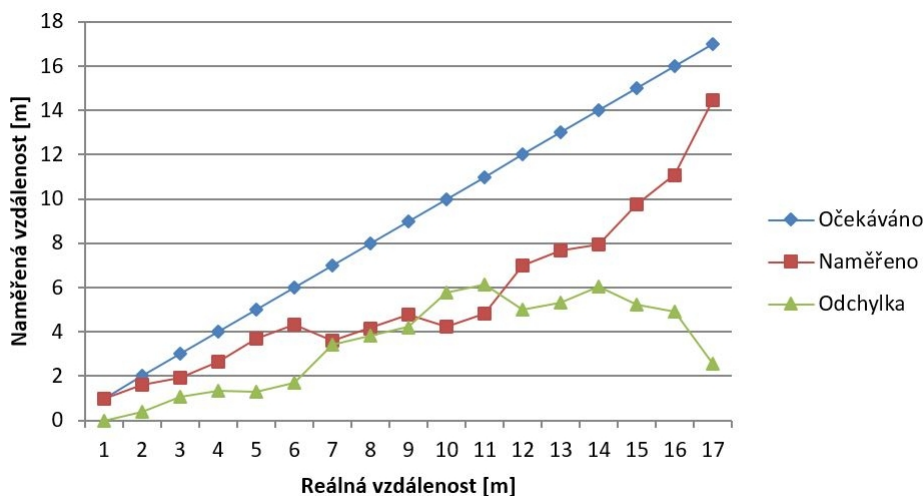
V této části měření bylo zajímavé sledovat, že se naměřená vzdálenost více blížila té skutečné. Pravděpodobně to bude způsobeno odrazy signálu. I průměrná odchylka se snížila.

Měření bez překážek

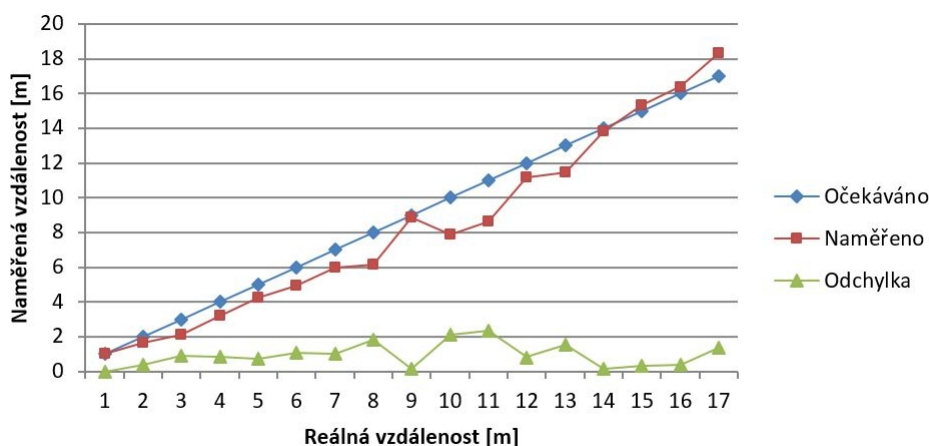
V tomto měření byly výsledky paradoxně nejhorší. Průměrná odchylka se dostala na hodnotu 3.42 m a přesnost od vzdálenosti 6 m se rapidně snížila. Tato situace byla dána především mnohocestností signálu. (Obr. 10)

Měření s překážkou–dřevo

Tady byly použity jako překážka dřevěné dveře o tloušťce 2 cm. Poněkud překvapivě byly výsledky nejlepší ze všech měření. Signál se po průchodu překážkou šířil více rovnoměrně a další odrazy signálu již byly vyhodnoceny systémem jako nerelevantní, a tak naměřená hodnota tolik nekolísala. Průměrná odchylka byla 0.94 m. (Obr. 11)



