

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Výukový systém pro určení směru příchodu signálu

Marek Malý

Bakalářská práce

2021

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Marek Malý**
Osobní číslo: **I18048**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Téma práce: **Výukový systém pro určení směru příchodu signálu**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je navrhnout simulátor výukového systému pro určení směru příchodu signálu (interferometr), který bude sloužit k demonstraci v rámci výuky radiových signálů a prezentaci pro veřejnost. Simulátor bude umožňovat nastavení libovolných konfigurací pozic přijímacích antén, pozici vysílače a nastavení vysílací frekvence. V teoretické části student nastuduje problematiku měření směru příchodu signálu. V praktické části student na základě poznatků navrhne simulátor a analyzuje přesnost zjištění směru příchodu signálu z hlediska počtu přijímačů, pozic přijímačů a vysílače, vzdálenost vysílače od přijímačů. Student otestuje simulátor na reálném měření směru příchodu signálu pomocí softwarově definovaného rádia.

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

ZÁLABSKÝ, Tomáš. Řídké antény pro příjem signálů odpovídačů sekundárních radiolokátorů. Pardubice, 2018. Disertační práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Prof. Ing. Pavel Bezoušek, CSc.
KUNCOVÁ, Eliška. VZNIK, VÝVOJ A SOUČASNÁ PODOBA RÁDIOVÉHO ORIENTAČNÍHO BĚHU V ČESKÉ REPUBLICE. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Mgr. Ilona Kolovská.
AMUNDSON, I., SALLAI, J., KOUTSOUKOS, X. and LEDECZI, A., 2010. Radio interferometric angle of arrival estimation.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Karel Juryca
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce:

15. listopadu 2020

Termín odevzdání bakalářské práce:

14. května 2021

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Jan Pidanič, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. ledna 2021

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 20. 08. 2021

Marek Malý

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlu Jurycovi za cenné rady, připomínky a konzultace během vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu, kterou mi poskytují po celou dobu mého studia. Na závěr bych také rád poděkoval Fakultě Elektrotechniky a Informatiky Pardubice za vypůjčení vybavení.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá procesem určování směru příchodu signálu. Teoretická část je věnována problematice měření směru signálu. V praktické části je popsán vývoj simulačního programu v prostředí Matlab, určeného pro simulaci a následnou vizualizaci změřených hodnot. Simulátor byl použit pro analýzu vlivů přesnosti příchodu signálu. Na závěr práce je uvedena ukázka reálného měření, přes které byl simulátor otestován.

Klíčová slova

Směr příchodu signálu, Matlab, Simulátor, Interferometr

Title

Educational system for determining the direction of signal arrival

Annotation

The bachelor thesis deals with the direction-finding of a transmitted signal. The theoretical part of the thesis is focused on various methods of direction-finding. The practical part of the thesis is specifically focused on the interferometer direction-finding method. The practical part is divided into three sections. The first section is about the design of the simulator. Influences affecting the accuracy of the direction of a transmitted signal measurement are described in the second section. The last part is focused on the verification measurements of the simulator.

Keywords

Direction finding, Matlab, Simulator, Interferometer

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Úvod	11
1 Hledání směru příchodu signálů	12
1.1 Metoda časového posunu	12
1.2 Metoda skenovacího paprsku	17
1.3 Watson-Wattova metoda	20
1.4 Metody s využitím Dopplerova jevu	21
1.5 Metoda fázového posunu.....	25
2 Popis simulátoru	28
2.1 Výstupy simulátoru	28
2.2 Vytváření anténních soustav a výpočet časových složek	34
2.3 Zjištění potenciálního rozsahu úhlů první přijímací antény	34
2.4 Výpočet možných úhlů	36
2.5 Zjištění správného úhlu	37
3 Analýza vlivů ovlivňující přesnost měření	41
3.1 Vliv vzdálenosti mezi vysílačem a přijímací soustavou.....	41
3.2 Vliv zlomových úhlů	41
3.3 Vliv počtu antén v přijímací soustavě	42
4 Měření	44
4.1 Vektorový generátor SM300	44
4.2 Anténa VERT900	45
4.3 Koherentní přijímač NI-USRP-2945	46
4.4 GNU Radio	49
4.4.1 Popis programu softwarového přijímače	49
4.4.2 Přijímač a směšovač	50
4.4.3 Pásmová filtrace	50
4.4.4 Převod z komplexních dat na reálná.....	51
4.4.5 Uložení přijímaných signálů.....	51
4.4.6 Zobrazení přijímaných signálů	52

4.5	Zpracování naměřených dat.....	53
4.5.1	Upřesnění vzorkování signálu	53
4.5.2	Kalibrace a uložení hodnot	54
4.6	Realizace měření.....	54
4.6.1	Rozmístění antén	54
4.6.2	Vyhodnocení naměřených dat	56
4.6.3	Výpočet výsledného úhlu příchodu signálu.....	57
	Závěr	59
	Literatura	61
	Přílohy	63

Seznam zkratek

AOA	Angle Of Arrival (Úhel Příchodu Signálu)
ATC	Air Traffic Control (Řízení Letového Provozu)
DF	Direction Finding (Směr Příchodu Signálu)
EW	Electromagnetic Wave (Elektromagnetická Vlna)
FPGA	Field-Programmable Gate Array (Programovatelné hradlové pole)
GPIO	General-Purpose Input/Output (Univerzální Vstupní/Výstupní Pin)
GPS	Global Positioning System (Globální Polohovací System)
GPSDO	GPS Disciplined Oscillator (GPS Disciplinovaný oscilátor)
TDOA	Time Difference Of Arrival (Čas Rozdílného Příchodu Signálu)
TOA	Time Of Arrival (Čas Příchodu Signálu)
IF	Intermediate Frequency (Střední Frekvence)
LED	Light-Emitting Diode (Elektroluminiscenční Dioda)
LO	Local Oscillator (Lokální Oscilátor)
PF	Peak Finding (Hledání Lokálních Extrémů)
PPS	Pulse Per Second (Pulzy za sekundu)
REF	Reference (Referenční)
RF	Radio Frequency (Radiové Frekvence)
SDR	Software-Defined Radio (Softwarově definované rádio)
SNR	Signal to Noise Ratio (Poměr Signál/Šum)
USB	Universal Serial Bus (Univerzální Sériová Sběrnice)
USRP	Universal Software Radio Peripheral (Univerzální Softwarová Rádiová Periferie)

Seznam obrázků

Obr. 1 – Vizualizace geolokačního systému TDOA	13
Obr. 2 – Vizualizace použití hyperbol.....	15
Obr. 3 – Systém TDOA pro určení AOA	16
Obr. 4 – Vizualizace automatického systému využívající otočnou anténu	18
Obr. 5 – Ilustrace systému využívající metodu monopolzu	19
Obr. 6 – Vizualizace Watson-Wattovi metody za použití překřížené smyčky.....	20
Obr. 7 – Vizualizace Dopplerova jevu	22
Obr. 8 – Ilustrace systému pro prostou Dopplerovskou metodu	23
Obr. 9 – Ilustrace systému pro Pseudo-Dopplerovskou metodu	25
Obr. 10– Základní interferometr se dvěma přijímači	26
Obr. 11– Vizualizace analytické části	28
Obr. 12– Zobrazení vytvořených přijímacích soustav.....	29
Obr. 13– Zobrazení chyb u jednotlivých stupňů	29
Obr. 14– Vizualizace simulátoru pro zadávání konkrétního úhlu	30
Obr. 15– Zobrazení vytvořených přijímacích soustav.....	31
Obr. 16– Přijaté signály a zpoždění vůči 1. přijímací anténě	31
Obr. 17– Vizualizace manuální části	32
Obr. 18– Pozice manuální rozmístěných přijímačů.....	33
Obr. 19– Vizualizace průběhu na jednotlivých přijímacích	33
Obr. 20– Vývojový diagram zjištění hranic možných úhlů příchodu	36
Obr. 21– Vývojový diagram zjištění správných úhlů páru.....	38
Obr. 22– Vývojový diagram zjištění správných úhlů páru.....	39
Obr. 23– Vývojový diagram pro upřesnění úhlů na hranici 360°	40
Obr. 24– Graf závislosti vzdálenosti mezi vysílačem a přijímací soustavou na průměrné chybě.....	41
Obr. 25– Graf vizualizace zlomových úhlů.....	42
Obr. 26– Graf závislosti počtu antén v soustavě na průměrnou chybu	43
Obr. 27– Ukázka měřicího pracoviště	44
Obr. 28– Vektorový generátor SM300	45
Obr. 29– Anténa VERT900	46
Obr. 30– USRP-2945.....	46
Obr. 31– Přední panel USRP-2945.....	47
Obr. 32– Zadní panel USRP-2945.....	48
Obr. 33– Synchronizace místních oscilátorů	48
Obr. 34– Rozhraní GNU Radia	49
Obr. 35– Blokové schéma softwarového přijímače.....	50
Obr. 36– Přijímací/Směšovací blok.....	50
Obr. 37– Proměnné hranic filtru.....	51
Obr. 38– Pásmový filtr	51
Obr. 39– Převodník z komplexního tvaru na reálné hodnoty (imaginární hodnoty).....	51
Obr. 40– Blok pro kompresy dat do jednoho toku	52

Obr. 41– Blok pro uložení dat	52
Obr. 42– Blok pro zobrazení frekvenčního spektra signálů	52
Obr. 43– Blok pro zobrazení časového průběhu signálů.....	53
Obr. 44– Schématické rozvržení realizace měření	55
Obr. 45– Realizace měření v bezodrazové komoře.....	55
Obr. 46– Výsledky měření z SDR: Kalibrační část měření (nahore), měřená část (dole)...	56
Obr. 47– Výsledky měření z SDR: Kalibrační část měření (nahore), měřená část (dole)...	57

Seznam tabulek

Tabulka 1– Seznam známých používaných DF metod	12
Tabulka 2– Důležité parametry vektorového generátoru SM300 [16].....	44
Tabulka 3– Důležité parametry antény VERT900 [12].....	45
Tabulka 4– Důležité parametry zařízení USRP-2945 [14].....	47
Tabulka 5– Fázové rozdíly a časové rozdíly jednotlivých signálů.....	57
Tabulka 6– Výsledné úhly ze simulátoru	57
Tabulka 7– Průměrné hodnoty výsledných hodnot ze simulátoru	58

Úvod

Bakalářská práce se zabývá simulací přístroje pro určení směru příchodu signálu pomocí fázového posunu pomocí vývojového prostředí Matlab. Tento simulátor bude následně použit pro potřeby výuky a prezentaci pro veřejnost. Veškeré matematické vztahy vycházejí z veřejně dostupných vědeckých zdrojů. Tyto vztahy jsou následně použity pro sestavení simulačního programu.

