

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra radioelektroniky

## Přesnost systémů rádiového určování polohy

**Petr Šimek**

Vedoucí: prof. Ing. František Vejražka, CSc.  
Květen 2022



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šimek** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **482446**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Přesnost systémů rádiového určování polohy**

Název bakalářské práce anglicky:

**Precision of Position Determination Radio Systems**

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte studii, která pojedná o různých způsobech vyjadřování přesnosti, resp. chyby, rádiových systémů pro určování polohy (rms, CEP, 95%). Dále popište metody rádiového určování polohy (např. TOA, TDoA, AOA, apod.) a shrňte hlavní příčiny jejich chyb.

Připravte experiment k zjištění chyby měření úhlů rádiovým systémem uBlox, tzn. uskutečnete sadu měření známého úhlu, získané výsledky zaznamenejte, statisticky zpracujte a stanovte výše uvedené chyby. Předpokládá se, že budete měřit v rovině a bude-li to možné ověříte chyby ve dvou na sebe kolmých rovinách. Měření proveďte pro různé vzdálenosti obou součástí aparatury. Pro měření zvolte vhodné prostředí, kde měření nebudou ovlivněna odrazy; pokud to bude možné prozkoumejte vliv odrazů. Zaměřte se na zjištění rozložení pravděpodobnosti chyb v rovině a event. i ve 3D prostoru.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Pratap Misra, Per Enge: Global positioning system. Ganga-Jamuna Press, 2017.
- [2] Kayton, M.: Radio Navigation. Wiley, 2016.
- [3] Reisenauer, R.: Metody matematické statistiky a jejich aplikace v technice. SNTL Praha 1970.
- [4] Vejražka, F.: Sběrka příkladů z teorie rádiové komunikace I. Ediční středisko ČVUT, Praha 1982.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**prof. Ing. František Vejražka, CSc. katedra radioelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **08.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

prof. Ing. František Vejražka, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování

Chtěl bych poděkovat prof. Ing. Františku Vejražkovi, CSc. za pomoc při zpracování této práce, poskytnutí potřebných materiálů k nastudování tématu a spoustu cenných rad. Děkuji i Ing. Václavu Navrátilovi, Ph.D. za korekturu této práce a Ing. Václavu Kabourkovi, Ph.D. za umožnění měření v bezodrazové komoře. Rád bych také poděkoval Matějovi Vtípilovi za pomoc při měření úhlů.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

## Abstrakt

Tato práce se zabývá popisem metod používaných v rádiových systémech k určování polohy. Jsou popsány i jednotlivé metody sloužící k měření úhlů (AoA, AoD) a vzdáleností (RSSI, TOA, TDOA) a způsoby, jak lze z těchto hodnot získat polohu.

V práci jsou také popsány statistické veličiny sloužící k reprezentaci změřených hodnot úhlů a vzdáleností. Jsou také shrnuty různé možnosti, jak vyjadřovat přesnost rádiových systémů pro určování polohy (CEP, R95, DRMS).

V rámci experimentu jsou s pomocí kitu U-blox XPLR-AOA-2 měřeny metodou AoA úhly a prozkoumán vliv různých podmínek měření na změřené hodnoty.

**Klíčová slova:** Určování polohy, Bluetooth LE, AoA, AoD, RSSI, TDOA, tag, kotva, RMS, DRMS, CEP, R95, U-blox

**Vedoucí:** prof. Ing. František Vejražka, CSc.

## Abstract

This thesis focuses on the description of methods used in radio systems for positioning. The individual methods used to measure angles (AoA, AoD) and distances (RSSI, TOA, TDOA) are briefly explained and the ways to obtain the position from these values are also described.

The thesis also describes statistical quantities used to represent the measured values of angles and distances. The various possibilities to describe the accuracy of radio positioning systems (CEP, R95, DRMS) are also summarized.

As part of the experiment, the angles are measured using the U-blox XPLR-AOA-2 kit using the AoA method. The influence of different measurement conditions on the measured values was also explored.

**Keywords:** Positioning, Bluetooth LE, AoA, AoD, RSSI, TDOA, tag, anchor point, RMS, DRMS, CEP, R95, U-blox

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	6.4 Závislost přijatého výkonu na úhlu natočení . . . . .	29
<b>2 Přesnosti rádiových systémů pro určování polohy</b>	<b>3</b>	6.5 Závislost rozdílu změřeného úhlu a skutečného úhlu na úhlu natočení	30
2.1 Střední hodnota . . . . .	3	<b>7 Závěr</b>	<b>33</b>
2.2 Rozptyl a směrodatná odchylka . . . . .	4	<b>Literatura</b>	<b>35</b>
2.3 Distribuční funkce . . . . .	4		
2.4 Hustota pravděpodobnosti a histogram . . . . .	5		
<b>3 Způsoby vyjadřování přesnosti rádiových systémů pro určování polohy</b>	<b>9</b>		
3.1 DRMS . . . . .	9		
3.2 CEP . . . . .	9		
3.3 R95 . . . . .	10		
3.4 Přepočítání mezi způsoby vyjadřování přesnosti . . . . .	10		
<b>4 Metody rádiového určování polohy</b>	<b>11</b>		
4.1 Určování vzdálenosti . . . . .	11		
4.1.1 RSSI (Received signal strength indication) . . . . .	11		
4.1.2 TOA (Time of arrival) . . . . .	11		
4.1.3 TDOA (Time difference of arrival) . . . . .	12		
4.2 Určování úhlu . . . . .	12		
4.2.1 AoA (Angle of arrival) . . . . .	12		
4.2.2 AoD (Angle of departure) . . . . .	14		
4.3 Možnosti určení polohy . . . . .	15		
4.3.1 Z více změřených vzdáleností . . . . .	15		
4.3.2 Z více změřených úhlů . . . . .	16		
4.3.3 Ze změřené vzdálenosti a úhlu . . . . .	17		
<b>5 Popis vývojového kitu U-blox XPLR-AOA-2</b>	<b>19</b>		
5.1 Tagy . . . . .	19		
5.2 Kotvy . . . . .	20		
5.3 Měřené hodnoty . . . . .	21		
<b>6 Měření úhlů pomocí kitu od společnosti U-blox</b>	<b>23</b>		
6.1 Měření úhlu v bezodrazové komoře . . . . .	23		
6.2 Vliv vzdálenosti na změřené hodnoty úhlu . . . . .	25		
6.3 Vliv odrazů na změřené hodnoty úhlu . . . . .	27		

## Obrázky

2.1 Distribuční funkce veličiny s normálním rozdělením s nulovou střední hodnotou a jednotkovým rozptylem . . . . .	5
2.2 Hustota pravděpodobnosti veličiny s normálním rozdělením s nulovou střední hodnotou a jednotkovým rozptylem . . . . .	6
2.3 Histogram veličiny s normálním rozdělením s nulovou střední hodnotou a jednotkovým rozptylem	7
4.1 Možnosti rozmístění antén v kotvě	13
4.2 Metoda AoA . . . . .	13
4.3 Metoda AoD . . . . .	14
4.4 Určení polohy ve 2D ze tří změřených vzdáleností (např. RSSI)	15
4.5 Určení polohy ve 2D ze dvou změřených úhlů (např. AoA) . . . . .	16
4.6 Určení polohy ve 2D z jednoho úhlu a jedné vzdálenosti (např. AoA + RSSI) . . . . .	17
5.1 Tag C209 . . . . .	19
5.2 Tag C209 s krytem . . . . .	20
5.3 Kotva C211 . . . . .	21
6.1 Měření v bezodrazové komoře . .	24
6.2 Hustota pravděpodobnosti pro měření azimutu a elevace . . . . .	24
6.3 Distribuční funkce pro měření azimutu a elevace . . . . .	25
6.4 Hustota pravděpodobnosti pro měření ve dvou různých vzdálenostech . . . . .	26
6.5 Distribuční funkce pro měření ve dvou různých vzdálenostech . . . . .	27
6.6 Hustota pravděpodobnosti pro měření ve dvou různých prostředích	28
6.7 Distribuční funkce pro měření ve dvou různých prostředích . . . . .	29
6.8 Závislost střední hodnoty přijatého výkonu na azimutu . . . . .	30
6.9 Závislost střední hodnoty změřeného azimutu na skutečné hodnotě azimutu . . . . .	31
6.10 Závislost rozdílu měřeného a nastaveného azimutu na skutečné hodnotě azimutu . . . . .	32



## Tabulky

3.1 Tabulka převodních koeficientů vyjádření přesnosti polohy . . . . .	10
--	----



# Kapitola 1

## Úvod

Chceme-li určit polohu hledaného bodu, můžeme postupovat několika způsoby, a to buď tak, že určíme několik úhlů (minimálně dva) mezi tagem a kotvou nebo několik vzdáleností mezi tagem a kotvou (minimálně tři) [1].

Pro určování úhlu je v závislosti na využití možno použít více metod, zejména se využívá metoda AoA (Angle of arrival), která byla použita i pro experiment v této práci. Další možností je použít metodu AoD (Angle of departure) [2].

K určení vzdálenosti se používají především metody TOA (Time of arrival) a TDOA (Time difference of arrival) [1]. Nepotřebujeme-li měřit vzdálenost s velkou přesností a stačí nám určit vzdálenost pouze orientačně, můžeme použít i například metodu využívající RSSI (Received signal strength indication) [2].

Při žádném měření, ať už měříme úhel nebo vzdálenost, nemůžeme nikdy hodnotu určit přesně, neboť je každé měření zatíženo chybou. Pro reprezentaci zaměřených hodnot se využívají statistické veličiny jako je střední hodnota a rozptyl. Chceme-li znát přesnější rozložení změřených hodnot, můžeme také určit distribuční funkci, hustotu pravděpodobnosti či histogram [5].

V této práci bylo jako experiment zvoleno měření úhlu pomocí vývojového kitu XPLR-AOA-2 od společnosti U-blox. Ten využívá k měření úhlu metodu AoA a pracuje s Bluetooth LE (Low energy) signálem [3]. Cílem měření bylo určování úhlů metodou AoA a určení přesnosti tohoto vývojového kitu při měření v různých podmínkách.

Ze změřených hodnot lze polohu určit různými způsoby. K samotnému určení polohy můžeme využít buď pouze několik zaměřených hodnot úhlů, změřene vzdálenosti, nebo můžeme vzdálenost a úhel kombinovat.

Stejně jako v případě úhlu a vzdálenosti nemůžeme ani polohu určit naprosto přesně, neboť i každá určená poloha je zatížena chybou plynoucí z chyb při měření úhlů a vzdáleností. Pro popis přesnosti určené polohy se používají např. značení DRMS, CEP nebo R95 [8].