Obrázek 10: Graf naměřených vzdáleností v budově bez překážek



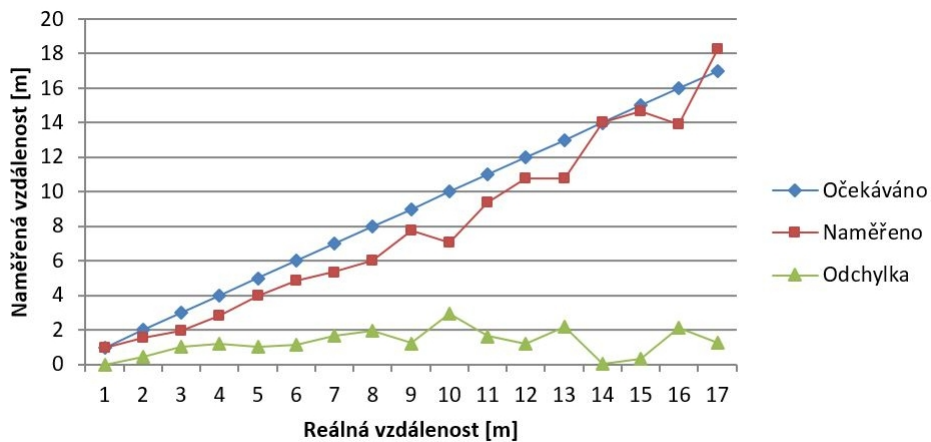
Obrázek 11: Graf naměřených vzdáleností v budově s dřevěnou překážkou

Měření s překážkou–člověk

Zde bylo měření prováděno stejně jako v případě volného prostoru. Oproti předchozímu případu je víc vidět kolísání vzdálenosti a nárůst průměrné odchylky na 1.26 m. (Obr. 12)

6.3 Problémy při měření

Při měření docházelo k úplnému vypadnutí signálu na straně přijímače a jediný způsob, jak signál opět zachytit, byl restart zařízení. Tyto výpadky se objevovaly nezávisle na vzdálenosti od vysílače, avšak převážně ve volném prostoru. Při měření



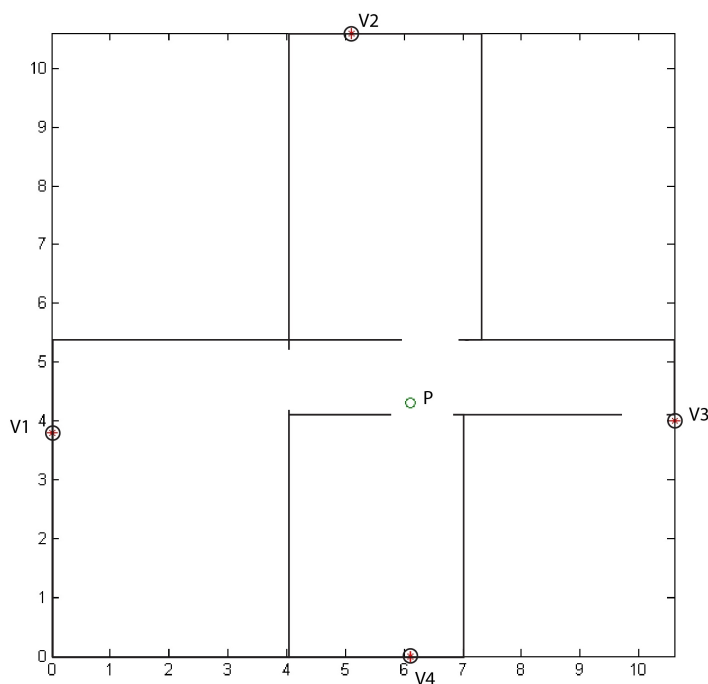
Obrázek 12: Graf naměřených vzdáleností v budově s člověkem jako překážkou

v budově se výpadek sice také objevil, ale aplikace po chvíli opět signál zachytila. Zdálo se, že na vině je softwarová chyba přímo v systému iOS. Je ale možné, že s pozdější aktualizací iOS bude tento problém vyřešen.

7 Určení polohy s více vysílači

7.1 Určení polohy statického přijímače

Jako testovací prostor byl zvolen panelový byt, který je znázorněn na obrázku (Obr. 13). Na témže obrázku jsou vyznačeny polohy vysílačů (V) a poloha přijímače (P), pro který byla zjišťována poloha. Pro názornost byla zvolena metoda trilaterace. Protože prostor obsahoval drobné překážky ve formě nábytku a viditelnost vysílače a přijímače nebyla vždy přímá, byl určen koeficient prostupu signálu prostorem na hodnotu 2.4. Naměřená referenční hodnota signálu na 1 m byla -55 dBm. Protože hodnota RSSI není v konstatní vzdálenosti stabilní, ale spíše osciluje v rozmezí několika málo dBm, probíhalo měření opět opakovaně a pro výpočty byly použity průměrné hodnoty. Veškeré originální naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze.



Obrázek 13: Půdorys testovacího prostoru

Polohy vysílačů a reálná poloha přijímače jsou dány tabulkou č. 2.

Pro jednoduchost byly vysílače a přijímače ve stejné výšce, tudíž stačí provést výpočet jen ve 2D, protože souřadnice osy z je pořád stejná.