Tuto bakalářskou práci jsem si vybral z důvodů mého zájmu o pracování a zpracovávání signálů a možnosti uplatnění mých nabytých znalostí z mého studijního oboru za poslední tři roky studia. Dalším důvodem byla možnost vytvoření zařízení, které by bylo posléze využíváno na univerzitě pro vzdělávací účely a pro možné ukázky budoucím studentům. A v neposlední řadě z důvodu, že v této práci vidím její možné uplatnění v budoucnu a nejedná se o práci, která by byla využita jenom jednou.

V teoretické části je nejdříve popsán úvod do metod hledání směru příchodu signálu s příklady využití těchto metod pro konkrétní systémy. Posléze následuje popis jednotlivých využívaných metod s popisem jejich funkční struktury, předností nad ostatními a jejich limitacemi.

V praktické části je popsán vývoj simulačního programu v prostředí Matlab, který je určen k simulaci interferometru. Navržený simulační program je pro snadnější manipulaci vizuálně zhotoven v programu App Designer, kde je umožněna práce s parametry nastavení počtu antén v přijímací soustavě, frekvence vysílaného signálu, nastavené vzdálenosti mezi přijímací soustavou a vysílačem, otáčení přijímací soustavy, včetně ručního nastavení pozice přijímacích a vysílacích antény.

Dále je v práci popsána analýza programu s vlivy parametrů, které mají na výslednou přesnost značný vliv.

Na závěr práce je popsáno uskutečněné měření s reálným signálem pro ověření funkčnosti simulátoru na reálných hodnotách a zhodnocení všech uskutečněných měření. Použité parametry musely být pro simulace upraveny či doplněny s ohledem na používaný hardware.

1 Hledání směru příchodu signálů

Hledání směru příchodu signálu (Direction finding – DF) je proces, při kterém jsme schopni určit z dat přijatého signálu o jakékoliv frekvenci či tvaru oblasti, ze kterého směru byl dotyčný signál vyslán, a i popřípadě přesné místo, trajektorii a rychlost pohybu daného vysílače, který tento signál vyslal.

Tento systém měl v minulosti hojně uplatnění ve vojenských operacích jako prostředek k lokalizaci nepřátelských vysílačů. Byl používán spojenci během druhé světové války k boji s německými ponorkami v Atlantiku. Pro tyto účely byl využit Watson-Wattův zaměřovací systém, který umožňoval najít směr příchodu vysílaných radiových zpráv o pozicích spojeneckých jednotek, nebo pro vzdušnou obranu při detekování letadel mířících na Velkou Británii. Tento systém bude podrobněji popsán v oddíle 1.3. Po druhé světové válce se do popředí dostaly Dopplerovské a Pseudo-Dopplerovské zaměřovací systémy, oba tyto systémy budou popsány v oddíle 1.4, kterými byly od roku 1950 vybavena letiště po celém světě [1]. V dnešní době je tento systém využíván ve službách řízení letového provozu (Air traffic control – ATC), pomocí kterého můžeme zajistit bezpečnou koordinaci letů.

Za dobu své existence se vytvořilo nespočet metod pro zaměřovací systémy, některé využívají jednoduše časových, amplitudových nebo fázových změn přijatých signálů až po komplexnější, které využívají speciální fyzikální nebo elektrické zákony, například Dopplerův efekt.

Tabulka 1– Seznam známých používaných DF metod

Metody využité pro určení směru příchodu signálu	Časový posun	Porovnávání amplitud	Rozdíl fáze
Typ metody			
Jednodušší	Metoda časového posunu (TDOA)	Metoda Skenovacího paprsku (Scanning Beam)	Interferometr, Korelační interferometrie
Komplexnější		Watson-Wattova metoda	Dopplerovská a Pseudo-Dopplerovská metoda

V následujících oddílech budou podrobněji popsány principy vybraných metod pro určení směru příchodu signálu.

1.1 Metoda časového posunu

Jedna ze základních metod pro určení směru příchodu signálu je metoda časového posunu, která měří rozdíl časového přijetí signálů mezi různými přijímači, jež jsou od sebe vzdáleny dostatečnou vzdáleností z důvodů, aby bylo možné časový rozdíl zaznamenat, jelikož signál můžeme fyzikálně brát jako elektromagnetickou vlnu (Electromagnetic Wave- EW), která

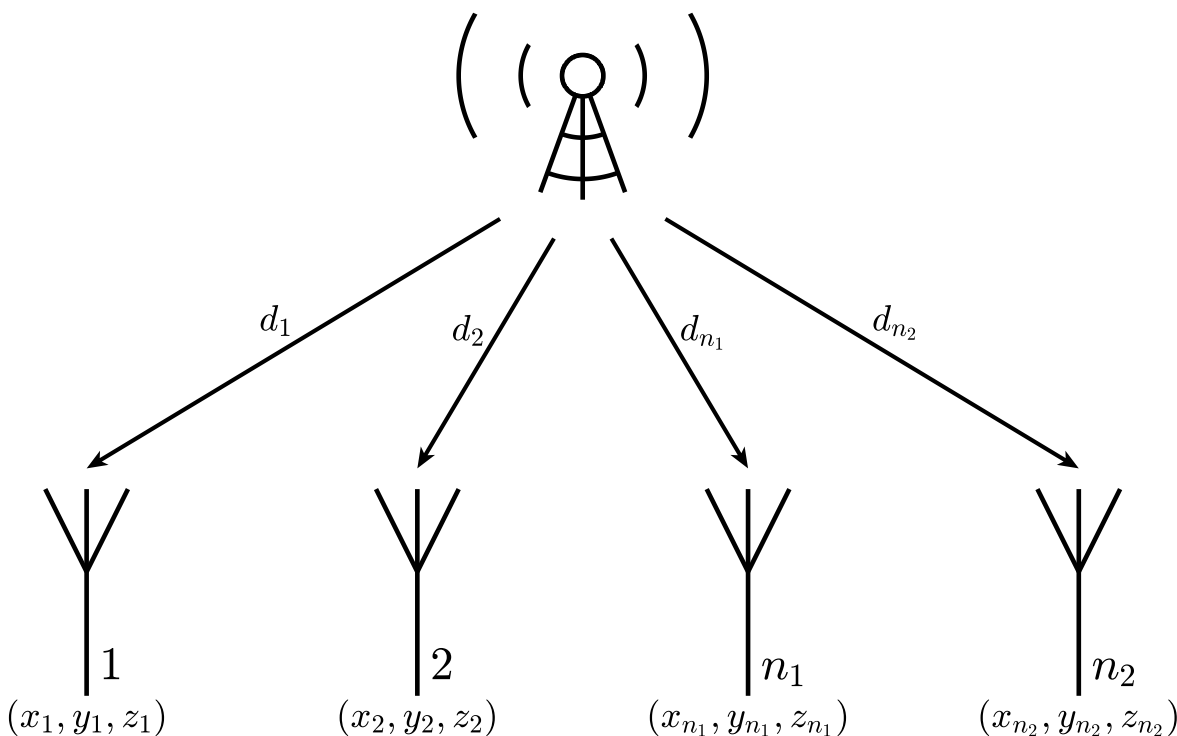
se šíří v prostoru rychlostí světla podle vzorce (1.1), který je odvozen z Maxwellových rovnic (Ampérův zákon, Faradayův zákon). Historicky se metoda časového posunu (Time Difference of Arrival – TDOA) často využívala při geolokaci mobilních telefonů. Avšak je zbytečná při měření kontinuálních vln, protože tato metoda spoléhá na to, že signál bude pulzně modulován.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}}, \quad (1.1)$$

kde μ - permeabilita,

ε - permitivita.

Pokud by byl znám čas vyslání signálu k přijímači, mohla by být dopočítána teoretická vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem. Avšak při procesech zaměřování nebo shromažďování informací ve vojenských podmínkách nemáme možnost zjistit, kdy byl signál vyslán z vysílače, ale můžeme měřit čas příchodu signálů na přijímače. Následným stanovením časových rozdílů u každé dvojice přijímačů jsme schopni odhadnout lokalizaci daného vysílače. [2]



Obr. 1 – Vizualizace geolokačního systému TDOA¹

Nechť t_n reprezentuje čas příchodu (Time Of Arrival – TOA) signálu z vysílače na přijímač n . TDOA mezi přijímači n_1 a n_2 , je pak definováno $\Delta t_{n_1, n_2}$ dle rovnice (1.2)

¹ Vlastní zdroj

$$\Delta t_{n_1, n_2} = t_{n_1} - t_{n_2} = \frac{1}{c} (d_{n_1} - d_{n_2}), \quad (1.2)$$

kde $n_1, n_2 \in \{1, 2, \dots, N\}$,

N - je počet přijímačů,

c - rychlost šíření vlny v neideálním prostředí,

d_{n_1} - vzdálenost od vysílače k n_1 -tému přijímači,

d_{n_2} - vzdálenost od vysílače k n_2 -tému přijímači.