## Kapitola 2

### Přesnosti rádiových systémů pro určování polohy

Snažíme-li se určit vzdálenost či úhel, budou výsledky měření zatíženy chybou, která bude nabývat náhodných hodnot. Množinu těchto výsledků tedy můžeme nazvat náhodnou veličinou. Dále použijeme následující značení, náhodná veličina se nazývá  $X$  a nabývá různých hodnot  $x$ , tedy  $x_1, \dots, x_n$ . Každé z těchto hodnot nabývá s příslušnou pravděpodobností  $p_1, \dots, p_n$ . V případě spojité náhodné veličiny použijeme pro popis pravděpodobností tzv. hustotu pravděpodobnosti (viz kapitola 2.4) [5].

#### 2.1 Střední hodnota

Náhodnou veličinu  $X$  můžeme reprezentovat pomocí tzv. střední hodnoty, kterou obvykle značíme  $E[X]$ . Střední hodnota reprezentuje pomyslný „střed“, kolem kterého se nachází všechny hodnoty veličiny  $X$ . Pro spojitou náhodnou veličinu  $X$  platí dle [5], že:

$$E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x) dx \quad (2.1)$$

Pro diskrétní náhodnou veličinu  $X$  lze podle [5] definovat  $E[X]$  takto:

$$E[X] = \sum_i x_i p_i \quad (2.2)$$

## 2.2 Rozptyl a směrodatná odchylka

Rozptyl lze popsat tak, že vyjadřuje rozložení hodnot náhodné veličiny  $X$  oproti její střední hodnotě  $E(X)$ . Nejčastěji se pro rozptyl používá značení  $D(X)$ . Pro spojitou náhodnou veličinu  $X$  tedy platí podle [5], že:

$$D[X] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - E[X])^2 p(x) dx \quad (2.3)$$

Obdobně pro diskrétní náhodnou veličinu  $X$  dle [5] platí rovnice:

$$D[X] = \sum_i (x_i - E[X])^2 p_i \quad (2.4)$$

Z rovnic je patrné, že rozptyl souvisí se vzdáleností jednotlivých hodnot  $X$  od  $E(X)$ . Větší hodnota rozptylu tedy značí, že některé hodnoty se více vzdalují od střední hodnoty.

Kromě rozptylu lze náhodnou veličinu popsat i pomocí směrodatné odchylky, která se značí  $\sigma$ . Známe-li velikost rozptylu, je výpočet směrodatné odchylky jednoduchý, neboť se jedná pouze o odmocninu z hodnoty rozptylu náhodné veličiny  $X$  [5].

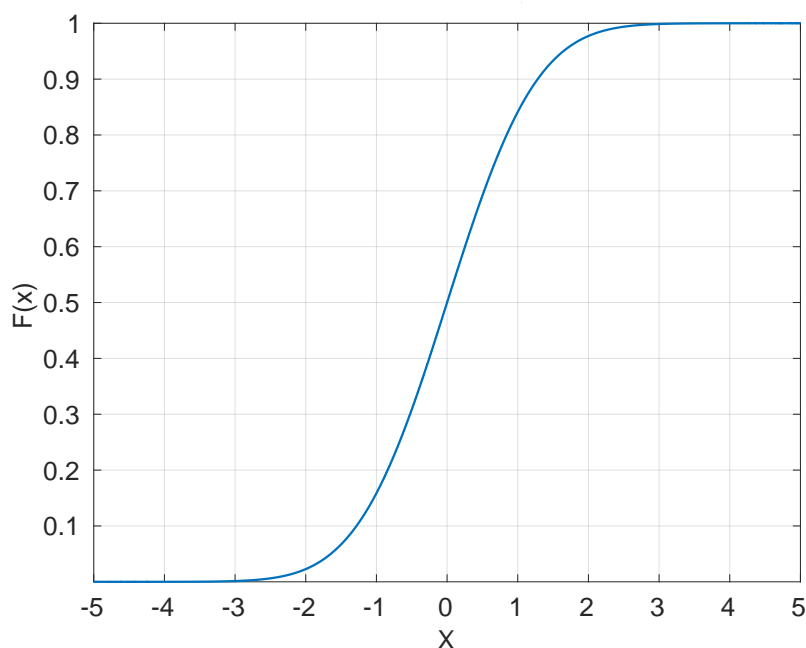
$$\sigma = +\sqrt{D(X)} \quad (2.5)$$

## 2.3 Distribuční funkce

Náhodnou veličinu  $X$  můžeme též popsat její distribuční funkcí  $F(x)$ . Pro  $F(x)$  se také často využívá anglické označení CDF (cumulative distribution function). Distribuční funkce popisuje pravděpodobnost, že náhodná veličina  $X$  nabývá menší hodnoty než číslo  $x$  [5]. Tedy platí, že:

$$F(x) = P(X < x) \quad (2.6)$$

Z podstaty distribuční funkce je patrné, že bude zprava omezena číslem 1, tedy bude existovat takové číslo  $x$ , pro které bude náhodná veličina ve 100 % případů nabývat menší hodnoty. Podobně zleva bude omezena nulou, tedy pro nějaké  $x$  nebudou existovat menší hodnoty  $X$ .



**Obrázek 2.1:** Distribuční funkce veličiny s normálním rozdělením s nulovou střední hodnotou ( $E[X] = 0$ ) a jednotkovým rozptylem ( $D[X] = 1$ )

Dále musí dle [5] platit i následující vlastnosti:

$$F(x_1) \leq F(x_2) \text{ pro } x_1 < x_2 \quad (2.7)$$

$$P(a \leq X < b) = F(b) - F(a) \quad (2.8)$$

## 2.4 Hustota pravděpodobnosti a histogram

Hustota pravděpodobnosti  $p(x)$  úzce souvisí s distribuční funkcí. Pomocí hustoty pravděpodobnosti můžeme integrováním získat pravděpodobnost, že se hodnota náhodné veličiny  $X$  nachází v nějakém intervalu [5]. Distribuční funkci taktéž nazýváme PDF z anglického probability density function.

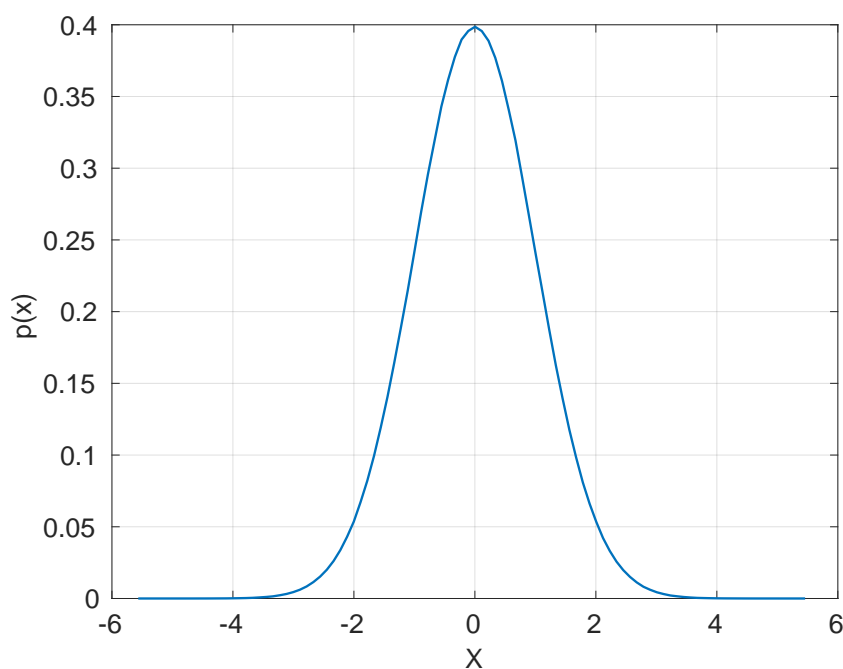
Pro distribuční funkci spojitě náhodné veličiny platí podle [5] následující vlastnosti:

$$p(x) \geq 0 \quad (2.9)$$

$$p(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (2.10)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1 \quad (2.11)$$

$$P(a \leq X < b) = \int_a^b p(x) dx \quad (2.12)$$



**Obrázek 2.2:** Hustota pravděpodobnosti veličiny s normálním rozdělením s nulovou střední hodnotou ( $E[X] = 0$ ) a jednotkovým rozptylem ( $D[X] = 1$ )

Podle [5] pro hustotu pravděpodobnosti diskrétní náhodné veličiny  $X$  platí, že:

$$p[x] = \sum_k p_k \delta(x - x_k) \quad (2.13)$$

kde  $\delta(x - x_k)$  je Diracův impuls, který je možno definovat například jako derivaci jednotkového skoku  $\eta(x - x_k)$  pomocí rovnice 2.14 [9].

$$\delta(x - x_k) = \frac{d\eta(x - x_k)}{dx} \quad (2.14)$$

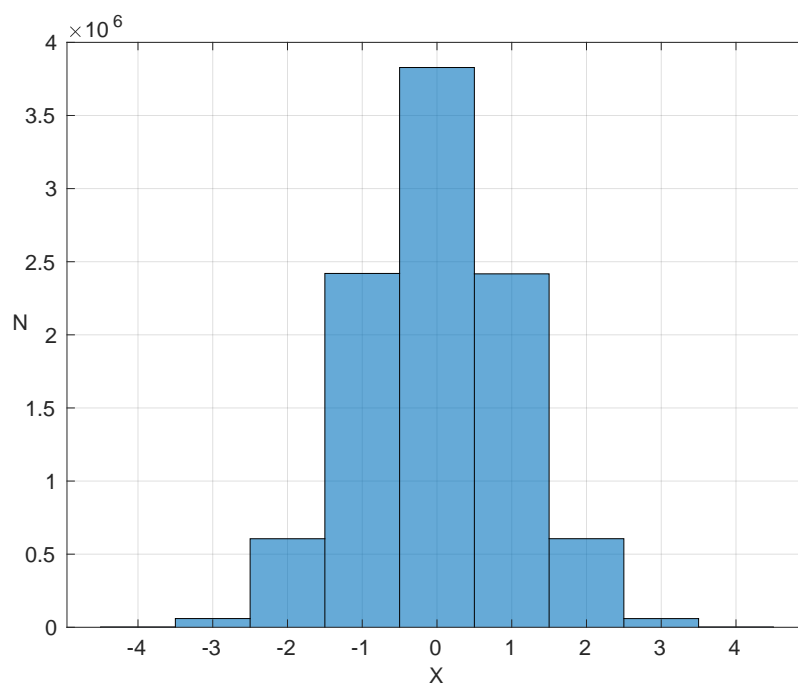
Pro Diracův impuls také platí vlastnosti popsané v rovnicích 2.15 a 2.16 [5].

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - x_k) dx = 1 \quad (2.15)$$

$$\delta(x - x_k) = \begin{cases} +\infty & \text{pro } x = x_k \\ 0 & \text{pro } x \neq x_k \end{cases} \quad (2.16)$$

Histogram narozdíl od hustoty pravděpodobnosti namísto pravděpodobnosti jednotlivých hodnot popisuje množství hodnot  $N$ , které se nachází v intervalu  $a \leq X < b$  vymezením šířkou sloupců. Z tvaru histogramu však lze také, stejně jako z hustoty pravděpodobnosti, získat odhad rozdělení dané náhodné veličiny.