Triangluace ve 2D

Protože pro 2D prostor stačí pouze 3 vysílače, provedeme výpočet pro každé trojice vysílačů.

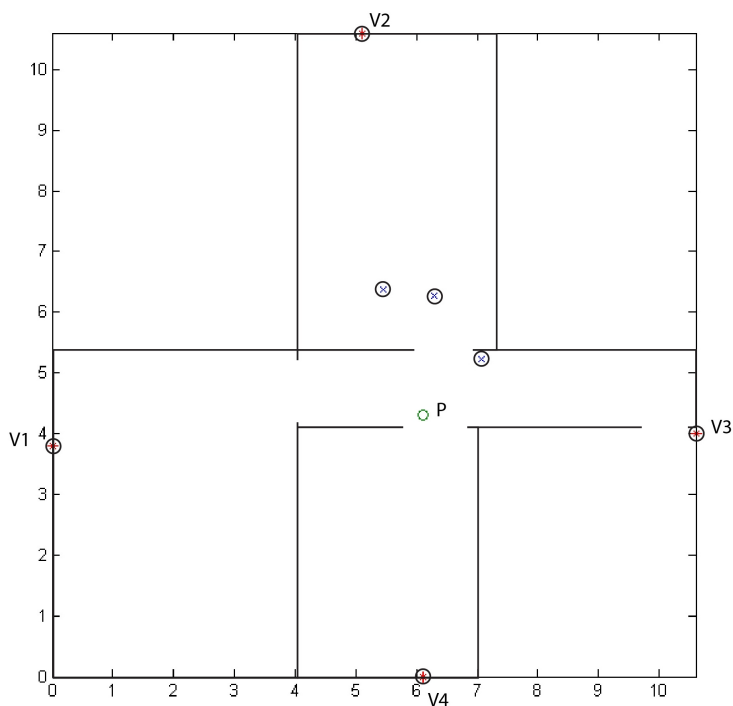
Tabulka 2: Polohy vysílačů a přijímače

Vysílač	x[m]	y[m]	z[m]
V1	0	3.8	1.5
V2	5.1	10.6	1.5
V3	10.6	4	1.5
V4	6.1	0	1.5
P	6.1	4.3	1.5

Tabulka 3: Vypočtené souřadnice

Vysílač	x[m]	y[m]	Δ x[m]	Δ y[m]
V1, V2, V3	5.46	6.38	0.64	2.08
V1, V3, V4	6.13	6.27	0.03	1.97
V1, V2, V4	5.46	6.38	0.64	2.08
V2, V3, V4	7.06	5.23	0.96	0.93
Směrodatná odchylka	0.757	0.559	0.390	0.559
Medián	5.795	6.325	0.64	2.025

Při porovnání naměřených a vypočtených hodnot (Tab. 3) s reálnou polohou přijímače je vidět, že odchylky souřadnic byly poměrně velké. Průměrná vzdálenost byla 1.91 m.

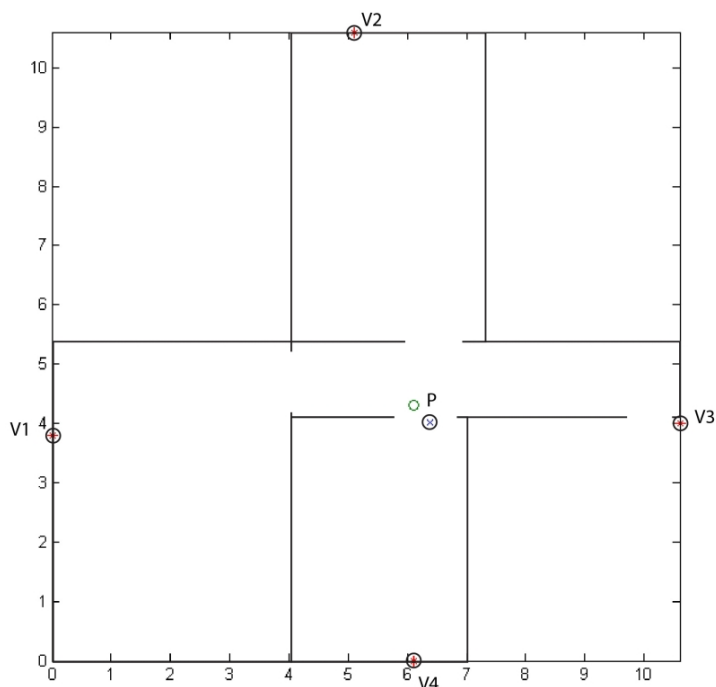


Obrázek 14: Schéma naměřených bodů pomocí algoritmu triangulace

Ze schématu (Obr. 14) je vidět, kam přesně byly určeny polohy přijímače. Je zde možnost pozorovat jev, kdy jednotlivé naměřené hodnoty vzdáleností přijímače od vysílačů se blíží reálným hodnotám, ale vypočtené souřadnice jsou již příliš zatíženy chybou. Je to nejspíš dáno odrazy signálů a v některých případech zakrytí přímé cesty signálu od vysílače k přijímači.