Podle euklidovské vzdálenosti se d_{n_i} může zapsat jako:

$$d_{n_i} = \sqrt{(x_v - x_{n_i})^2 + (y_v - y_{n_i})^2 + (z_v - z_{n_i})^2}, \quad (1.3)$$

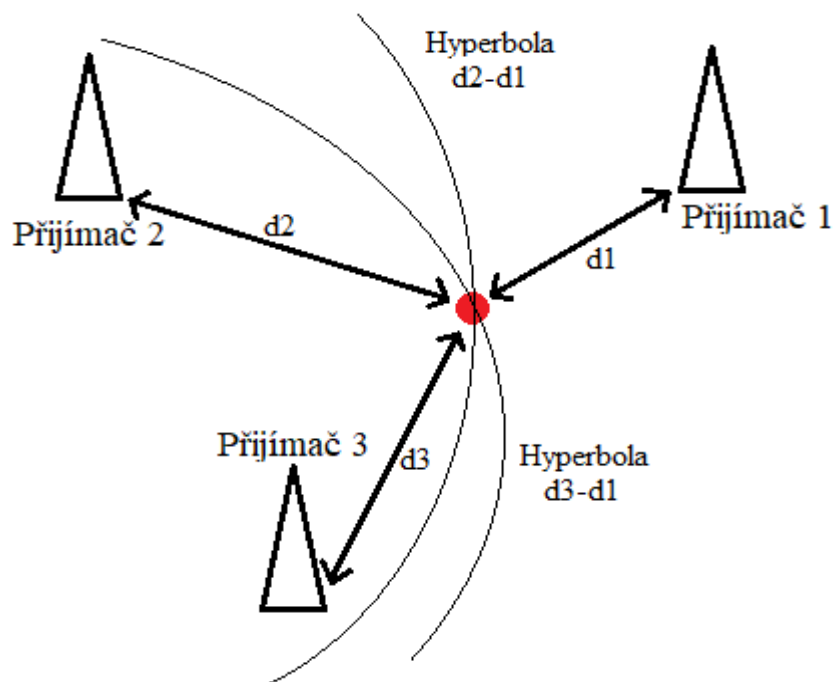
kde $[x_v, y_v, z_v]$ - souřadnice vysílače,

$[x_{n_i}, y_{n_i}, z_{n_i}]$ - souřadnice přijímače n_i .

Po dosazení za d_{n_1} a d_{n_2} z rovnice (1.3) do (1.2) dostaneme:

$$\Delta t_{n_1, n_2} = \frac{1}{c} \left(\begin{array}{l} \sqrt{(x_v - x_{n_1})^2 + (y_v - y_{n_1})^2 + (z_v - z_{n_1})^2} \\ - \sqrt{(x_v - x_{n_2})^2 + (y_v - y_{n_2})^2 + (z_v - z_{n_2})^2} \end{array} \right). \quad (1.4)$$

Abychom mohli vyřešit tři neznámé v rovnici (1.4), je nutné mít minimálně tři časové rozdíly mezi přijímači, což vyžaduje minimálně čtyři přijímače. TDOA se také nazývá metodou hyperbolické lokalizace, kde pro každý pár přijímačů se definují pomocí metody TDOA možné polohy vysílače, které jsou reprezentovány pomocí hyperbolické křivky (ve 3D prostoru pomocí rotačního hyperboloidu). Průnikem hyperbolických křivek (rotačních hyperboloidů) získáme polohu a směr vysílaného signálu [2]. Pokud chceme znát jen umístění vysílače ve dvou rozměrech, tak by nám stačilo mít pouze tři přijímače, u kterých se jejich hyperbolické křivky protínají jen v 2D prostoru, jak vyobrazuje Obr. 2.



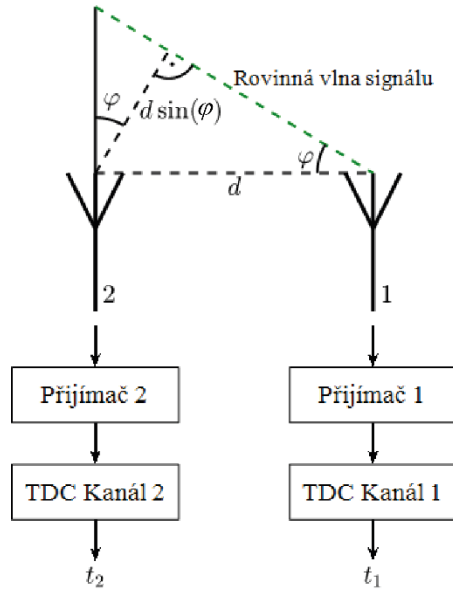
Obr. 2 – Vizualizace použití hyperbol²

Touto metodou taktéž lze vypočítat i směr příchodu signálu přes takzvaný úhel příchodu (Angle of Arrival – AOA) z důvodu velké podobnosti s principem interferometru. Můžeme taktéž o tom hovořit jako o interferometru, který měří čas příchodu signálu přímo, namísto fáze. [3]

Vytvořme si systém, který obsahuje dvě přijímací antény. Tyto antény jsou od sebe odděleny vzdáleností d . Na antény dopadá rovinná vlna pod úhlem φ a přímkou od této vlny, která je na ní kolmá k přijímači 2, jejíž délka se dá odvodit z rovnice (1.5) za předpokladu, že si danou stranu trojúhelníku označíme jako a , jak je následně znázorněno na Obr. 3.

$$\sin \varphi = \frac{a}{d} \Rightarrow a = d \sin(\varphi) \quad (1.5)$$

² Vlastní zdroj



Obr. 3 – Systém TDOA pro určení AOA³

Z důvodu zjednodušení budeme předpokládat, že se vlna bude šířit volným prostorem, kde μ_r a ε_r jsou rovny 1, pak můžeme odvodit vlnové číslo k jako:

$$k = \omega \sqrt{\mu \omega} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.6)$$

Rovinná vlna E_0 lze posléze vyjádřit na jednotlivých přijímačích takto:

$$E_1 = E_0 e^{j\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r\right)} \quad (1.7)$$

$$E_2 = E_0 e^{j\left[\omega(t + \Delta t_{12}) - \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r\right]} = E_0 e^{j\left(\omega t - \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r + \omega \Delta t_{12}\right)} \quad (1.8)$$

kde r - vzdálenost vlny od zdroje,

ω - úhlová rychlost [rad/s],

Δt_{12} - časový rozdíl přijatého signálu mezi dvěma přijímači.

Budeme předpokládat, že ztráty šíření prostorem zanedbáme pro krátkou vzdálenost mezi přijímači. Takže můžeme konstatovat, že dopadající vlny na oba přijímače dopadají stejně, ale jsou jen zpožděné v čase a fázi.

Řešení pro diferenciální fázový posuv:

$$\Delta\varphi = \angle E_2 - \angle E_1 = \omega \Delta t_{12} \quad (1.9)$$

Ale fázový posuv můžeme vyjádřit i takto:

³ Vlastní zdroj

$$\Delta\varphi = \angle E_2 - \angle E_1 = \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \sin \varphi \quad (1.10)$$

Pak můžeme rovnice (1.9), (1.10) zkombinovat a vyjádřit rovnici pro výpočet našeho AOA:

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{c\Delta t_{12}}{d} \right) \quad (1.11)$$

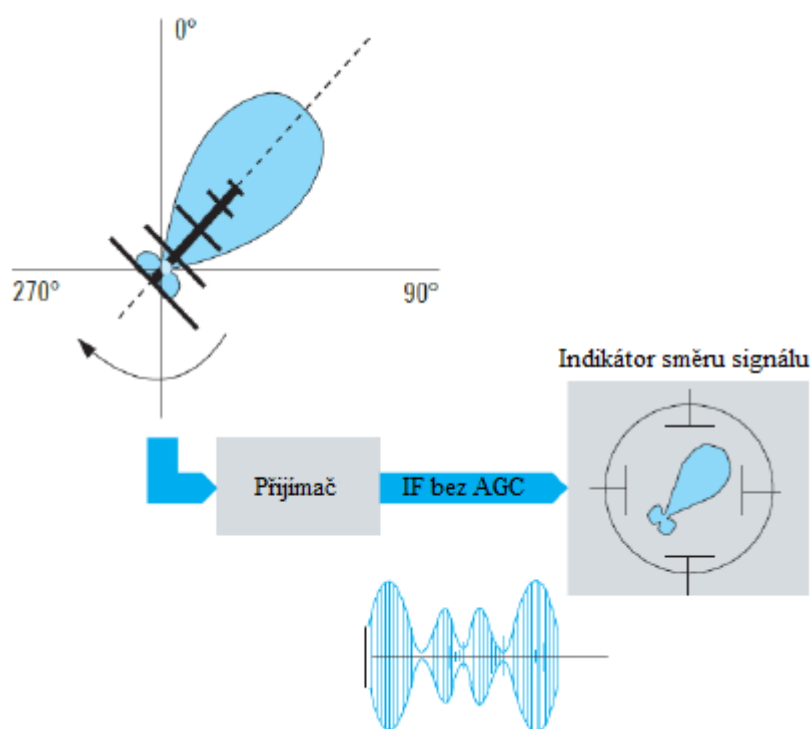
Z rovnice (1.11) můžeme vidět, že se dá AOA spočítat jen na základě časového rozdílu a vzdálenosti mezi přijímači. Metoda TDOA obecně vyžaduje tři nebo více přijímačů. To je určeno tím, že při použití pouze dvou přijímačů dostaneme výsledný AOA, ze kterého byl signál vyslán, ale z důvodu nejednoznačnosti signálu při měření s dvěma přijímači se vytvoří ten samý výsledek, ale zrcadlově na druhé straně posunutý o 180°, což nám vytvoří dva možné výsledky AOA, proto se do systému přidává třetí přijímač, kterým můžeme určit, který z těchto dvou směrů je ten správný.

Mezi přední výhodu této DF metody patří její frekvenční nezávislost, tím může být použita na jakékoli frekvenci a je jen omezena šířkou pásma antén a zařízením měřící časový rozdíl příchodu signálu. Se svojí velkou pravděpodobností určení směru signálu je velmi vhodná pro zjištění směru signálů v ultra širokém pásmu. Další výhody jsou spjaté s její nízkou složitostí, nízkými náklady na sestavení systému a její velkou přesností za příznivých podmínek. Avšak má i nevýhodu, že nemůže detekovat AOA u kontinuálních signálů, protože TDOA detekuje časové značky vzestupné a sestupné hrany obálky signálů opakující se frekvence [3]. Kontinuální vlny nemají v signálu vloženou žádnou referenci, takže není možné měřit časové značky. Jedním z řešení tohoto problému je použití sekundárního systému, který by místo hran měřil poklesy amplitud. Samozřejmě kalibrace těchto přístrojů musí být přesná, aby se do výpočtů nezahrnovala zbytečná chyba, což je obtížné.