**Obrázek 2.3:** Histogram veličiny s normálním rozdělením s nulovou střední hodnotou ( $E[X] = 0$ ) a jednotkovým rozptylem ( $D[X] = 1$ )



## Kapitola 3

### Způsoby vyjadřování přesnosti rádiových systémů pro určování polohy

Pro popis přesnosti rádiových systémů pro určování polohy v rovině se používá mnoho značení, mezi nejčastější však patří DRMS, nebo častěji CEP a R95, které popisují, kde se hledaný bod s nějakou určenou pravděpodobností nachází [8].

#### 3.1 DRMS

DRMS nebo-li Distance Root Mean Squared je hodnota používaná pro popis přesnosti určené polohy ve dvou rozměrech. Její výpočet vychází ze znalosti směrodatných odchylek (Root mean squared) polohy, respektive vzdálenosti, hledaného bodu v jednotlivých osách [8].

Budeme-li uvažovat osy  $x$  a  $y$ , pak směrodatnou odchylku polohy v ose  $x$  označíme  $\sigma_x$  a v ose  $y$  obdobně  $\sigma_y$ . Z těchto hodnot lze vypočítat hodnotu DRMS podle [8] dle následující rovnice:

$$DRMS = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (3.1)$$

Pro popis přesnosti lze též využít tzv. 2DRMS, které lze podle [8] určit jako dvojnásobnou hodnotu oproti DRMS následovně:

$$2DRMS = 2\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (3.2)$$

#### 3.2 CEP

Dalším možným značením přesnosti systému pro určení polohy je tzv. CEP (Circular error probable). Toto značení se využívá například ve specifikacích GNSS (global navigation satellite system) přijímačů.

CEP je definován jako poloměr kruhu, v jehož středu se nachází střední hodnota určené pozice, kterou lze určit ze středních hodnot jednotlivých vzdáleností v osách  $x$  a  $y$ . Tento poloměr je definován tak, že polovina, tedy 50 % změřených poloh hledaného bodu se musí nacházet uvnitř tohoto kruhu. Jinak řečeno tedy platí, že se skutečná poloha bude v tomto kruhu nacházet s 50% pravděpodobností [6, 8].

### 3.3 R95

Podobně jako CEP lze definovat i R95 (někdy též značeno jako R(95 %)), které nachází využití především ve vojenských aplikacích. V tomto případě však definujeme poloměr kruhu, do kterého spadá 95 % změřených hodnot [8].

Ten bude sice výrazně větší, než kruh definovaný pomocí CEP, ale bude obsahovat převážnou většinu změřených hodnot a skutečná poloha se tedy v něm bude nacházet s vyšší pravděpodobností.

### 3.4 Přepočet mezi způsoby vyjadřování přesnosti

Jednotlivé způsoby značení přesnosti rádiových systémů pro určování polohy lze mezi sebou za předpokladu, že chyba polohy má v každé ose normální rozdělení s nulovou střední hodnotou, převádět dle [8] pomocí koeficientů v tabulce 3.1.

<i>CEP</i>	<i>R95</i>	<i>DRMS</i>	<i>2DRMS</i>	<i>X/Y</i>
1	0,48	0,83	0,42	<i>CEP</i>
2,1	1	1,7	0,83	<i>R95</i>
1,2	0,6	1	0,5	<i>DRMS</i>
2,4	1,2	2	1	<i>2DRMS</i>

**Tabulka 3.1:** Tabulka převodních koeficientů vyjádření přesnosti polohy [8]

## Kapitola 4

### Metody rádiového určování polohy

#### 4.1 Určování vzdálenosti

Jednou z možností při určování polohy je určit vzdálenost hledaného místa od místa, kde měříme signál, a od kterého chceme vzdálenost znát. Metod, jak zjistit vzdálenost, je více, nejčastěji se však používají metody TOA (Time of arrival) a TDOA (Time difference of arrival) [1]. K prvotnímu odhadu vzdálenosti je možné použít i metodu RSSI (Received signal strength indication) [2].

##### 4.1.1 RSSI (Received signal strength indication)

Metoda RSSI je založená na principu měření přijatého výkonu. Známe-li výkon signálu na vysílací anténě (tato hodnota je většinou udávána v dBm) a známe závislost útlumu signálu v prostředí, kterým se signál šíří, na uražené vzdálenosti, můžeme ze změřené hodnoty výkonu na přijímací anténě zpětně dopočítat přibližnou vzdálenost vysílací a přijímací antény [2].

Tato metoda je v praxi často díky své jednoduchosti využívána, její použití je však vhodné pouze k prvotnímu odhadu vzdálenosti, neboť měření může být ovlivněno vlivy prostředí, kterým se signál šíří (např. vlhkost nebo teplota), a přesný popis jejich vlivu na měřený signál je obtížný [2]. Dále mohou také mít na měření vliv odrazy a výsledky závisí na anténních charakteristikách. Přesnost určené polohy pomocí RSSI je tedy relativně malá. Výhodou je, že k určení vzdálenosti stačí použít pouze jednu přijímací anténu a provést pouze měření výkonu.

##### 4.1.2 TOA (Time of arrival)

TOA je metoda založená na měření času mezi vysláním signálu z vysílací antény a jeho zachycením na přijímací anténě. Z této doby a rychlosti šíření signálu následně můžeme spočítat vzdálenost hledaného bodu od přijímací antény [1].

Při využití TOA je potřeba dobře časově synchronizovat obě antény, abychom na přijímači čas začali počítat přesně v okamžiku vyslání signálu. Pokud by k této synchronizaci nedošlo, mohli bychom měřit dobu

delší nebo kratší než je skutečná doba, za kterou signál dorazil k přijímací anténě. Hledaný bod bychom tedy určili ve špatné vzdálenosti (delší nebo kratší v závislosti na změřeném čase). Proto je před výpočtem vzdálenosti potřeba korigovat hodnotu změřeného času a tak započítat to, že se může čas v přijímači předbíhat nebo naopak zpoždovat [4].

### ■ 4.1.3 TDOA (Time difference of arrival)

Metoda TDOA využívá k určení vzdálenosti více přijímacích antén. Vychází z měření rozdílu doby, za jakou dorazí signál ke dvěma anténám o známé vzdálenosti od sebe [1]. Z této vzdálenosti a rozdílu časů můžeme následně zkonstruovat křivku, na které musí hledaný bod ležet. Budeme-li polohu určovat v rovině, leží v ideálním případě hledaný bod na hyperbole.

TDOA se k určení vzdálenosti v praxi používá častěji, protože dosahuje vyšší přesnosti než RSSI, k určení rozdílu vzdálenosti už je však potřeba složitější systém minimálně dvou dobře časově synchronizovaných přijímačů.

## ■ 4.2 Určování úhlu

Kromě vzdálenosti lze také určovat úhel k hledanému místu. Máme-li soustavu s jedním pohyblivým bodem, jehož polohu chceme znát (používá se označení tag), a několika stacionárními kotvami (anglicky anchor points), které slouží k určení polohy, používají se pro určení úhlu metody AoA (Angle of arrival) a AoD (Angle of departure) [2].

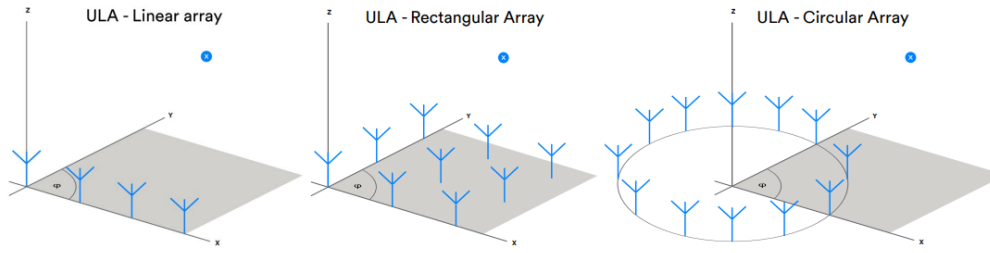
Tyto metody fungují na podobném principu, ale vzhledem k jejich rozdílům nacházejí v praxi jiná využití popsaná v kapitolách 4.2.1 a 4.2.2.

### ■ 4.2.1 AoA (Angle of arrival)

Pro určování úhlu od kotvy k tagu se nejběžněji používá metoda AoA. Systémy využívající AoA mají v tagu umístěnou jednu vysílací anténu. Signál z této antény je přijímán jednou nebo více kotvami, ve kterých je umístěno několik antén v anténní řadě [2].

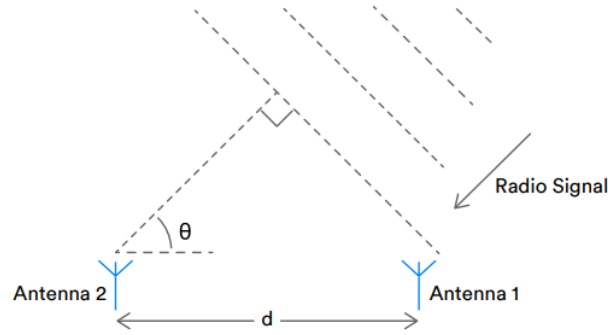
K určení úhlu jsou zapotřebí minimálně dvě antény. Možností, jak antény v kotvách rozmístit, je mnoho. Některé možnosti rozmístění antén jsou znázorněny na obrázku 4.1. Zkratka ULA vychází z anglického Uniform Linear Array, pro jiné než lineární rozložení lze využít i zkratky UCA (Uniform Circular Array) nebo například URA (Uniform Rectangular Array) [2].

Umístíme-li antény pouze do jedné osy, můžeme určovat pouze jeden úhel v rovině těchto antén, přidáme-li další antény v jiné ose, můžeme určit úhly více [3].



**Obrázek 4.1:** Možnosti rozmístění antén v kotvě [2]

V závislosti na úhlu dorazí vlna na každou anténu s různou fází. Předpokládáme-li, že přijímaná vlna je rovinná a známe-li vzdálenost antén, viz obrázek 4.2, můžeme ze změřených fází signálu na anténách určit fázový rozdíl [2].



**Obrázek 4.2:** Metoda AoA [2]

Z něj můžeme následně vypočítat úhel dle rovnice 4.1, kde  $\psi$  je fázový rozdíl,  $\lambda$  je vlnová délka,  $d$  je vzdálenost antén a  $\Theta$  je zjišťovaný úhel [2].

$$\Theta = \arccos\left(\frac{\psi\lambda}{2\pi d}\right) \quad (4.1)$$

Vzhledem k tomu, že se úhel vyhodnocuje v kotvách, je tato metoda využívána, pokud potřebujeme z nějakého místa sledovat pohyb jednoho či více tagů.