Geo-n algoritmus

Pro srovnání byl použit algoritmus Geo-n. Na obrázku č. 15 je již vidět jediný výsledný bod (modrý křížek), který má vzdálenost od reálné pozice jen 0.36 m. Vypočtené souřadnice a odchylky jsou v tabulce č. 4. Je zde vidět velký přínos filtrování nerelevantních průsečíků, což vede k přesnějšímu výsledku.



Obrázek 15: Schéma prostoru s naměřeným bodem pomocí algoritmu Geo-n

Tabulka 4: Tabulka vypočtených souřadnic a odchylek algoritmu Geo-n

$x[m]$	$y[m]$	$\Delta x[m]$	$\Delta y[m]$
6.312	4.015	0.212	0.285

7.2 Průchod polem vysílačů

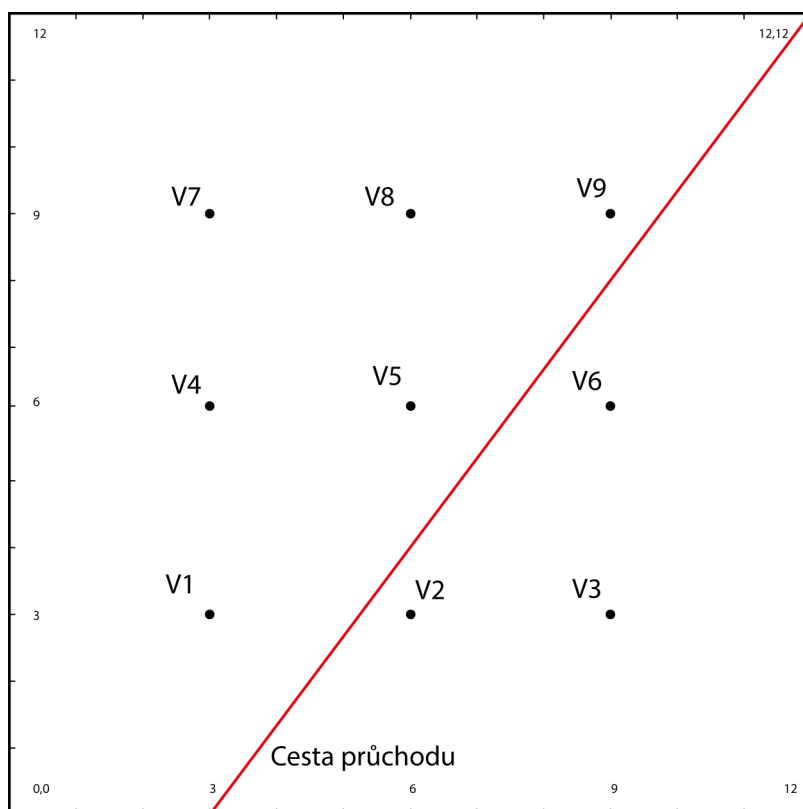
V této části měření se zaměříme na komplexní systém skupiny vysílačů a průchod skrz prostor jimi pokrytý. Vysílače budou rozmístěny do pravoúhlé mřížky s odstupy

3 m. Meřený prostor bude na ploše 12×12 m, přičemž poholy vysílačů jsou dány tabulkou 5.

Tabulka 5: Tabulka souřadnic vysílačů

Vysílač	$x[m]$	$y[m]$
1	3	3
2	6	3
3	9	3
4	3	6
5	6	6
6	9	6
7	3	9
8	6	9
9	9	9

Průchod skrz prostor byl po přímce, která začínala na souřadnicích $[3, 0]$ a končila na souřadnicích $[12, 12]$. Vše ilustruje obrázek 16, kde jsou vyznačeny vysílače černými kolečky a červenou čarou průchod prostorem.