1.2 Metoda skenovacího paprsku

Další využívanou metodou je takzvaná metoda skenovacího paprsku. Oproti některým metodám DF má výhodu v tom, že pro určení směru signálu je v této metodě zapotřebí pouze systém tvořící jeden přijímač se směrovou anténou, kde se anténa otáčí kolem své osy, a přitom přijímač zachycuje výkon přijímaného signálu. To je možné z důvodu, že tato metoda využívá k DF pouze velikost přijatého signálu.[5]

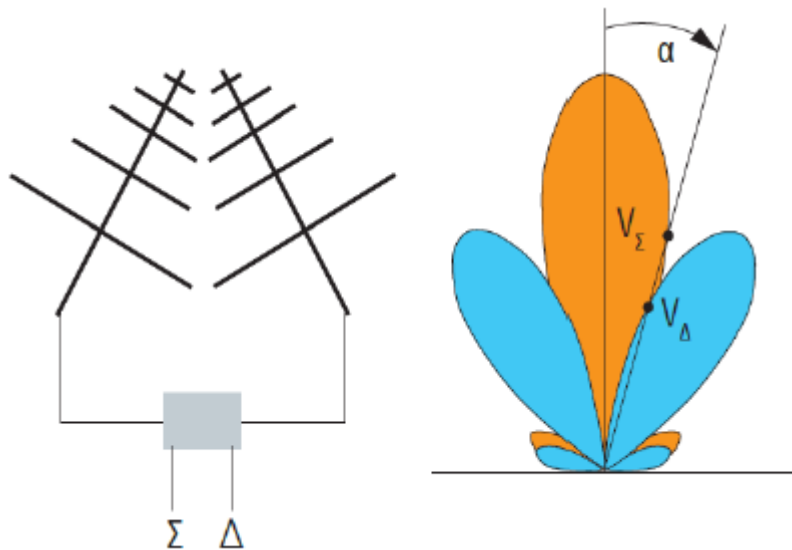
Metoda spočívala v tom, že se směrová anténa otáčí v azimutu, která pokrývá (budeme předpokládat 360°), kde má svůj referenční směr (azimut 0°) nastaven na zeměpisném severu, pro přesnější určení AOA a snaží se najít úhel, ve kterém má signál největší výkon [4]. Po projití všech úhlů se z dat následně vybrala nejvyšší naměřená hodnota signálu, která se posléze přiřadila k azimutu, ve kterém byl zaznamenán. V dnešní době systémy pracující na tomto principu mají anténu, která se konstantně otáčí a sama nalezne maximum, které vynese jako funkci úhlu pokrytí, jak je vidět na Obr. 4 [1]. [11]



Obr. 4 – Vizualizace automatického systému využívající otočnou anténu⁴

Také je možné sestavit, když anténa míří do stejného místa, systém za užití principu monopolzu prezentovaného na Obr. 5. Tato metoda se dá v praxi brát jako jedno anténní pole, na němž se prostřednictvím vhodných signálových rozvodů dají vytvořit dva anténní svazky (součtový a rozdílový), které jsou od sebe fázově posunuty o $\frac{\pi}{2}$. Tyto svazky mají od sebe také vzájemně posunutý fázový střed a signál dopadající na anténu je současně přijímán těmito dvěma svazky. [7]

⁴ Zdroj [6]



Obr. 5 – Ilustrace systému využívající metodu monopulzu⁵

Podílem součtových a rozdílových signálů se vytvoří časově nezávislá a bezrozměrná funkce známá jako funkce zaměřování (PF), která je rovna našemu hledanému úhlu α , který má tvar:

$$PF(\alpha) = \frac{V_{\Delta}(\alpha)}{V_{\Sigma}(\alpha)} \quad (1.12)$$

kde $V_{\Delta}(\alpha)$ - signál z antény Δ ,

$V_{\Sigma}(\alpha)$ - signál z antény Σ .

Oba tyto paprsky musí směřovat k sobě, aby byla zajištěna maximální citlivost, ale sníží pravděpodobnost zachycení signálu. Přesnost této metody závisí na šířce vyzařovacího paprsku antény. Úzký paprsek zlepšuje přesnost, ale zvýší čas potřebný ke skenování všech možných směrů a pokud je příliš úzký, tak nemusí svůj cíl vůbec najít. U vysoce směrových antén se pak přesnost pohybuje kolem 1° . [3]

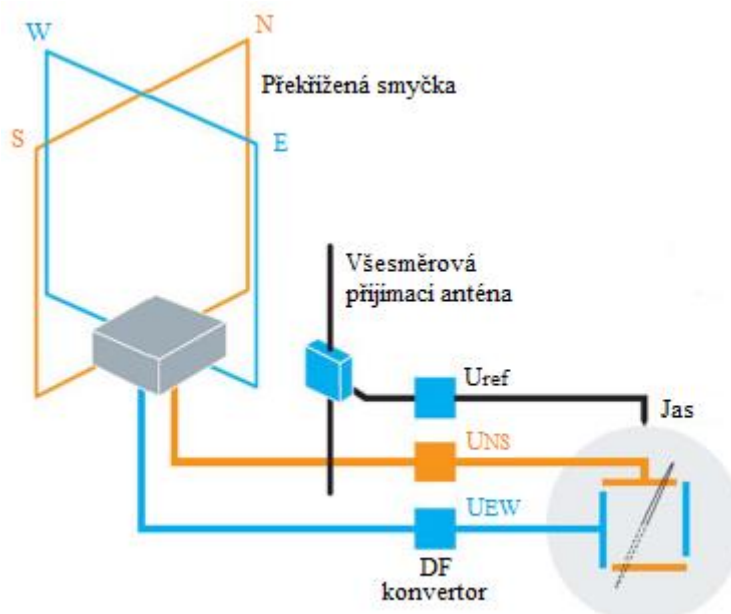
Výhody tohoto systému spočívají v jeho vysoké přesnosti a citlivosti díky směrové anténě a levné výrobě z důvodu, že k chodu je zapotřebí vyrobit jen jeden přijímač, který může mít zároveň malé rozměry, které nijak nezhoršují jeho funkčnost a zároveň tím snižují i jeho energetickou spotřebu. Nevýhodou je, že systém má pomalou odezvu, protože se musí plně otočit o úhel pokrytí, aby mohl zjistit směr signálu, což způsobuje, že výsledný směr bude určen s časovým zpožděním. Tato nevýhoda je využívána pro signály trvající krátkou dobu, které lze pak efektivně zpracovat kvůli nízké rychlosti skenování. Přes tento nedostatek se metoda stále využívá především kvůli její nižší nákladnosti a kvůli její přesnosti oproti

⁵ Zdroj [6]

ostatním metodám. V armádě se tento systém nazývá Točící DF a je běžně používán pro širokopásmové vysokofrekvenční určení směru signálu. [5][6]

1.3 Watson-Wattova metoda

Tato metoda byla vyvinuta po první světové válce, což ji řadí mezi jednu z vůbec prvních využívaných a nejznámějších metod DF. Watson-Wattova metoda funguje na principu využívání rozdílů v amplitudě přijímaného signálu dopadajícího na více antén k určení úhlu dopadu. K tomuto porovnávání se využívají páry antén Adcock (Adcock – je anténní pole sestavené ze čtyř antén vzdálených od sebe stejnou vzdáleností (čtverec)) a jedné všesměrové antény pro řešení nejednoznačnosti, vizualizované na Obr. 6 s použitím překřížené smyčky [5]. Tyto dva páry antén jsou tvořeny buď s překříženou smyčkou či monopolními nebo dipólovými anténami, které měří rozdíl vektorů přijímaného signálu na každé anténě, odezva dvou párů je úměrná sinu a kosinu příchodu signálu. Tyto dva páry se dělí na pár sever-jih (N-S) a východ-západ (E-W). U protilehlých antén v páru jsou tyto antény posunuty mezi sebou o 180° a tím vytváří vyzařovací obrazec osmičky, což vytváří systém pro výborné přijímání signálu pro jakýkoliv směr [6].



Obr. 6 – Vizualizace Watson-Wattovi metody za použití překřížené smyčky⁶

Za pomoci teorie pole lze výsledný signál z párů vyjádřit:

$$U_{NS} = U_N - U_S \quad (1.13)$$

$$U_{EW} = U_E - U_W \quad (1.14)$$

⁶ Zdroj [1]

kde U_{N-S} - napětí z antény N a S,

U_{E-W} - napětí z antény E a W,

a to se může přepsat jako:

$$U_{NS} = e^{j\frac{\pi d}{\lambda}\sin\varphi} - e^{-j\frac{\pi d}{\lambda}\sin\varphi} = j2\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}\sin\varphi\right) \quad (1.15)$$

$$U_{EW} = e^{j\frac{\pi d}{\lambda}\cos\varphi} - e^{-j\frac{\pi d}{\lambda}\cos\varphi} = j2\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}\cos\varphi\right) \quad (1.16)$$

kde λ - vlnová délka,

d - vzdálenost mezi páry antén,

φ - azimutový úhel.

Ze vzorců (1.15) a (1.16) můžeme vidět, že každý pár generuje jedno napětí. Tato napětí si jsou navzájem prostorově kolmá, tudíž je možné AOA vypočítat pomocí \tan^{-1} poměru těchto napětí následovně:

$$AOA = \tan^{-1}\left(\frac{U_{NS}}{U_{EW}}\right) \quad (1.17)$$

Zjištěný úhel příchodu signálu může mít taktéž svůj výsledek i na opačné straně posunut o 180° , tím se tento výsledek stává nejednoznačným, a proto se přidává pátá všesměrová přijímací anténa, díky které můžeme posléze určit, který z daných směrů je ten správný.