Vzhledem k tomu, že uvažujeme, že vlna dopadající na kotvu je rovinná, nesmí se tag kvůli správnému určení úhlu nacházet v blízkosti kotvy. Měl by se nacházet v tzv. vzdálené (nebo též Fraunhoferově) zóně. Vyzařovací charakteristika se v této zóně už nemění se vzdáleností a složky pole jsou kolmé na směr šíření vlny [7]. Minimální vzdálenost pro vzdálenou zónu lze určit dle [7] následujícím vzorcem (4.2), kde  $R$  je vzdálenost,  $\lambda$  je vlnová délka a  $D$  je maximální rozměr antény.

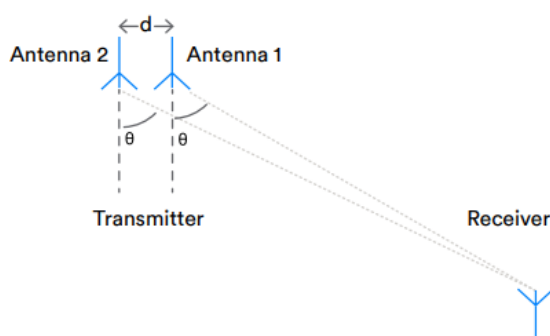
$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.2)$$

Měření může být navíc ovlivněno odrazy, které způsobí chybně změřenou fázi signálu na přijímací anténě.

### 4.2.2 AoD (Angle of departure)

Metoda AoD používá stejně jako AoA k určení úhlu fázový rozdíl. Anténní řada v kotvách však slouží v tomto případě k vysílání signálu [2]. Tento signál je detekován tagem (viz obrázek 4.3) a zpracováván tak, aby bylo možné podle [2] vypočítat úhel z rovnice 4.3. Veličiny zůstávají stejné jako u metody AoA, tedy  $\psi$  je fázový rozdíl,  $\lambda$  je vlnová délka,  $d$  je vzdálenost antén a  $\Theta$  je zjišťovaný úhel.

$$\Theta = \arcsin\left(\frac{\psi\lambda}{2\pi d}\right) \quad (4.3)$$



Obrázek 4.3: Metoda AoD [2]

Úhel je tedy v tomto případě zjišťován v místě tagu, a proto se AoD hodí především v aplikacích, kde pohybující se uživatel s tagem chce znát svou polohu vůči stacionárním kotvám.

Antény v kotvě v ideálním případě nevysílají signál najednou, ale dochází k rychlému postupnému přepínání mezi anténami, aby se zabránilo interferenci signálů z jednotlivých antén.

Přesnost metody je srovnatelná s metodou AOA, neboť fungují na podobném principu, mění se pouze místo, kde se změřený signál vyhodnocuje.



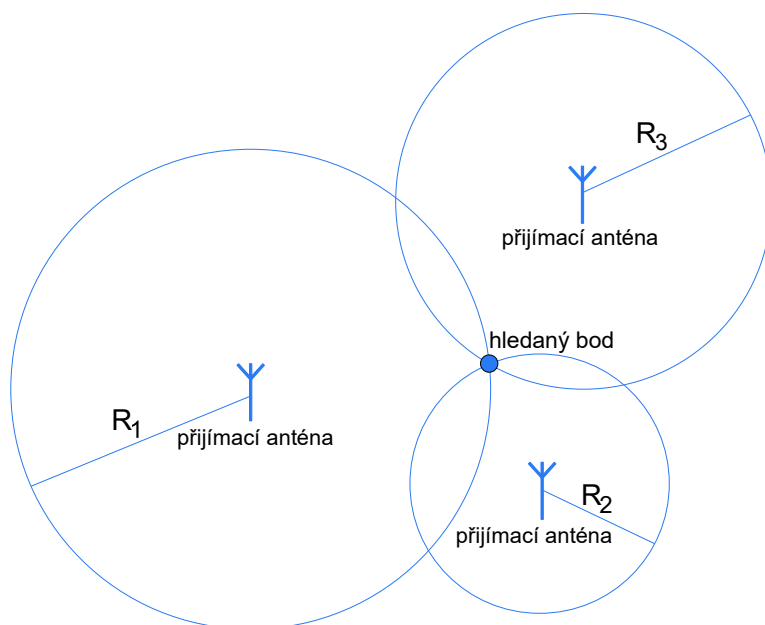
## 4.3 Možnosti určení polohy

Způsobů, jak ze změřených úhlů a vzdáleností určit polohu je mnoho, různé metody dokaží zjistit polohu s různými přesnostmi. Obecně však lze říct, že od čím více kotev úhel nebo vzdálenost měříme, tím přesnější by měl být výsledek.

### 4.3.1 Z více změřených vzdáleností

Množina všech bodů, které jsou stejně vzdálené od kotvy, je v rovině kružnice. Známe-li tedy vzdálenost  $R$  k tagu, víme, že tag leží na kružnici, v jejímž středu je umístěna příslušná kotva a jejíž poloměr je určená vzdálenost  $R$ .

Využijeme-li vzdálenosti změřené od tří a více kotev, protnou se v ideálním případě všechny kružnice v jednom bodě, kde se nachází tag, jak je ukázáno na obrázku 4.4. Této metodě se říká trilaterace [1].



**Obrázek 4.4:** Určení polohy ve 2D ze tří změřených vzdáleností (např. RSSI)

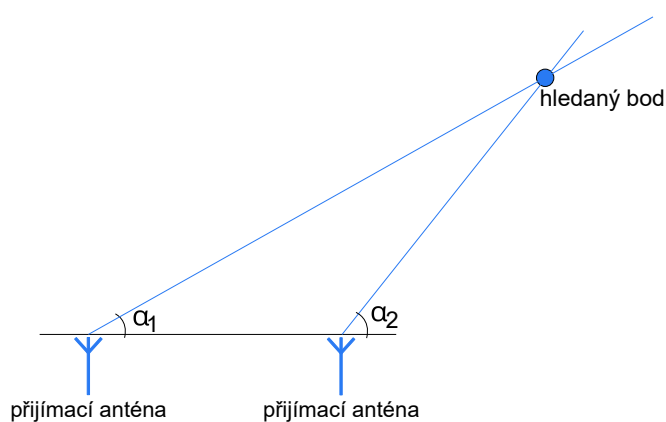
Ve skutečnosti neznáme přesnou hodnotu vzdálenosti. Uvažujeme-li i přesnost, leží bod v mezikruží vymezeném odchylkami od skutečné hodnoty. Při použití více vzdáleností by se tag nacházel v ploše vymezené všemi mezikružími. V tomto případě přesnost určené polohy velmi závisí na úhlu, pod kterým se jednotlivé kružnice protínají, nejlepších výsledků lze dosáhnout pokud jsou na sebe kružnice v místě průsečíku co nejkolmější.

Pokud bychom chtěli určovat i výšku, musíme namísto kružnice uvažovat, že hledaný bod leží na povrchu koule a hledat průsečíky koulí.

V případě použití TDOA je situace obdobná, avšak místo průsečíků kružnic určíme, kde se protínají hyperboly.

### 4.3.2 Z více změřených úhlů

V tomto případě získáme polopřímku pod úhlem  $\alpha$ , na které musí hledaný bod ležet. Využijeme-li však více antén, můžeme udělat průsečík těchto polopřímek a nalézt tak hledanou pozici (viz obrázek 4.5). Tato metoda je též známá jako triangulace [1].

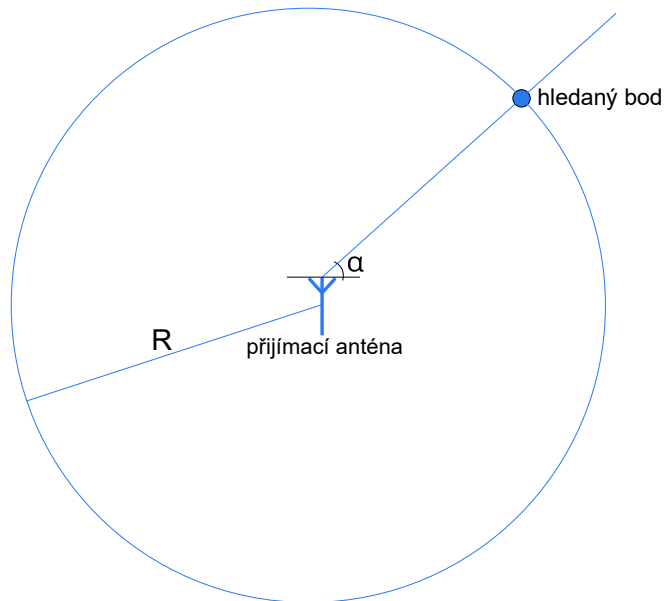


**Obrázek 4.5:** Určení polohy ve 2D ze dvou změřených úhlů (např. AoA)

Při započítání nepřesnosti stejně jako v předchozích bodech nezískáme pouze jeden bod, ale úhly vymezenou plochu, ve které se tag nachází. Pro zvětšení přesnosti je v tomto případě stejně jako u určování polohy ze vzdáleností vhodné, aby se přímky protínaly pokud možno kolmo na sebe.

### 4.3.3 Ze změřené vzdálenosti a úhlu

Změřenou vzdálenost  $R$  můžeme také zkombinovat s úhlem  $\alpha$ . Hledaný bod leží na kružnici (případně kouli) určené změřenou vzdáleností  $R$ . Ze změřeného úhlu  $\alpha$  navíc získáme polopřímku začínající v kotvě a směřující k hledanému bodu, který leží na průsečíku této polopřímky s určenou kružnicí (nebo koulí), jak je znázorněno na obrázku 4.6.



**Obrázek 4.6:** Určení polohy ve 2D z jednoho úhlu a jedné vzdálenosti (např. AoA + RSSI)

V reálném případě opět známe velikost úhlu s omezenou přesností, zjištěná plocha tedy opět nebude bod, ale část kružnice nebo koule.

Výhodou této metody je, že máme-li kružnici (případně kouli), a polopřímku, jež vychází z jejího středu, budou se vždy protínat kolmo na sebe.



## Kapitola 5

### Popis vývojového kitu U-blox XPLR-AOA-2

Kit U-blox XPLR-AOA-2 slouží k určování úhlů mezi pohyblivým tagem a stacionární kotvou, na které je anténní pole. K určení úhlu je používána metoda AoA (Angle of arrival). Používaným signálem, jehož fázi měříme je v případě tohoto kitu Bluetooth LE (Low energy) [3]. To umožňuje určovat úhly na vzdálenost řádově desítek metrů s velmi malou spotřebou energie [10].

#### 5.1 Tagy

V kitu se nacházejí čtyři tagy U-blox C209 s Bluetooth LE modulem NINA-B406 [3]. Tagy v určeném intervalu vysílají signál, který je zachycený kotvou a dále zpracováván pro určení úhlu od kotvy k tagu. Jeden z tagů je na obrázku 5.1.