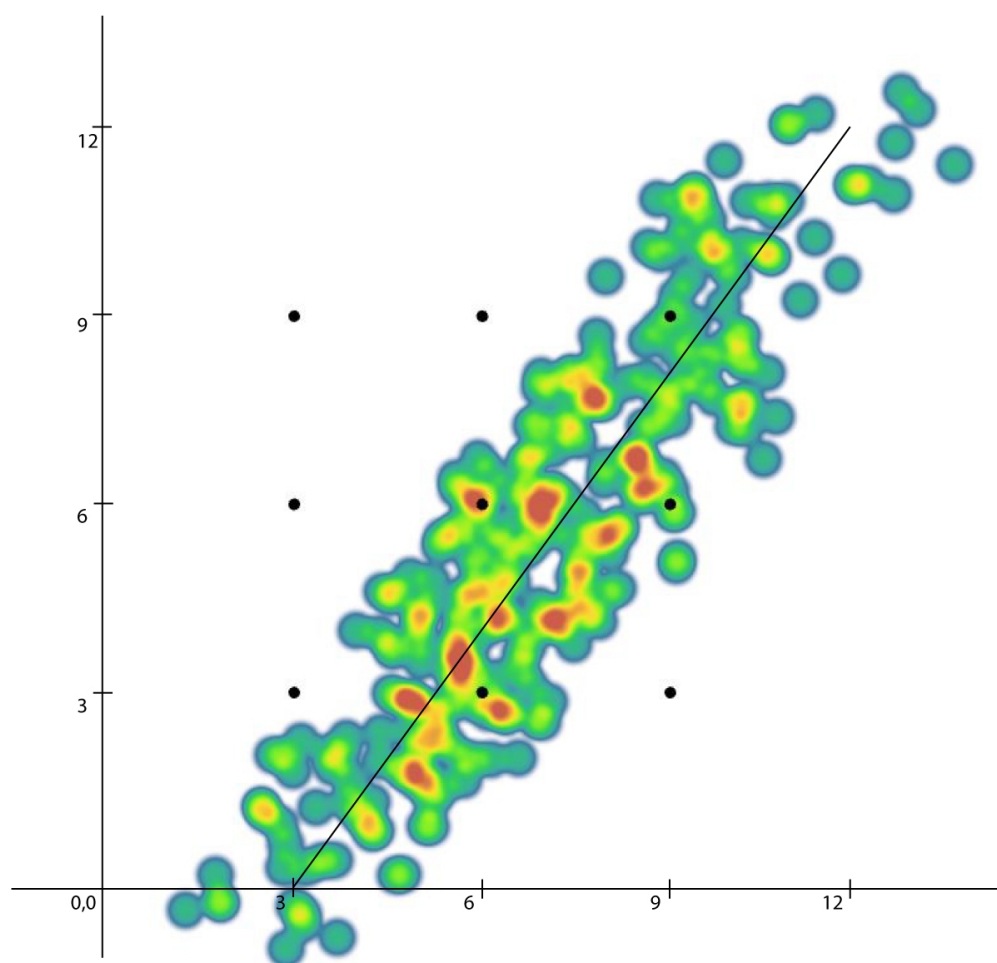


Obrázek 16: Schéma testovacího prostoru

Odečítání hodnot probíhalo na počátečním bodě a pak po každém metru až na konec. Celé měření bylo 10× opakováno.

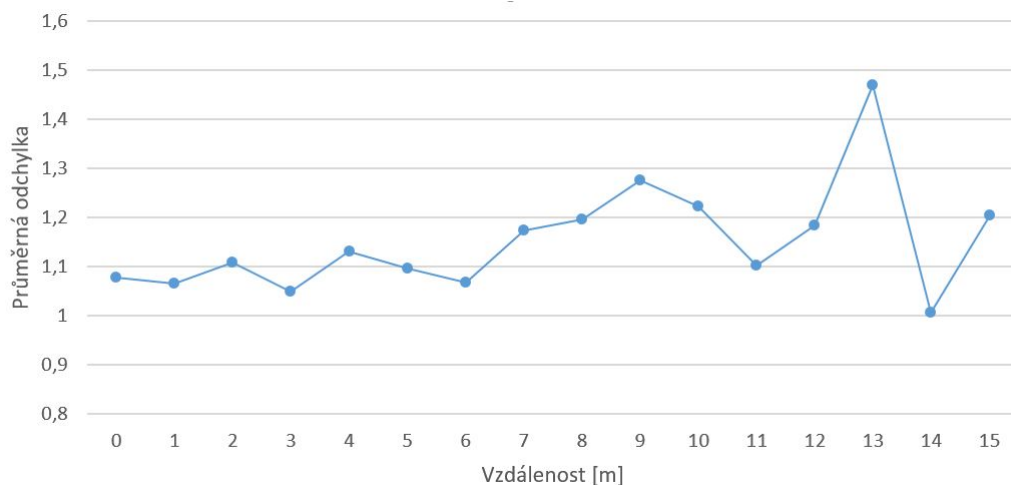
Triangulace

Heat mapa na obázku č. 17 znázorňuje s jakou pravidelností byla v konkrétním bodě, nebo jeho okolí, určena pozice přijímače s použitím algoritmu trilaterální triangulace. S rostoucí pravidelností se mění barva od modré až po červenou.