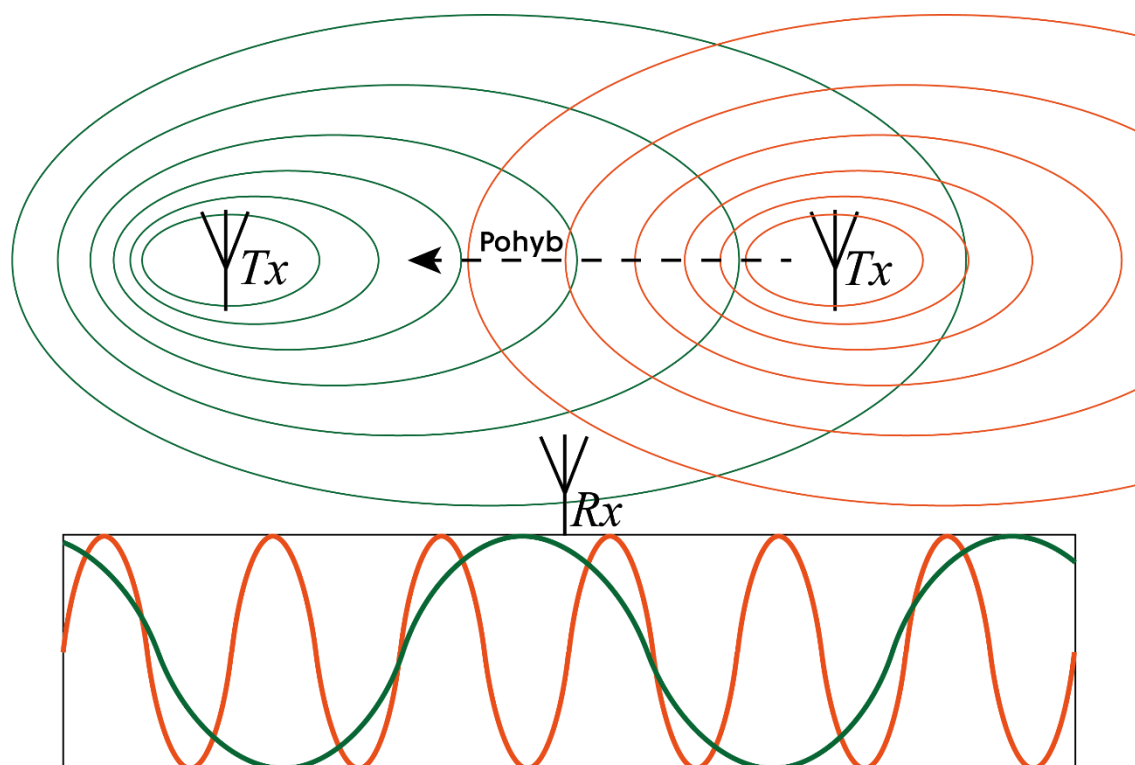
Při použití antén se zkříženou smyčkou jsou díky své kompaktní velikosti a jednoduché implementaci vhodné pro mobilní aplikace a schopnost pracovat se signály s velmi krátkou dobou trvání. Nevýhodou při používání těchto antén je, že při více cestném snímání mohou nastávat chyby, které jsou spojené s malou clonou mezi anténami. Další výrazné chyby mohou nastat při signálech, které mají ostrý výškový úhel, ze kterého jsou přijímány. Při použití antén Adcock je vytvářena lepší tolerance na signály přicházející z ostrých výškových úhlů a implementací širších otvorů dojde k zamezení chyb při více cestném snímání.

1.4 Metody s využitím Dopplerova jevu

Dopplerovské metody využívají pro svojí detekci směru příchodu signálu oproti předešlým metodám takzvaný princip Dopplerova jevu.

Dopplerův jev, taktéž uváděno jako Dopplerův frekvenční posuv, vzniká, když se pohybuje přijímač nebo vysílač nebo oba zároveň (dochází ke změně vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem). Podle Obr. 7 můžeme vidět tento jev v praxi, kde přijímaný signál ze zdroje přibližujícího se k přijímači má zřetelně vyšší frekvenci než signál od zdroje, který se od

přijímače vzdaluje. Toto je způsobeno neměnností rychlosti světla, kterou se signál šíří prostorem.



Obr. 7 – Vizualizace Dopplerova jevu⁷

Za předpokladu, že budeme brát, že antény mohou fungovat jako přijímač i vysílač, tak jsme schopni vypočítat fázové zpoždění, které se mezi nimi vytvoří díky vzdálenosti jako:

$$\phi_{DP} = 2\pi \frac{R}{c} \quad (1.18)$$

kde R - vzdálenost antény od cíle,
 c - rychlost světla.

Ovšem tento cíl se může v prostoru pohybovat a tím pádem se fázové zpoždění bude v čase měnit. Tato změna může být vyjádřena jako Dopplerovský posun úhlové frekvence následujícím vztahem:

$$\omega_{DP} = \frac{d\phi_{DP}}{dt} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{dR}{dt} = \frac{2\pi}{\lambda} v_R \quad (1.19)$$

kde v_R - radiální rychlost cíle,

λ - vlnová délka $\frac{c}{f}$

⁷ Vlastní zdroj

Kde s v_R vyjádřeného ze vzorce (1.19) můžeme vyjádřit Dopplerovský posun ve frekvenci:

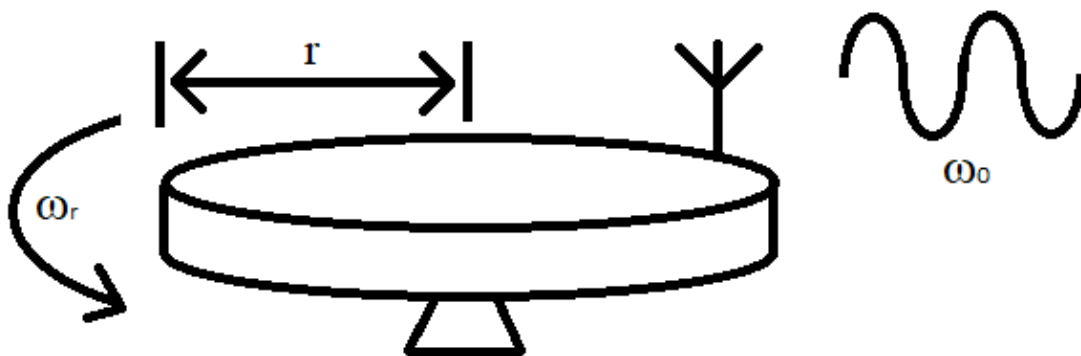
$$f_{DP} = \frac{v_R}{\lambda} \quad (1.20)$$

Ovšem pohyb cíle nemusí být vždy směrem k radaru, tím dostáváme obecné řešení, kde vektor rychlosti cíle a vektor radiální rychlosti cíle svírají mezi sebou úhel, kterým se modifikuje (zobecní) rovnice (1.20) [8]

$$f_{DP} = \frac{v}{\lambda} \cos \theta \quad (1.21)$$

kde θ - je úhel mezi vysílaným/odraženým signálem a směrem pohybu cíle.

Systém využívající prostou Dopplerovskou techniku je tvořen jedním přijímačem, který je připojen na všesměrové anténě umístěné na podstavci, který se fyzicky otáčí, jak je znázorněno na Obr. 8. Tím, jak se anténa při otáčení přibližuje ke zdroji signálu, tak dopplerovský posun zvýší přijímanou frekvenci a naopak sníží, když se anténa bude od zdroje oddalovat. Tento rozdíl frekvencí se pak využívá k určení směru příchodu signálu. V dřívějších dobách bylo hojně používáno v leteckém provozu pro určování polohy a trajektorie letadel. Ovšem může se vytvořit i systém, který se nemusí vůbec otáčet, který bude ještě v této kapitole podrobněji popsán.



Obr. 8 – Ilustrace systému pro prostou Dopplerovskou metodu⁸

Otáčením podstavce je přijímaný signál o frekvenci ω_o frekvenčně modulován přes rotační frekvenci podstavce ω_r zapříčiněním Dopplerova jevu. Pak okamžitá hodnota tohoto namodelovaného přijímaného signálu se rovná:

⁸ Vlastní zdroj

$$E(t) = A \cos(\phi(t)) = A \cos\left(\omega_0 t + \frac{2\pi r}{\lambda_0} \cos(\omega_r t - \alpha) + \varphi\right) \quad (1.22)$$

kde A - amplituda,
 ω_0 - frekvence přijímaného signálu,
 r - poloměr rotujícího podstavce,
 ω_r - frekvence otáčení podstavce,
 α - úhel příchodu signálu,
 φ - posun fáze nosné vlny.

Taktéž se dá vypočítat i okamžitá frekvence, která se získá přes derivaci $\phi(t)$ z rovnice (1.22) podle času:

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \omega_0 - \frac{2\pi r}{\lambda_0} \omega_r \sin(\omega_r t - \alpha) \quad (1.23)$$

Kde po odfiltrování složky ω_0 dostaneme vztah pro výpočet fáze demodulovaného Dopplerova signálu S_D

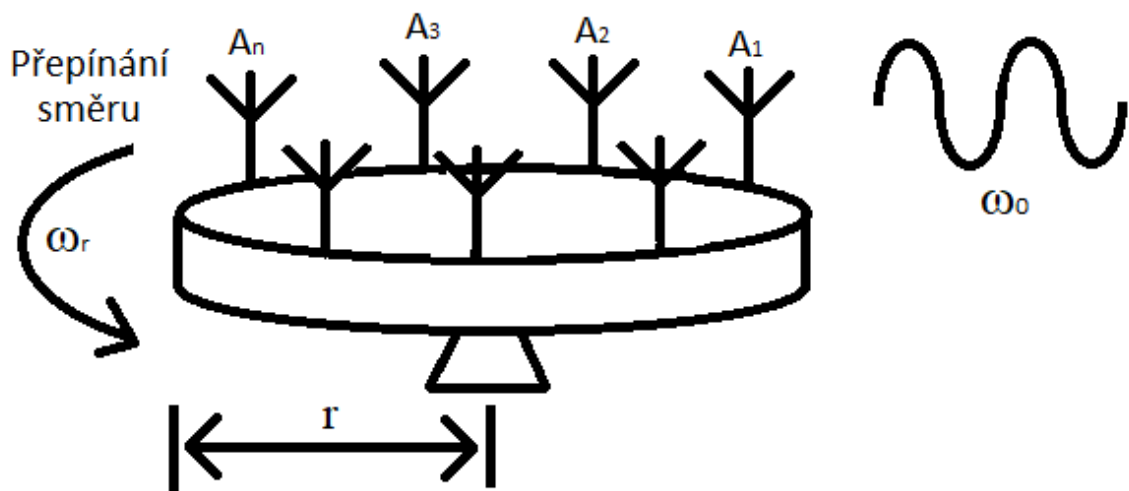
$$S_D = \frac{2\pi r}{\lambda_0} \omega_r \sin(\omega_r t - \alpha) \quad (1.24)$$