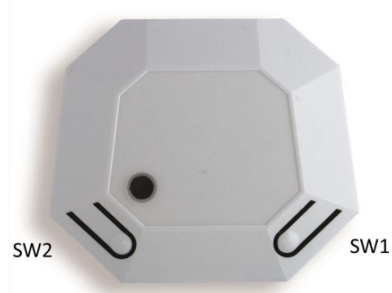


Obrázek 5.1: Tag C209 [3]

Tlačítko SW1 (viz obrázek 5.2) slouží k restartování tagu. Tag lze totiž nastavovat pouze 10 sekund po restartu a při každé nově nastavené konfiguraci je nutno tag znovu restartovat [3].

Tlačítko SW2 (viz obrázek 5.2) slouží ke změně intervalu mezi jednotlivými vysláními signálu z tagu. Tento interval je v základu nastaven na 20 ms, ale je možno nastavit i delší intervaly, a to 100 ms a 1000 ms [3].

Další nastavení se provádí pomocí tzv. AT příkazů. Slouží například k vypnutí tagu (příkaz `AT+CPWROFF`) nebo je možno i nastavit vysílací výkon tagu. K nastavení vysílacího výkonu používáme příkaz `AT+TXPWR=<?>`, kde za rovnítko uvedeme hodnotu výkonu, kterou chceme nastavit, všechny hodnoty



**Obrázek 5.2:** Tag C209 s krytem [3]

jsou uvedeny v dBm [3]. Tag umožňuje dle dokumentace [3] nastavení jedné z těchto definovaných hodnot v dBm: -40, -30, -20, -16, -12, -8, -4, 0, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. Při nižší hodnotě vysílacího výkonu se sníží vzdálenost, na kterou bude schopna kotva signál z tagu zachytit, ale zároveň se u tagu sníží i spotřeba energie (tag je napájen jednou CR2032 baterií).

Nastavení probíhá pomocí programu s-center od společnosti U-blox a pro správné připojení tagu k PC je potřeba dle dokumentace [3] nastavit následující parametry:

1. Baud rate: 115200 kbps
2. 8 data bits, no parity, 1 stop bit (8-N-1)
3. Flow control: RTS/CTS

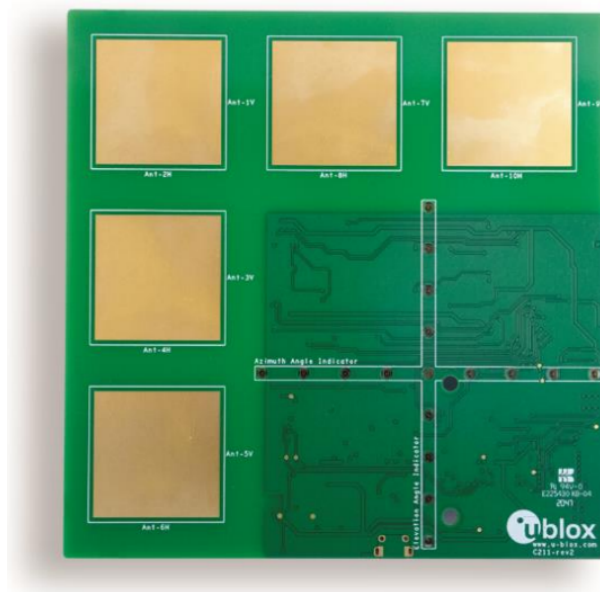
## 5.2 Kotvy

Kromě tagů jsou součástí kitu také čtyři kotvy U-blox C211 s Bluetooth LE modulem NINA B-411 [3]. Na každé kotvě se nachází pět antén, které umožňují měření fáze a výkonu přijatého signálu. Rozložení antén v kotvě je vidět na obrázku 5.3.

Ze změřených fází signálu se následně vypočte fázový rozdíl a z něj vypočítá úhel k tagu. Je-li kotva umístěna stejně jako na obrázku 5.3, umožňuje měření azimutu a elevace [3].

Kromě antén se na kotvě také nachází sada LED diod, které přibližně ukazují směr k tagu. Každá kotva dokáže sledovat najednou pouze jeden tag, a to poslední zaznamenaný.

Nastavování kotvy probíhá stejným způsobem jako v případě tagu po připojení k PC pomocí AT příkazů a programu s-center. Pomocí příkazu `+UDFCFG:<param_tag>,<param_value>` lze například nastavit minimální interval mezi jednotlivými přijatými signály (`+UDFCFG:1,<interval v ms>`) nebo nastavovat, jestli kotva počítá pouze azimut (`+UDFCFG:5,0`) nebo azimut i elevaci (`+UDFCFG:5,1`).



Obrázek 5.3: Kotva C211 [3]

### 5.3 Měřené hodnoty

Stejným způsobem, jako se tagy a kotvy nastavují pomocí AT příkazů, lze po připojení kotvy k PC například pomocí programu s-center od společnosti U-blox nebo pomocí PuTTY přijímat z kotvy změřená data.

Úhel je měřen pouze na jednotky stupňů, neboť datovým typem změřeného úhlu je integer [3]. Změřená data mají specifický formát a mohou vypadat například takto:

```
+UUDF:CCF9579B0B7B,-79,-10,0,-67,37,"CCF9579B2221","",884691
```

Dle dokumentace [3] kitu XPLR-AOA-2 znamenají jednotlivé hodnoty následující:

1. Na prvním místě (CCF9579B0B7B) je ID příslušné kotvy.
2. Následně (-79) je RSSI jedné polarizace v dBm.
3. Na třetím místě (-10) je hodnota azimutu ve stupních.
4. Další (0) je hodnota elevace ve stupních.
5. Následuje (-67) RSSI druhé polarizace v dBm.
6. Poté se zde (37) nachází číslo příslušného kanálu Bluetooth.
7. Na sedmém místě (CCF9579B2221) je ID tagu, který vyslal zachycený signál.
8. Předposlední ("") může být uživatelem nadefinovaný text (string).
9. Na posledním místě (884691) je čas v ms od zapnutí kotvy.





## Kapitola 6

### Měření úhlů pomocí kitu od společnosti U-blox

S kitem XPLR-AOA-2 bylo provedeno několik sad měření úhlu pomocí metody AoA. Byl měřen azimut i elevace a stanovené střední hodnoty a rozptyly. Dále byly pro jednotlivá měření určeny hustoty pravděpodobnosti a distribuční funkce.

Byl také porovnán vliv některých podmínek měření na hodnotu měřeného úhlu, bylo např. porovnáno, jak se hodnoty změní, změníme-li vzdálenost kotvy od tagu nebo jak se změní při změně prostředí v důsledku odrazů.

Také bylo určeno, jaké hodnoty úhlu jsou a přijatého výkonu jsou měřeny pro různé úhly natočení kotvy vůči tagu v rovině azimutu.

#### 6.1 Měření úhlu v bezodrazové komoře

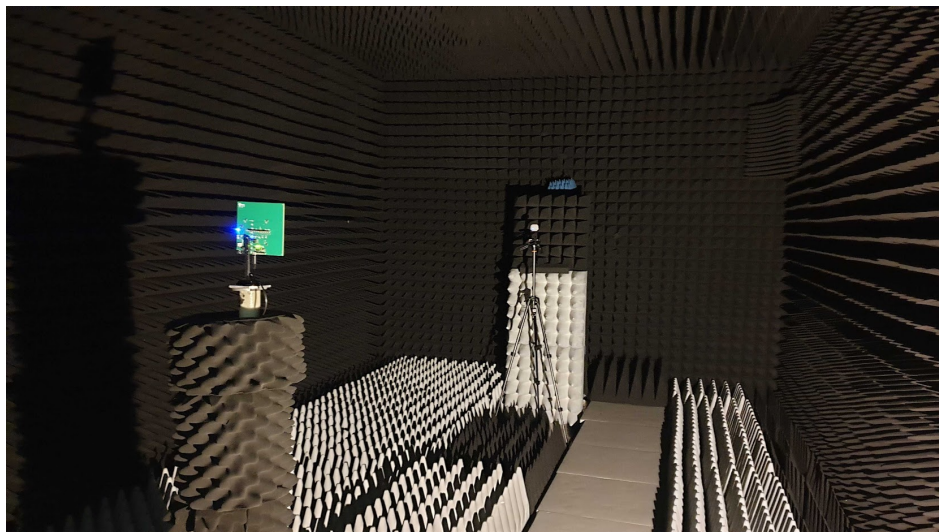
Podmínky měření:

1. Měřeno v bezodrazové komoře
2. Vzdálenost tagu od kotvy 3 m
3. Vysílací výkon tagu 0 dBm
4. Elevace nastavena na  $0^\circ$ , azimut také nastaven na  $0^\circ$
5. Měřena hodnota azimutu i elevace

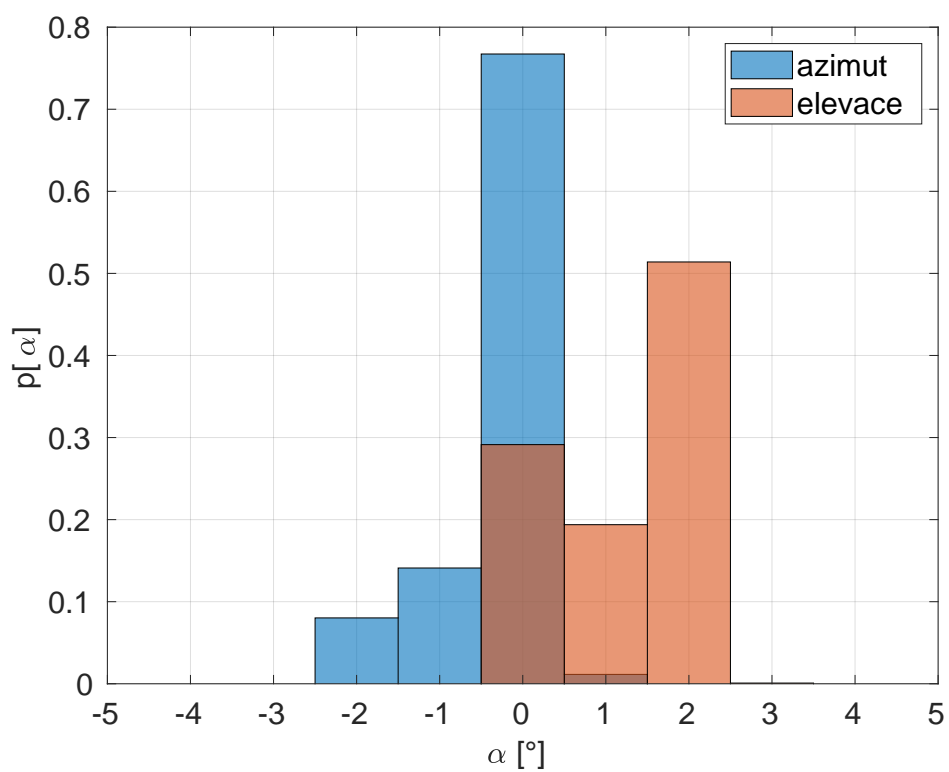
Při tomto měření byl určován úhel od kotvy k tagu ve dvou na sebe kolmých rovinách, konkrétně se jedná o měření azimutu a elevace. Samotné měření je možno vidět na obrázku 6.1.