Obrázek 17: Heat mapa průchodu prostorem

Jak je vidět na obrázku č. 18, průměrná odchylka v jednotlivých vzdálenostech nepřesahuje 2 m, ale zároveň není nižší jak 1 m. Je možné pozorovat, jak v některých místech odchylky prudce kolísají. Tyto hodnoty byly spočítány z naměřených dat v každé vzdálenosti zvlášť.



Obrázek 18: Průměrné odchylky od reálných hodnot

Geo-n

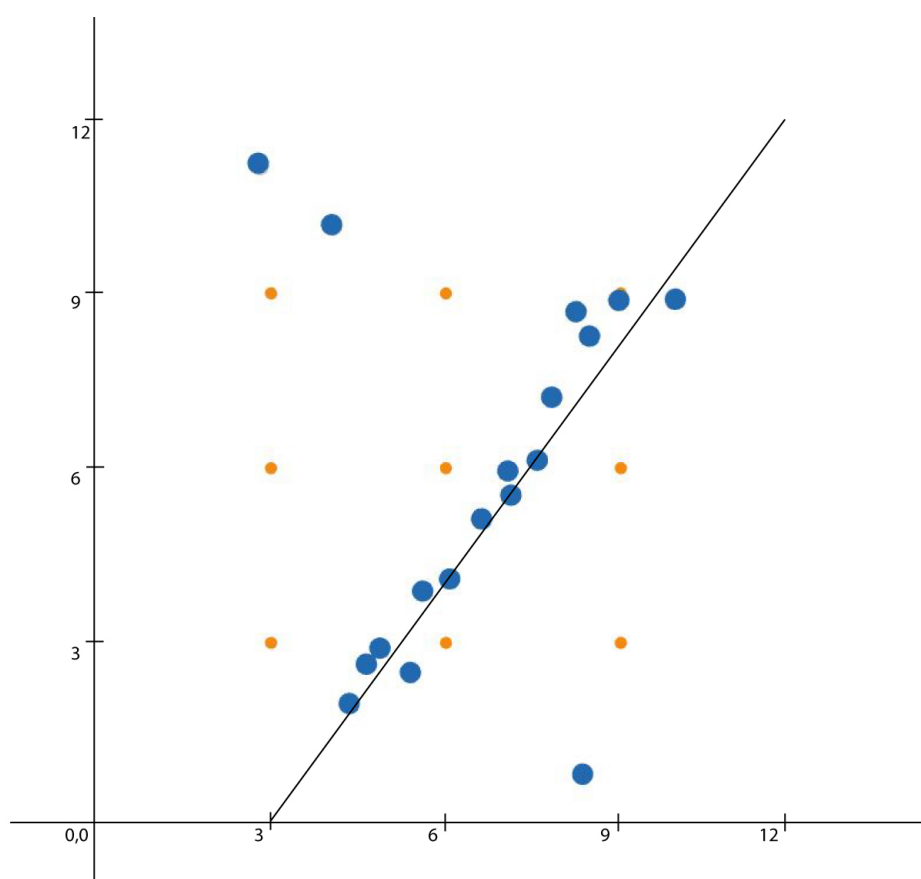
Pro porovnání byl proveden výpočet pomocí algoritmu Geo-n, jehož výsledek je vidět na obrázku č. 19. Oranžové kolečka značí vysílače a modré kolečka vypočtenou hodnotu.

Zde je již vidět, že algoritmus má velmi málo výsledků, ale za to přesnějších. Tři z vypočtených souřadnic se dají považovat za nerelevantní a dá se předpokládat, že je to vinnou výpočetní chybou. Bez těchto tří bodů by průměrná vzdálenost vypočtených a reálných bodů byla 1.36 m, kdežto s nimi je to 1.95 m. Vypočtené odchylky od reálných pozic (zaokrouhlené na 2 desetinná místa) shrnuje tabulka č. 6.