Následně se tento demodulovaný signál porovnává s referenčním signálem S_r se stejnou střední frekvencí, který je odvozen z otáčejícího se podstavce jako:

$$S_r = -\sin(\omega_r t) \quad (1.25)$$

Výsledek tohoto fázového srovnání se rovná úhlu příchodu signálu α . Tento princip však naráží na omezení, kdy je obtížné otáčet podstavec s dostatečnou modulační frekvencí, tím bychom nedostávali rozumné výsledky poměru signál/šum (SNR-signal to noise ratio), a proto není využíván pro vyšší frekvence. [10]

Jak už bylo naznačeno v této kapitole, je možné sestavit systém fungující na Dopplerově principu, aniž by bylo zapotřebí mít v něm obsažené pohyblivé součástky. Toho se dá dosáhnout tím, že se místo jedné antény použije systém minimálně čtyř až osmi antén, které budou uspořádány do kruhového pole. K získání jednoznačného výsledku je zapotřebí, aby dané antény byly od sebe vzdáleny minimálně jednu třetinu nebo méně než polovinu vlnové délky pracovního signálu. Postupně jsou cyklicky z každé antény brány hodnoty a tím se imituje pohyb antény v kruhu. Jedná se v podstatě o jednonábový interferometr vzorkovaný časem. Tento princip se nazývá Pseudo-Dopplerovská metoda, která je ilustrována na Obr. 9. [9]



Obr. 9 – Ilustrace systému pro Pseudo-Dopplerovskou metodu⁹

Touto metodou se můžeme posléze zbavit nedokonalostí otočných mechanických částí a tím zaručit lepší výsledky SNR a zvýšíme citlivost zaměření, ale převládá zde nevýhoda, že tento systém není schopen zaměřovat více druhů signálu než ten, na který má nastavenou modulační frekvenci a má taktéž omezené měření do určitých frekvencí, kdy zařízení nemůže stíhat zaznamenávat signály o velkých frekvencích z důvodu malého časového okna, ve kterém by zařízení nebylo schopné data zpracovat.

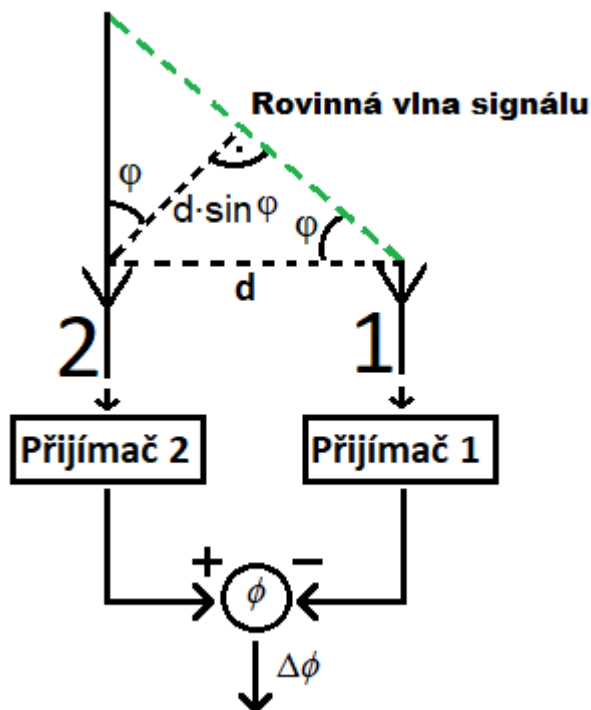
1.5 Metoda fázového posunu

Jako poslední je uvedena metoda, která využívá fázového rozdílu signálu, který byl zaznamenán jednotlivými přijímači, ze kterých je schopna určit směr daného signálu, ze kterého byl vyslán. Přístroje, které využívají této metody, se nazývají Interferometry.

Interferometr je specifický typ anténního pole, u nichž jsou vzdálenosti mezi jednotlivými přijímači často větší než polovina vlnové délky přijímaných signálů a tím vytváří roštové laloky. Mezi sousedními vysílači se tvoří takzvané páry, každý takový pár přijímačů je od sebe vzdálen známou vzdáleností. Interferometr ke své funkčnosti vyžaduje minimálně dvě přijímací antény, mezi kterými by se tento pár mohl vytvořit. V těchto párech jsou hodnoty přijatého signálu přijímačů mezi sebou fázově porovnávány a zjišťuje se, jak velký fázový rozdíl mezi nimi nastává. Tato operace je posléze stejně aplikována na ostatní páry a přes matematické výpočty se následně vypočítávají u jednotlivých párů jejich úhly příchodu signálu, kde poté z těchto hodnot je spočtena jejich průměrná hodnota, která se rovná úhlu, ze kterého byl signál vyslán.

⁹ Vlastní zdroj

Na Obr. 10 je uveden základní princip interferometru, který je sestaven ze dvou přijímacích antén, které jsou mezi sebou vzdáleny vzdáleností d a dopadá na ně rovinná vlna pod úhlem φ .



Obr. 10– Základní interferometr se dvěma přijímači¹⁰

Data z přijímačů pak vycházejí takto:

$$E_1 = E_0 e^{j(\omega t - kr)} \quad (1.26)$$

$$E_2 = E_0 e^{j(\omega t - kr + kd \sin \varphi)} \quad (1.27)$$

kde k - vlnové číslo z rovnice (1.6),
 r - vzdálenost vlny od zdroje.

Za předpokladu, že budeme brát vzdálenost mezi přijímači d za krátkou vzdálenost, můžeme zanedbat ztrátu šíření v prostoru a tím konstatovat, že dopadající vlny na přijímače si jsou totožné, ale opožděné mezi sebou v čase, který se nám projevuje jako fázový posun.

Řešení pro diferenciální fázový posun je následující:

$$\Delta\varphi = \angle E_2 - \angle E_1 = kd \cdot \sin \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \sin \varphi \quad (1.28)$$

Z této rovnice si můžeme vyjádřit φ

¹⁰ Vlastní zdroj

$$\varphi = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta\varphi\lambda}{2\pi d}\right) \quad (1.29)$$

Podle vzorce (1.29) nám vychází, že abychom zabránili nejasnostem při výpočtu úhlu příchodu signálu, tak hodnota vzdálenosti d musí být nanejvýš menší jak polovina vlnové délky signálu.

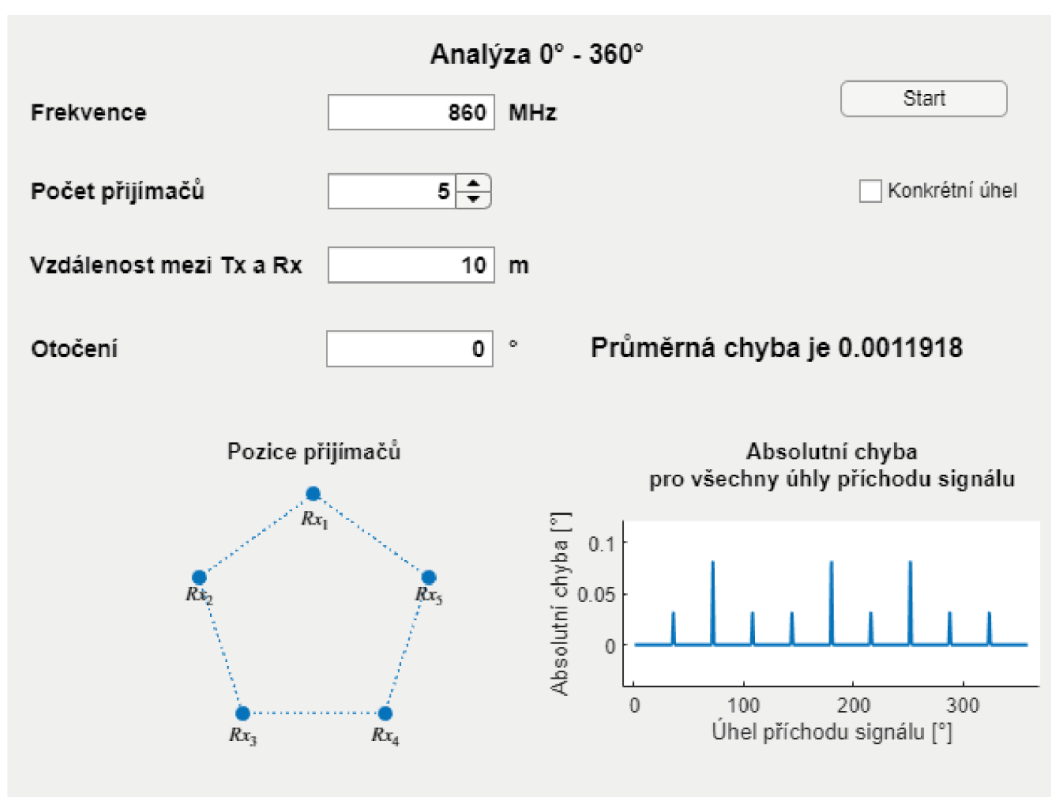
Velká výhoda této metody je její jednoduchost na pochopení a její vysvětlení z důvodů, že princip fázových posunů signálu je jedna ze základních znalostí, se kterou se při studiích elektra studenti setkávají. I přes svoji jednoduchost, může tato metoda nabývat i velmi přesných výsledků (přesnost 0,1° až 3°). Dá se jednoduše modifikovat, dokáže být použita na jakékoliv frekvenci nebo modulaci po specifických úpravách.

2 Popis simulátoru

Pro účely demonstrační, výukové a pro účely analýzy přesnosti byl navržen simulátor výpočtu směru příchodu signálu od vysílače. Pro výpočetní řešení simulátoru byl použit programovací jazyk Matlab (verze R2020b). To je jeden z programů vyvíjený společností MathWorks, který je přizpůsoben pro vědecké a inženýrské analýzy a návrhy systémů či produktů v oboru zpracování signálu, obrazu, komunikaci, strojové učení, výpočetní operace, testování a měření. [18]. V této kapitole budou popsány možné výstupy ze simulátoru, základní rozdělení programu a popis jednotlivých algoritmů výpočtu a zpřesnění úhlů směru přijímaného signálu.