Hodnota azimutu i elevace byla nastavena na  $0^\circ$ , čemuž odpovídají změřené střední hodnoty. Pro azimut je střední hodnota změřeného úhlu  $-0,29^\circ$  a pro elevaci je to  $1,22^\circ$ .

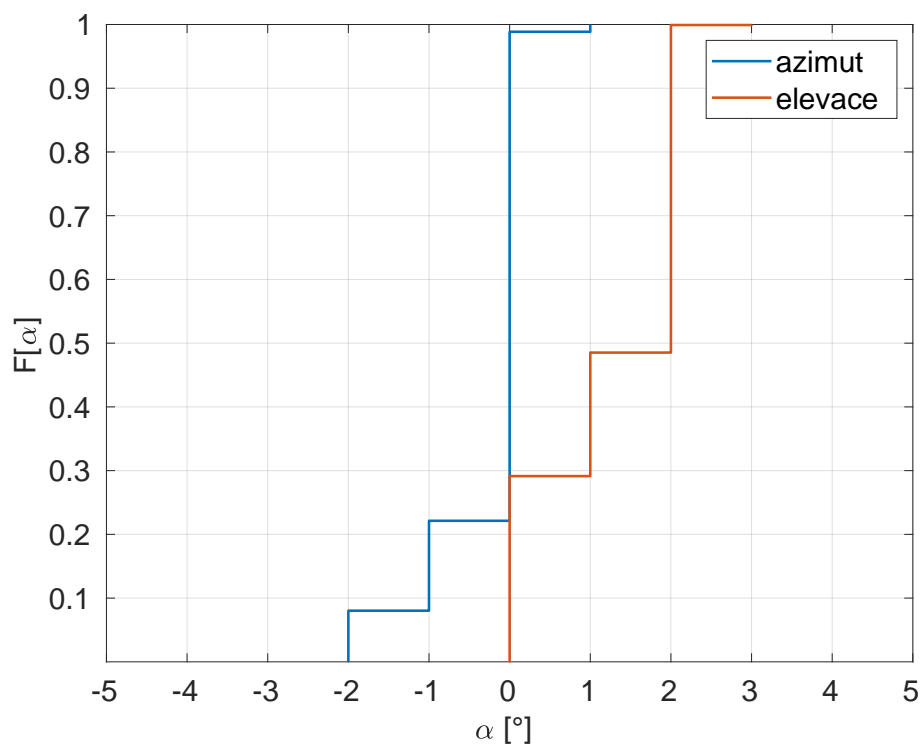
Z obrázků 6.2 a 6.3 vychází měření azimutu jako přesnější než měření elevace, důvodem tohoto rozdílu může být například směrová charakteristika antény v tagu, která může být v těchto na sebe kolmých rovinách odlišná. Obě měření však můžeme považovat za velmi přesná, neboť rozptyl je v obou případech minimální. V případě azimutu je to  $0,39^\circ$  a pro elevaci  $0,76^\circ$ .



Obrázek 6.1: Měření v bezodrazové komoře



Obrázek 6.2: Hustota pravděpodobnosti pro měření azimutu a elevace



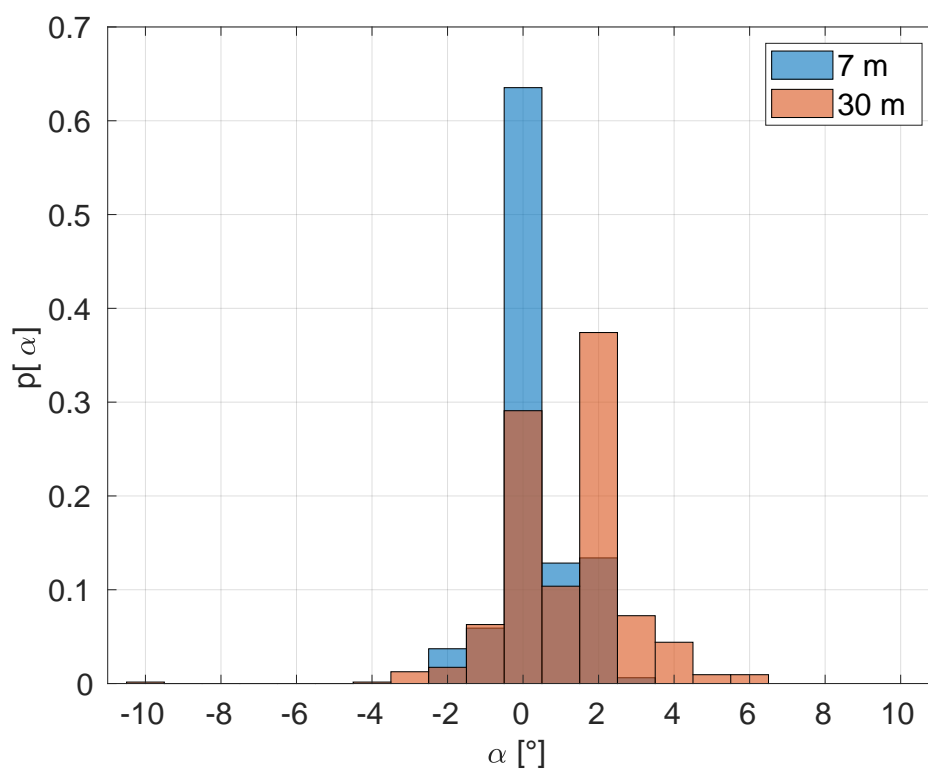
Obrázek 6.3: Distribuční funkce pro měření azimutu a elevace

## 6.2 Vliv vzdálenosti na změřené hodnoty úhlu

Podmínky měření:

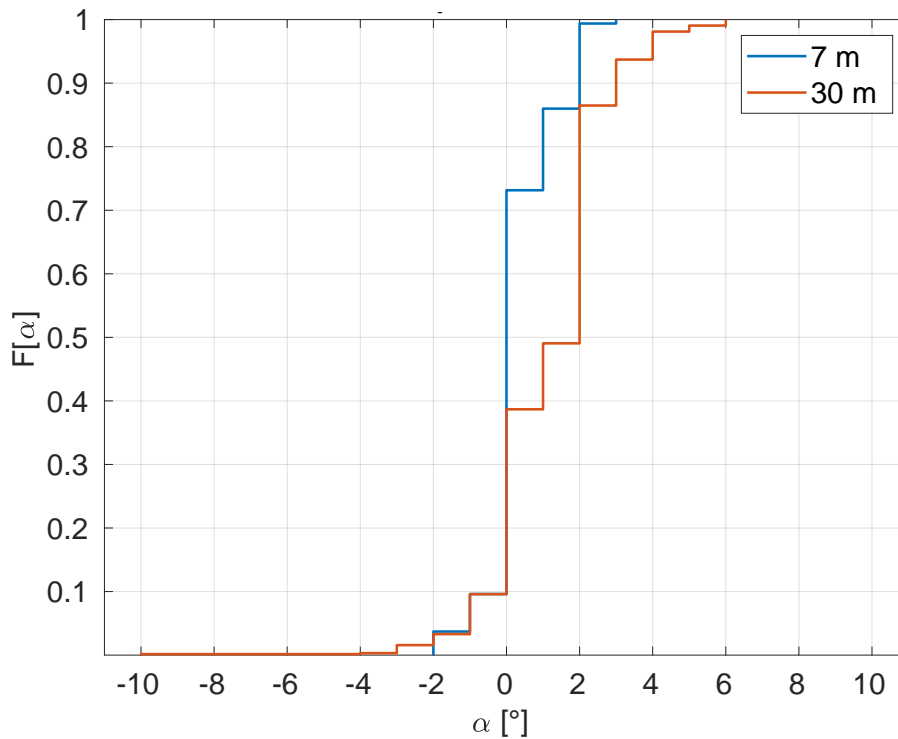
1. Měřeno ve venkovním prostředí
2. Vzdálenost tagu od kotvy 7 m a 30 m
3. Vysílací výkon tagu 8 dBm
4. Elevace konstantní nulová, azimut také nastaven na přibližně  $0^\circ$
5. Měřena hodnota azimutu

Pro toto měření bylo zvoleno venkovní prostředí (park), protože zde můžeme částečně eliminovat vliv odrazů na měření a oproti bezodrazové komoře bylo možné měřit na mnohem větší vzdálenosti. Azimut byl měřen pro dvě různé vzdálenosti tagu od kotvy, kvůli porovnání vlivu této vzdálenosti na měření. Azimut byl vždy nastaven na hodnotu blízkou nule, při měření na vzdálenost 7 m byla změřena střední hodnota  $0,28^\circ$  a při měření na 30 m to bylo  $1,19^\circ$ . Tyto hodnoty jsou si velmi blízké a měření tak můžeme porovnat.



**Obrázek 6.4:** Hustota pravděpodobnosti pro měření ve dvou různých vzdálenostech

Z obrázků 6.4 a 6.5 je patrné, že měření na kratší vzdálenost, v tomto případě 7 m, je přesnější, než-li měření na vzdálenost delší. Z hustoty pravděpodobnosti je vidět, že u kratší vzdálenosti změříme správnou hodnotu s větší pravděpodobností. Přesnost těchto měření je také možné popsat pomocí rozptylů, které jsou v případě měření na 7 m přibližně  $0,85^\circ$  a při měření na 30 m je rozptyl větší, a to konkrétně  $2,54^\circ$ . Tento kit je tedy vhodné používat spíše na kratší vzdálenosti.