Tabulka 6: Tabulka vypočtených odchylek u algoritmu Geo-n

Průměr [m]	Medián [m]	Směrodatná odchylka [m]
1.96	1.64	1.52

Zdá se, že odchylky jsou v porovnání s algoritmem triangulace dost podobné, ale je dobré si všimnout, že body zůstávají v blízkosti zvolené trasy průchodu. Je možné, že jinak zvolená trasa by mohla generovat body, které by byly hůře umístěné.



Obrázek 19: Výsledky pomocí algoritmu Geo-n

8 Závěr

V této práci byly porovnány různé přístupy pro zjišťování polohy a byl vytvořen systém pro určování polohy zařízení v prostoru, jehož součástí byly experimentální aplikace využívající technologii *iBeacon*. Dále byly provedeny série měření, ukazující chování systému v různých podmínkách. Tímto byly jednotlivé body zadání splněny.

Z testů vyplývá, že je esenciální pro správné určení polohy důkladně a správně popsat prostor, který bude používán pro určování polohy, a mít dostatečně robustní algoritmus, zajišťující dostatečnou přesnost výsledku. Zvolené algoritmy se vyznačovaly přesností do 2 m v případě triangulace a 1.36 m v případě Geo-n. Z výsledků je patrné, že algoritmus Geo-n dosahuje vyšší přesnosti oproti trilaterální triangulaci, a proto je vhodné jej upřednostnit. Také vlastní poloha vysílače může zkreslovat výsledky. Jako ideální místo se jeví strop místnosti, případně místo na stěně co nejvýš u stropu, aby v dráze signálu bylo pokud možno co nejméně překážek.

8.1 Návrh na další rozvoj

Obecně je tato technologie vhodná pro indoor navigaci a šíření lokačně založených informací.

Například by se dala využít pro navádění zrakově postižených lidí v budovách, kdy by jim aplikace akusticky hlásila, co se kolem nich nachází a co leží kterým směrem. V takovém případě by bylo nutné investovat do přiměřeného množství vysílačů, které by pokryly navigovatelnou oblast, což by ve velkých komplexech mohlo znamenat stovky, až tisíce, takových zařízení. Zde by měl být kladen důraz na co největší přesnost, aby se uživatel nemohl dostat do nebezpečné situace

Další možné využití je například reklamní a obchodní sdělení. Uživatel může dostávat informace o reklamních plochách, ke kterým se přiblíží, produktech ve výlohách obchodů a podobně. V této situaci není třeba vysoké přesnosti a proto postačí pokrýt prostor vysílači jen minimálním množstvím.

Mezi další možnosti patří automatizace robotických strojů. Tyto stroje mohou být pomocí údajů o poloze v prostoru automaticky navigovány na zadaná místa.

9 Reference

- ANDERSEN, J.B., RAPPAPORT, T.S., YOSHIDA, S. *Propagation measurements and models for wireless communications channels*. In: *IEEE Communications Magazine* [online]. 1995, s. 42-49 [cit. 2014-12-14]. ISSN 01636804. DOI: 10.1109/35.339880. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=339880>.
- APPLE, INC. *Location and Maps Programming Guide*. [online]. 2013. Dostupné z: <https://developer.apple.com/library/ios/documentation/UserExperience/Conceptual/LocationAwarenessPG/Introduction/Introduction.html>.
- APPLE, INC. *IOS: Understanding iBeacon*. 2014, Nov 8, 2014 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://support.apple.com/en-us/HT202880>.
- APPLE, INC. *Location and Maps Programming Guide. IOS Developer Library* [online]. 2014, 2014-03-10 [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: <https://developer.apple.com/library/ios/documentation/UserExperience/Conceptual/LocationAwarenessPG/Introduction/Introduction>.
- BENKIČ K., M. MALAJNER, P. PLANINŠIČ, Ž. ČUČEJ *Using RSSI value for distance estimation in Wireless sensor networks based on ZigBee*. In: 2008 15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing [online]. IEEE, 2008, : 303-306 [cit. 2015-12-01]. DOI: 10.1109/IWSSIP.2008.4604427. ISBN 978-80-227-2856-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4604427>.
- BLUMROSEN, GADDI, BRACHA HOD, TAL ANKER, DANNY DOLEV A BORIS RUBINSKY *Enhancing RSSI-based tracking accuracy in wireless sensor networks*. *ACM Transactions on Sensor Networks* [online]. 2013-05-01, vol. 9, issue 3, s. 1-28 [cit. 2014-12-14]. DOI: 10.1145/2480730.2480732. Dostupné z: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2480730.2480732>.
- BOLLIGER, PHILIPP *Redpin - adaptive, zero-configuration indoor localization through user collaboration*. In: *Proceedings of the first ACM international workshop on Mobile entity localization and tracking in GPS-less environments - MELT '08* [online]. New York, New York, USA: ACM Press, s. 55- [cit. 2015-05-08]. DOI: 10.1145/1410012.1410025. ISBN 9781605581897. Dostupné z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1410012.1410025>.
- BOTTA, MIROSLAV, SIMEK, MILAN *Adaptive distance estimation based on RSSI in 802.15.4 network* *Radioengineering*, 2013, 22.4..
- Estimote* [online]. [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.estimote.com/>.
- KINDBERG, TIM, BARTON JOHN A *Web-based nomadic computing system* *Computer Networks* [online]. 2001, 35(4): 443-456 [cit. 2015-12-