2.1 Výstupy simulátoru

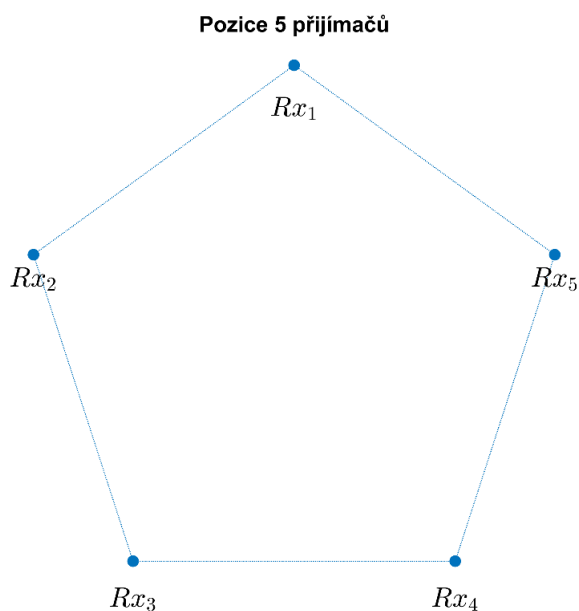
Celý simulátor je vizuálně navržen v programu App Designer, kde byl následně rozdělen do dvou samostatných částí. První část je přizpůsobena pro návržení pozic antén do pravidelných mnohoúhelníků a analýzu přesnosti vysílací antény. Úvodní okno první části simulátoru je uvedeno na Obr. 11, ve kterém je prováděna celková analýza vytvořených přijímacích soustav. Soustavy jsou vytvořeny v ideálním seskupení, kde si můžeme navolit počet antén v soustavě, vysílanou frekvenci, vzdálenost mezi soustavou a vysílačem a možnost celou soustavu libovolně otáčet. Díky těmto nastavením můžeme pozorovat, jak tyto veličiny mají vliv na celkovou přesnost.



Obr. 11– Vizualizace analytické části¹¹

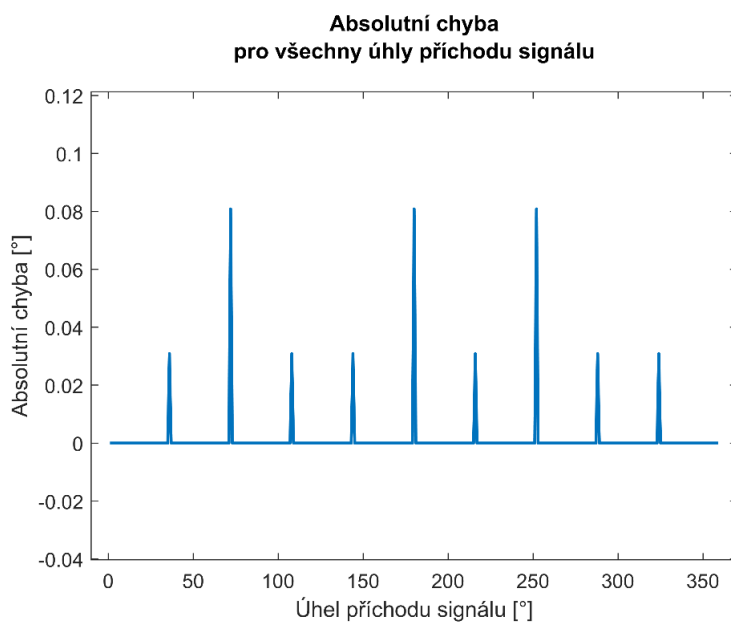
¹¹ Vlastní zdroj

Vytvořené rozestavení přijímací soustavy je vizualizováno na Obr. 12. Pro vizuální představu o celé soustavě jsou jednotlivé přijímače označeny Rx_1 až Rx_N .



Obr. 12– Zobrazení vytvořených přijímacích soustav¹²

Následná analýza je zobrazena grafem na Obr. 13, na kterém je vizualizovaná následná chyba, která nastává při porovnání skutečného úhlu s vypočtenými přes simulátor.



Obr. 13– Zobrazení chyb u jednotlivých stupňů¹³

¹² Vlastní zdroj

¹³ Vlastní zdroj

V případě, že uživatel nechce otáčet vysílací anténou okolo středu pozic přijímacích antén (analýza neproběhne), může si zvolit i konkrétní statický úhel pozice vysílací antény vůči středu přijímacích antén. Lze to provést zaškrtnutím pole *Konkrétní úhel*, tím se uživateli objeví editační okno *Úhel*, do kterého lze zadat konkrétní úhel pozice vysílače vůči středu přijímacích antén. Tento druh simulace je uveden na Obr. 14.

Konkrétní úhel

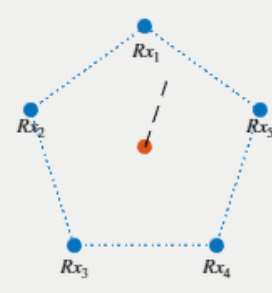
Frekvence MHz

Počet přijímačů Konkrétní úhel

Vzdálenost mezi Tx a Rx m **Úhel** °

Otočení ° **Vypočítaný úhel je 71.9191515...**

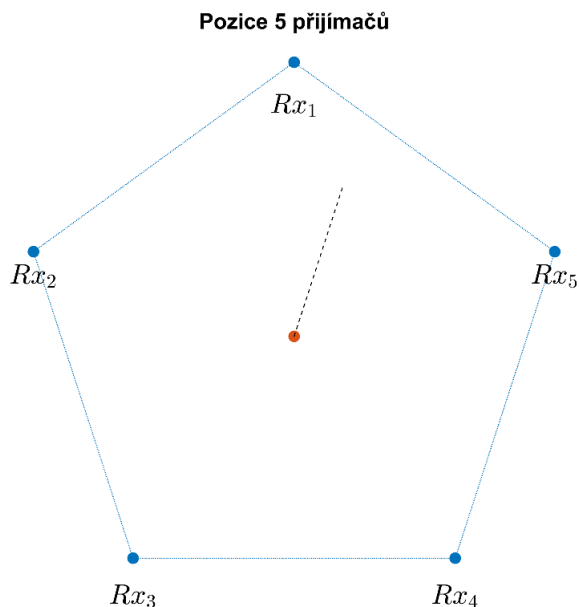
Pozice přijímačů



Obr. 14– Vizualizace simulátoru pro zadávání konkrétního úhlu¹⁴

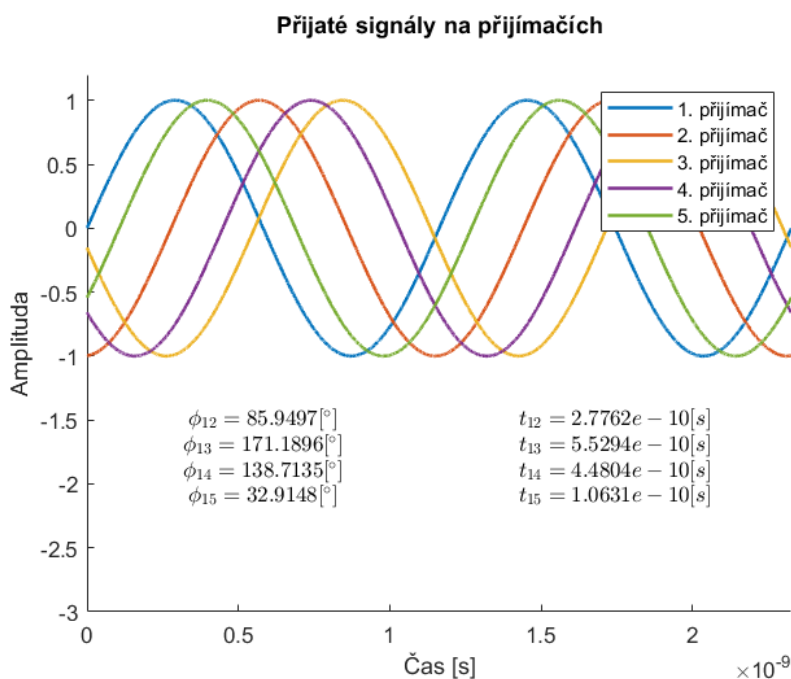
Vytvořené rozestavení přijímací soustavy je vizualizováno, jak je vidět na Obr. 15. Stejně jako na Obr. 12, jsou zde označeny jednotlivé přijímače a oranžovou tečkou je zde označen střed této přijímací soustavy. Černá čárkovaná čára zde reprezentuje směr příchodu signálu.

¹⁴ Vlastní zdroj



Obr. 15– Zobrazení vytvořených přijímacích soustav¹⁵

Při zadání konkrétních polárních souřadnic (vzdálenost a úhel) vysílače simulátor umožňuje zobrazení přijatých signálů i s informacemi o zpoždění vůči první přijímací anténě. Na Obr. 16 je tato situace zobrazena.



Obr. 16– Přijaté signály a zpoždění vůči 1. přijímací anténě¹⁶

Ve druhé části simulátoru (Obr. 17) je koncipován na libovolné rozestavení přijímačů v kartézských souřadnicích. Z důvodu možnosti manuálního zadávání byl maximální počet

¹⁵ Vlastní zdroj

¹⁶ Vlastní zdroj

přijímačů omezen na 5. Do kartézských souřadnic se také zadává i pozice vysílače, nebo přes zadání konkrétní hodnoty úhlu a vzdálenosti. Zadávání pozic vysílače i přijímačů jsou v jednotkách m . Stejně jako u předchozí části simulátoru je i zde možnost zadávat vysílací frekvenci. Hlavní výhodou této části simulátoru je, že si uživatel může umístit přijímače na libovolné pozice. Uživatel nemusí vždy využít 5 přijímačů (maximální počet), ale lze jich použít i méně. V případě, že uživatel chce využít pouze tři přijímače, je zapotřebí do polí souřadnic x a y 4. a 5. přijímače vyplnit *Inf* (Nekonečno).