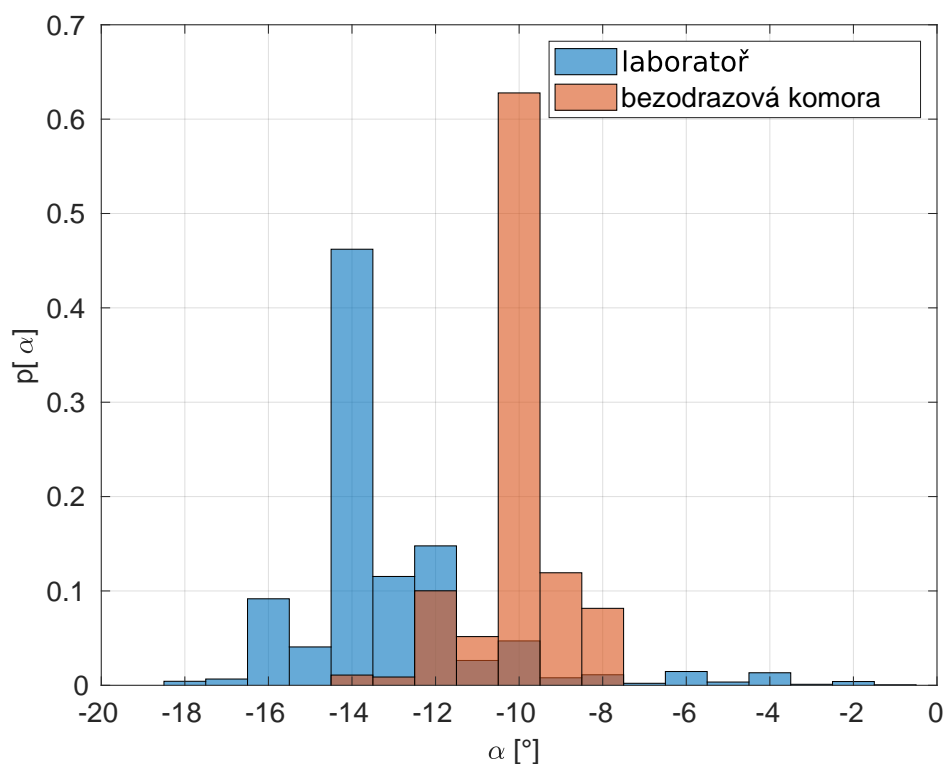
Obrázek 6.5: Distribuční funkce pro měření ve dvou různých vzdálenostech

### 6.3 Vliv odrazů na změřené hodnoty úhlu

Podmínky měření:

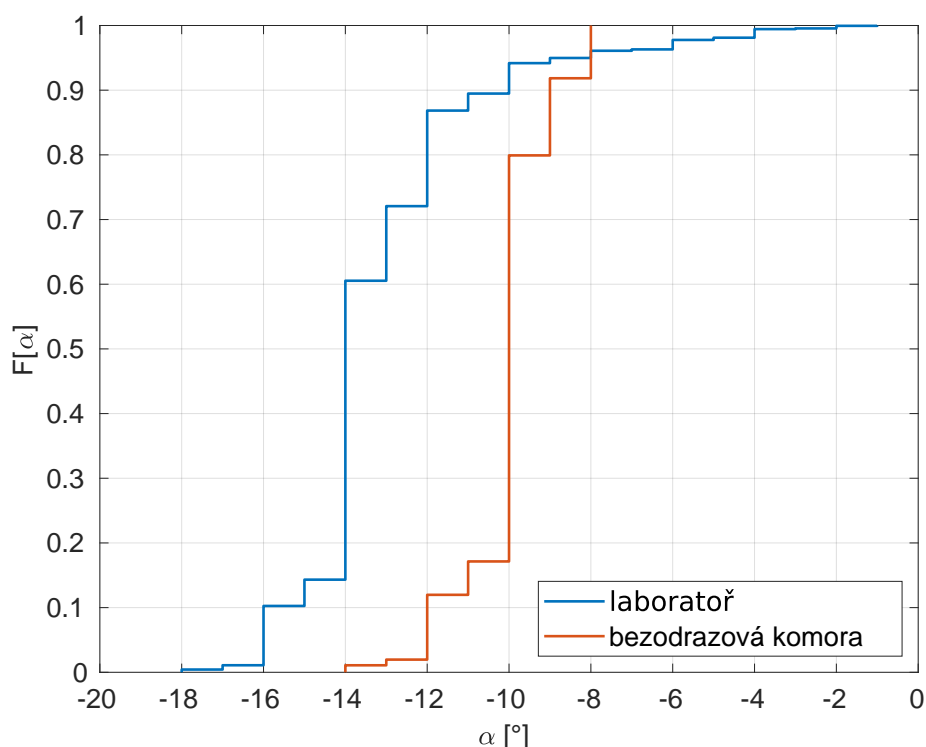
1. Měřeno v laboratoři a v bezodrazové komoře
2. Vzdálenost tagu od kotvy 3 m
3. Vysílací výkon tagu 0 dBm
4. Elevace konstantní nulová, azimut nastaven na  $-10^\circ$
5. Měřena hodnota azimutu

Tato sada měření slouží k ověření vlivu odrazů na měření úhlu. Byla proto zvolena dvě různá prostředí, a to v jednom případě bezodrazová komora a v druhém případě pro porovnání laboratoř. Nastavený azimut byl v obou případech stejný ( $-10^\circ$ ). Změřené střední hodnoty azimutu jsou  $-13,11^\circ$  v případě laboratoře a  $-10,04^\circ$  v případě bezodrazové komory.



**Obrázek 6.6:** Hustota pravděpodobnosti pro měření ve dvou různých prostředích

Z obrázků 6.6 a 6.7 lze říct, že měření v bezodrazové komoře bylo přesnější než měření v laboratoři. V případě bezodrazové komory jsou krajní hodnoty hustoty pravděpodobnosti mnohem blíže ke střední hodnotě než v případě laboratoře. Také bez vlivu odrazů je skutečná hodnota azimutu měřena s větší pravděpodobností. Totéž je patrné z vypočtených hodnot rozptylů, které jsou pro měření v bezodrazové komoře  $1,15^\circ$  a v laboratoři je to  $5,49^\circ$ . Pro optimální využití tohoto kitu je tedy lepší použití v prostředích, která jsou méně ovlivněna odrazy.



**Obrázek 6.7:** Distribuční funkce pro měření ve dvou různých prostředích

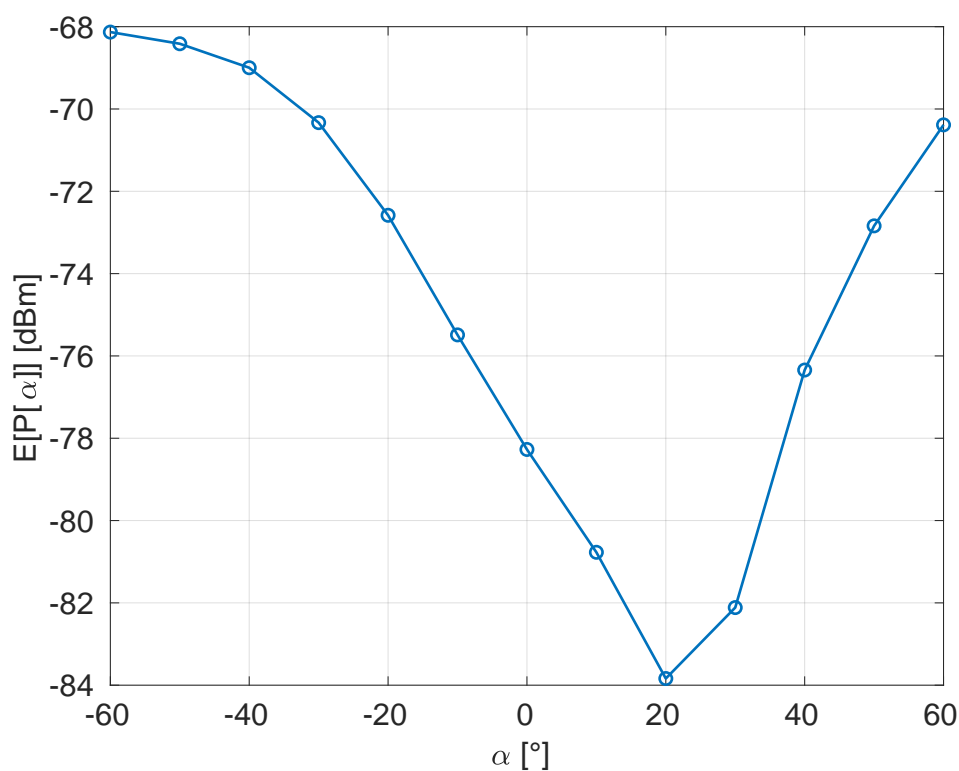
## 6.4 Závislost přijatého výkonu na úhlu natočení

Podmínky měření:

1. Měřeno v bezodrazové komoře
2. Vzdálenost tagu od kotvy 3 m
3. Vysílací výkon tagu 0 dBm
4. Elevace konstantní nulová, měněn pouze azimut po  $10^\circ$  v rozmezí od  $-60^\circ$  do  $60^\circ$
5. Měřena hodnota přijatého výkonu kotvou

Z důvodu vyloučení vlivu odrazů probíhalo celé měření v bezodrazové komoře. Z grafu středních hodnot přijatých výkonů (obrázek 6.8) je patrné, že nejmenší hodnota výkonu byla přijata, byl-li azimut  $20^\circ$ . Při tomto úhlu bylo přijato o přibližně 16 dBm méně, než například při azimutu  $-60^\circ$ .

Závislost přijatého výkonu na úhlu je dána směrovou charakteristikou antén použitých v kotvě. Obecně lze z grafu naměřených hodnot (obrázek 6.8) říct, že měříme-li menší hodnoty úhlu, je zapotřebí vyšší vysílací výkon než kdybychom měřili úhly větší. Při nastavování vysílacího výkonu tagu je tedy vhodné ověřit, zda-li kotva signál zachytí pro menší úhly natočení, převážně tedy kolem  $20^\circ$ .



**Obrázek 6.8:** Závislost střední hodnoty přijatého výkonu na azimutu

## 6.5 Závislost rozdílu změřeného úhlu a skutečného úhlu na úhlu natočení

Podmínky měření:

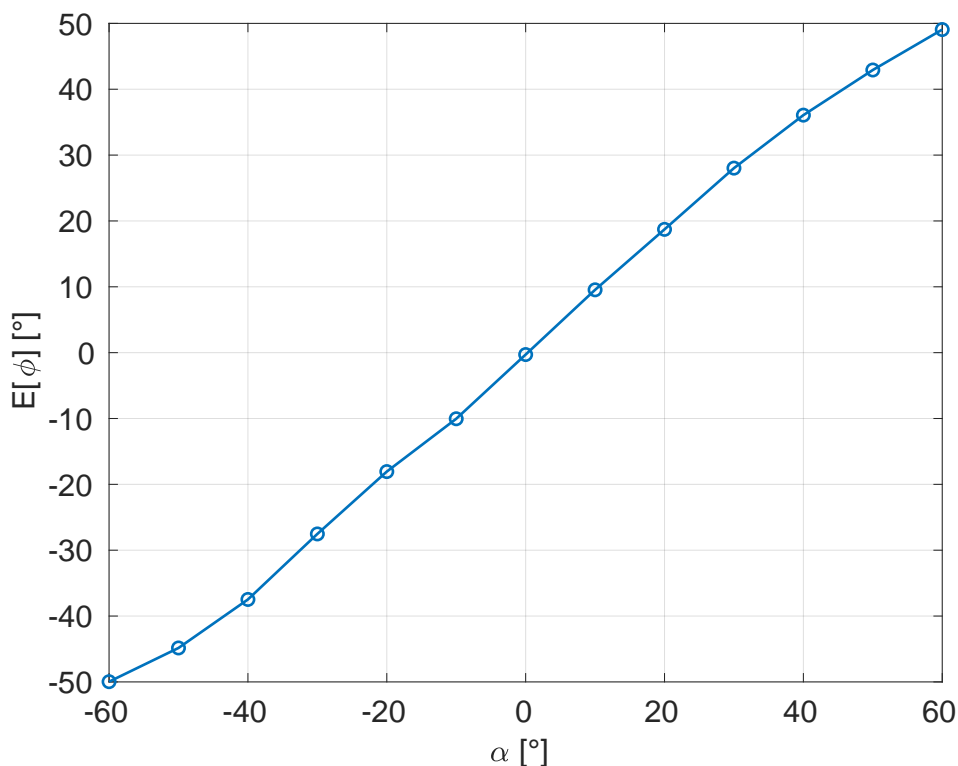
1. Měřeno v bezodrazové komoře
2. Vzdálenost tagu od kotvy 3 m
3. Vysílací výkon tagu 0 dBm
4. Elevace konstantní nulová, měněn pouze azimut po  $10^\circ$  v rozmezí od  $-60^\circ$  do  $60^\circ$
5. Měřena hodnota azimutu

Měření probíhalo současně s měřením výkonu, tedy opět v bezodrazové komoře z důvodu vyloučení vlivu odrazů. Úhel měřený kotvou nazveme  $\phi$ , zatímco skutečně nastavený azimut bude mít označení  $\alpha$ .