10]. DOI: 10.1016/S1389-1286(00)00181-X. ISSN 13891286. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S138912860000181X>.

GONZALEZ-CASTANO, F.J. A GARCIA-REINOSO, J. *Bluetooth location networks*. In: Global Telecommunications Conference, 2002. GLOBE-COM '02. IEEE [online]. IEEE, 2002, s. 233-237 [cit. 2015-12-10]. DOI: 10.1109/GLOCOM.2002.1188075. ISBN 0-7803-7632-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1188075>.

NEUBURG, MATT *IOS 7 programming fundamentals: Objective-C, Xcode, and Cocoa basics* Sebastopol, CA 95472: O'Reilly Media, Inc., s. 298. ISBN 1491945575.

OTSASON VELJO, VARSHAVSKY ALEX, LAMARCA ANTHONY, DE LARA EYAL *Accurate GSM Indoor Localization*. In: UbiComp 2005: Ubiquitous Computing [online]. 2005, s. 141 [cit. 2015-12-01]. DOI: 10.1007/11551201₉. ISBN 978-3-540-31941-2. ISSN 0302-9743. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/11551201₉>.

PRIYANTHA, NISSANKA B., ANIT CHAKRABORTHY A HARI BALAKRISHNAN *The Cricket location-support system*. In: Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking - MobiCom '00 [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2000, s. 32-43 [cit. 2015-12-10]. DOI: 10.1145/345910.345917. ISBN 1581131976. Dostupné z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=345910.345917>.

SEN, SOUVIK, LEE, JEONGKEUN, KIM, KYU-HAN, CONGDON, PAUL *Avoiding multipath to revive inbuilding WiFi localization*. In: Proceeding of the 11th annual international conference on Mobile systems, applications, and services - MobiSys '13 [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2013, s. 249 [cit. 2014-12-14]. ISBN 9781450316729. DOI: 10.1145/2462456.2464463. Dostupné z: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2462456.2464463>.

SHIH, CHIA-YEN A PEDRO JOSÉ MARRÓN COLA: *Complexity-Reduced Trilateration Approach for 3D Localization in Wireless Sensor Networks*. In: 2010 Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications [online]. IEEE, s. 24-32 [cit. 2015-05-08]. DOI: 10.1109/SENSORCOMM.2010.11. ISBN 978-1-4244-7538-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5558044>.

SOMMER, JÜRGEN, LÜDERS, SIMON, SCHMITT, STEPHEN, ROSENSTIEL, WOLFGANG *System-Level Power-Accuracy Trade-Off in Bluetooth Low Energy Networks*. In: Ubiquitous intelligence and computing: 8th International Conference UIC 2011, Banff, Canada, September 2-4, 2011. proceedings. 1st ed. New York: Springer, 2011, s. 379. ISBN 3642236405. DOI: 10.1007/978-3-642-23641-9₃₁. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-23641-9₃₁>.

WILL, HEIKO, THOMAS HILLDEBRANDT, MARCEL KYAS *The Geo-n loca-*

lization algorithm. In: *2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)* [online]. IEEE, s. 1-10 [cit. 2015-05-08]. DOI: 10.1109/IPIN.2012.6418867. ISBN 978-1-4673-1954-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6418867>.

ZANDBERGEN, PAUL A. *Accuracy of iPhone Locations: A Comparison of Assisted GPS, WiFi and Cellular Positioning*. In: ZANDBERGEN, Paul A. *Transactions in GIS* [online]. s. 5-25 [cit. 2015-05-07]. DOI: 10.1111/j.1467-9671.2009.01152.x. ISSN 13611682. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-9671.2009.01152.x>.

Přílohy

A Přílohy na CD

Na přiloženém CD jsou k dispozici zdrojové kódy k aplikacím a naměřená data ve formátu xlsx.