Graf na obrázku 6.9 znázorňuje pro jednotlivé nastavené úhly jaká byla střední hodnota úhlu změřeného kotvou. V úplně ideálním případě by tato střední hodnota měla být stejná jako skutečně nastavená hodnota (tedy  $E[\phi] = \alpha$ ). Ve skutečném případě je však z grafu patrné, že obzvláště u větších



úhlu je měřená hodnota velmi odlišná. Chceme-li tedy dosáhnout přesnějších hodnot, měli bychom kit využívat spíše k měření menších úhlů.



**Obrázek 6.9:** Závislost střední hodnoty změřeného azimutu na skutečné hodnotě azimutu

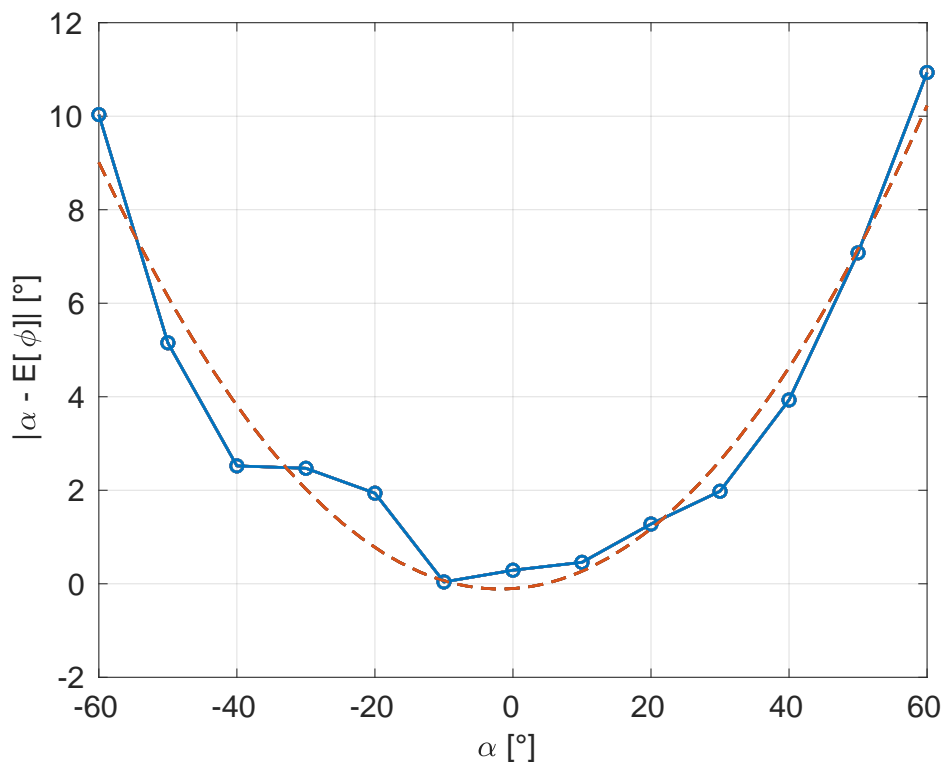
Tento fakt je lépe vidět na obrázku 6.10, který popisuje absolutní hodnotu rozdílu nastavené a změřené hodnoty azimutu. Lze říct, že tento rozdíl se s rostoucí hodnotou úhlu zvětšuje. Tato data je možné proložit parabolou, která popisuje závislost tohoto rozdílu na nastaveném úhlu. Použitá parabola, která byla získána pomocí metody nejmenších čtverců, je definována rovnicí  $|\alpha - E[\phi]| = 0.0027\alpha^2 + 0.0101\alpha - 0.1026$ . Pro menší hodnoty úhlu není potřeba změřené hodnoty úhlu korigovat, neboť se téměř shodují s nastavenou hodnotou. Pro vyšší hodnoty úhlu je však korekce nutná, neboť se změřená data hodně liší od nastavených hodnot. Pro tuto korekci je možné využít získanou parabolu.

Pro kladné změřené hodnoty úhlu je z obrázku 6.9 patrné, že střední hodnota změřeného úhlu je vždy menší než skutečně nastavený úhel. Hodnotu  $(\alpha - E[\phi])$  tedy můžeme v tomto případě považovat za kladnou. Při vyjádření hodnoty  $\alpha$  z rovnice paraboly následně získáme dvě rovnice. Pomocí jedné z nich můžeme ze změřené hodnoty úhlu přibližně určit skutečnou hodnotu nastaveného úhlu následovně:

$$\alpha = \frac{1}{54} (9899 - \sqrt{98101009 - 1080000 \cdot E[\phi]}) \quad (6.1)$$

Pro záporné změřené hodnoty úhlu je z obrázku 6.9 naopak patrné, že střední hodnota změřeného úhlu je vždy větší než skutečně nastavený úhel. Hodnotu  $(\alpha - E[\phi])$  tedy můžeme v tomto případě považovat za zápornou. Při vyjádření hodnoty  $\alpha$  z rovnice paraboly opět získáme dvě rovnice, z nichž jednu můžeme využít ke korekci změřené hodnoty úhlu:

$$\alpha = \frac{1}{18}(-3367 + \sqrt{11349001 + 120000 \cdot E[\phi]}) \quad (6.2)$$



**Obrázek 6.10:** Závislost rozdílu měřeného a nastaveného azimutu na skutečné hodnotě azimutu

# Kapitola 7

## Závěr

V této práci byly shrnuty různé metody, pomocí kterých je možné určovat polohu ze změřených hodnot úhlů a vzdáleností. Bylo také shrnuto, jak jednotlivé metody pro určení úhlů (AoA, AoD) a vzdáleností (RSSI, TOA, TDOA) fungují.

Vzhledem k tomu, že žádné měření není nikdy absolutně přesné, byly také popsány statistické veličiny pro vyjádření výsledku měření (střední hodnota, rozptyl) a způsoby jak lze reprezentovat rozložení změřených hodnot (hustota pravděpodobnosti, histogram, distribuční funkce).

S tím souvisí i popis jednotlivých způsobů vyjadřování přesnosti rádiových systémů, jako jsou např. CEP, R95 nebo DRMS. Byl také uveden postup, jakým lze mezi sebou tyto hodnoty přepočítávat.

V rámci experimentu bylo provedeno měření úhlu metodou AoA pomocí kitu U-blox XPLR-AOA-2. Bylo provedeno měření úhlu ve dvou na sebe kolmých rovinách (azimut i elevace) a dále bylo popsáno, jak některé podmínky měření mohou ovlivňovat změřené hodnoty úhlu.

Jedním z měření bylo zjišťování vlivu vzdálenosti tagu od kotvy na změřené hodnoty. Bylo zjištěno, že se snižující se vzdáleností jsou změřené hodnoty úhlu přesnější (výrazně menší rozptyl).

Dále byl také prozkoumán vliv odrazů na měření, ze kterého vychází, že chceme-li zpřesnit měření, je třeba co nejvíce omezit vliv odrazů.

Při měření úhlů a přijatých hodnot výkonu pro různé natočení kotvy vůči tagu bylo zjištěno, že kotva měří přesnější hodnoty při menších hodnotách úhlu, avšak hodnota přijatého výkonu je při těchto menších úhlech v porovnání s vyššími úhly znatelně nižší.

Z hlediska přesnosti je tedy ideální využívat tento kit pro měření spíše menších úhlů. Je však potřeba zvolit dostatečně velký vysílací výkon tagu. Je také vhodné kit používat v prostředí s co nejméně odrazy a volit kratší vzdálenosti mezi tagem a kotvou.

Kromě měření úhlu je možné do budoucna využít tento kit i v konfiguraci s více kotvami k určování polohy.





## Literatura

- [1] VEJRAŽKA, František. *Základní rádiová navigační zařízení*. [Skriptum]. Praha, ČVUT FEL, 1979.
- [2] WOOLLEY, Martin. *Bluetooth Direction Finding: A Technical Overview* [online]. 13. 10. 2021 [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/bluetooth-direction-finding/>
- [3] U-BLOX. *XPLR-AOA explorer kits: Bluetooth indoor direction finding user guide* [online]. 17. 9. 2021 [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/XPLR-AOA-Explorer-kits\\_UserGuide\\_UBX-21004616.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/XPLR-AOA-Explorer-kits_UserGuide_UBX-21004616.pdf)
- [4] KAPLAN, Elliott D. a Christopher J. HEGARTY. *Understanding GPS: Principles and Applications Second Edition*. Boston, Artech House, 2006. ISBN 1-58053-894-0.
- [5] VEJRAŽKA, František. *Sbírka příkladů z teorie rádiové komunikace I*. Praha, ČVUT FEL, 1982.
- [6] NELSON, William. THE MITRE CORPORATION. *Use of Circular Error Probability in Target Detection*. Bedford, 1988.
- [7] KOVAŘÍK, Pavel. *Anténní senzor pro měření vzdálenosti* [online]. Praha, 2016 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64731/F3-DP-2016-Kovarik-Pavel-Antenni\\_senzor\\_pro\\_mereni\\_vzdalenosti.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64731/F3-DP-2016-Kovarik-Pavel-Antenni_senzor_pro_mereni_vzdalenosti.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Diplomová práce. ČVUT FEL.
- [8] NOVATEL. *GPS Position Accuracy Measures* [online]. Calgary, 2003, 2-4 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: [https://www.gnss.ca/app\\_notes/APN-029\\_GPS\\_Position\\_Accuracy\\_Measures\\_Application\\_Note.html](https://www.gnss.ca/app_notes/APN-029_GPS_Position_Accuracy_Measures_Application_Note.html)
- [9] VEJRAŽKA, František a Zdeněk HRDINA. *Signály a soustavy*. [Skriptum]. Praha, ČVUT, 1997.

- [10] MIKÉSKA, Zdeněk. *Specifikace rádiové části systému Bluetooth*. *Elektrorevue* [online]. 14. 1. 2004, **2004**(3) [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04003/index.html#Kapitola>