Manuální zadávání pozice vysílače a přijímačů

Frekvence MHz

Pozice přijímačů		Pozice vysílače	
X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]
<input type="text" value="0.05"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="500"/>	<input type="text" value="750"/>
<input type="text" value="-0.05"/>	<input type="text" value="0"/>		<input type="checkbox"/> Zadání úhlu
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.05"/>	Uhel [°]	Vzdálenost [m]
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="-0.05"/>	<input type="text" value="56.31"/>	<input type="text" value="901.4"/>
<input type="text" value="Inf"/>	<input type="text" value="Inf"/>		

Výsledný úhel příchodu signálu: 56.3099

Chyba výsledného úhlu: 1.0353e-10

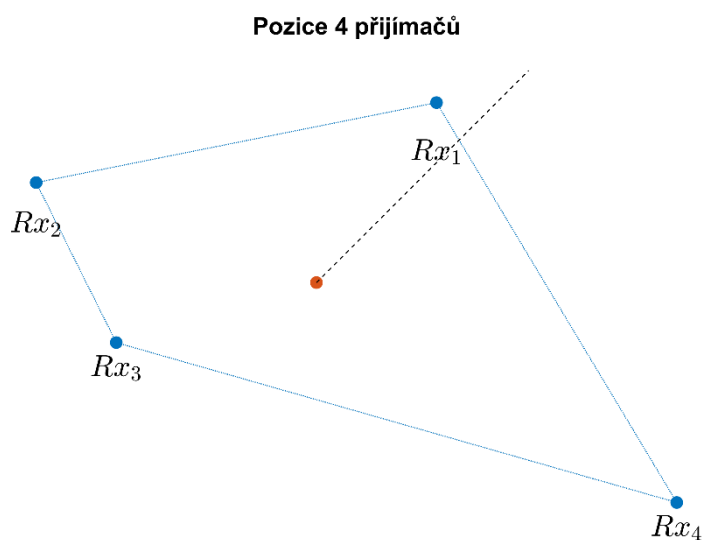
Lambda/2: 0.17442 m

Max. vzd. mezi Rx: 0.1 m

Obr. 17– Vizualizace manuální části¹⁷

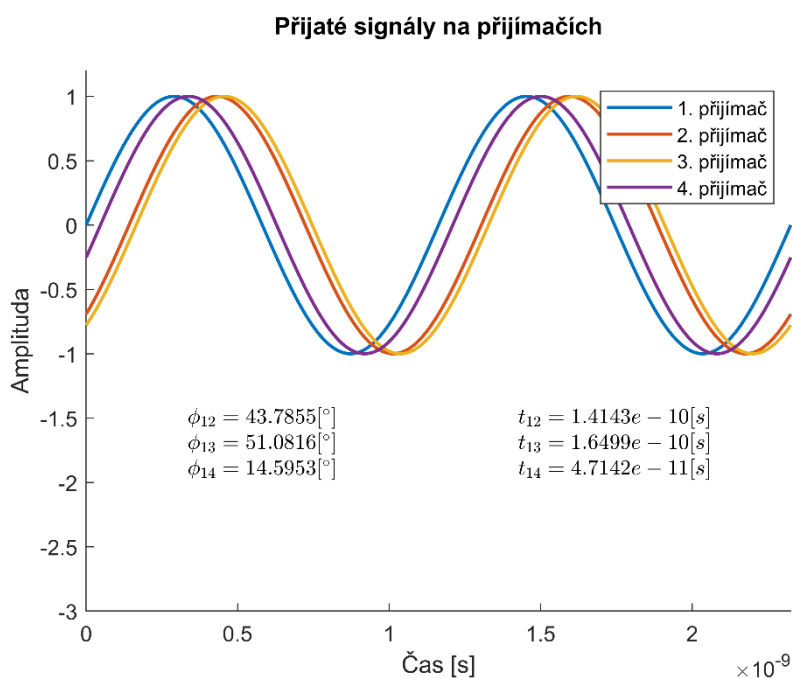
Vytvořené rozestavení přijímací soustavy je vizualizováno na Obr. 18. Jsou zde označeny jednotlivé přijímače a oranžovou tečkou je zde označen střed této přijímací soustavy. Černá přerušovaná čára zde reprezentuje směr příchodu signálu.

¹⁷ Vlastní zdroj



Obr. 18– Pozice manuálně rozmístěných přijímačů¹⁸

Taktéž je zde zobrazen i průběh jednotlivých signálů z každé antény se zobrazením jejich časových rozdílů mezi nimi (Obr. 19).



Obr. 19– Vizualizace průběhu na jednotlivých přijímačích¹⁹

¹⁸ Vlastní zdroj

¹⁹ Vlastní zdroj

2.2 Vytváření anténních soustav a výpočet časových složek

Pro sestavení přijímací soustavy je zapotřebí znát počet antén, ze kterých se soustava bude sestavovat N a frekvenci přijímaného signálu f pro výpočet maximální délky mezi jednotlivými anténami d . Pomocí těchto údajů lze vytvořit symetrickou přijímací soustavu pro libovolný počet přijímačů (trojúhelník, čtyřúhelník, ...). Kde první anténa je dosazena do úhlu 90° a ostatní jsou posunuty o úhel $\frac{360^\circ}{N}$, což reprezentuje parametr *uhel*. Taktéž je zde zahrnuta možnost celou soustavu otáčet po libovolných stupních proměnnou *otoceni*. Následný výpočet jednotlivých pozic je vypočítán přes vzorec

$$R_{nx} = \left(\frac{d}{2} * \cos(uhel + otoceni) \right) \quad (2.1)$$

$$R_{ny} = \left(\frac{d}{2} * \sin(uhel + otoceni) \right) \quad (2.2)$$

Simulátor dále umožňuje dosazení jednotlivých hodnot manuálně a sestavení si tak soustavy libovolných tvarů podle vlastního uvážení. Tato samá metodika platí i pro pozici vysílací antény, která může být takto sestavena. Přijímací anténa může být sestavena i za pomoci přímého dosazení úhlu, ve kterém by se měla nacházet, tím je pak známa přesná hodnota úhlu, který by měl správně vyjít. K přijímací anténě se váže ještě jeden parametr vzdálenosti D , který nám udává vzdálenost vysílací antény od přijímací soustavy, díky kterému můžeme měnit vzdálenost, ze které vysílač vysílá. Díky znání těchto souřadnic je možné přes výpočet

$$dist_n = \sqrt{(R_{nx} - T_x)^2 + (R_{ny} - T_y)^2} \quad (2.3)$$

zjistit jednotlivé vzdálenosti antén od vysílače. Při jednotlivých vzdálenostech se přes znalost rychlosti šíření signálu z kapitoly 1.1 následně může odvodit časová hodnota doby, kterou signálu trvalo urazit tuto vzdálenost.

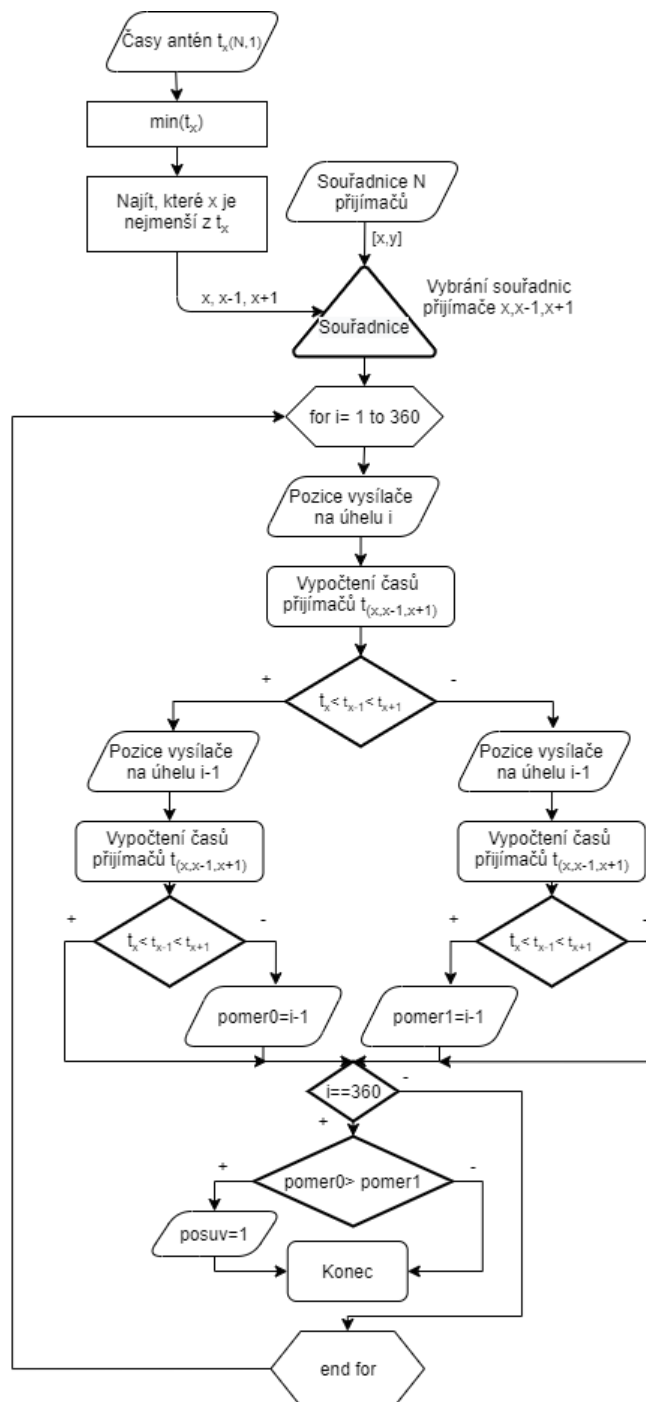
$$t_n = \frac{dist_n}{c} \quad (2.4)$$

Z těchto časových informací t_n lze posléze určit fázové rozdíly mezi jednotlivými přijímacími anténami. Tyto fázové rozdíly mezi jednotlivými přijímači jsou hlavními vstupními parametry, které nám umožňují určení směru příchodu signálu. Pro usnadnění výpočtů jsou fázové posuny přepočítány na časové zpoždění mezi jednotlivými anténami.

2.3 Zjištění potenciálního rozsahu úhlů první přijímací antény

Ke zjištění správného úhlu příchodu signálu je zapotřebí znát, která z antén přijala signál jako první a vypočítat podle její pozice a pozice obou sousedních antén úhlový rozsah, ve

kterém mohl být signál vyslán, protože bez těchto údajů je zcela nemožné správné určení hledaného úhlu. Pro zjištění první antény jsou v programu porovnány velikosti všech časových veličin spjatých s jednotlivými anténami, podle procesu na Obr. 20, kde se hledá čas s nejmenší velikostí přes funkci *min*. Po jeho určení se zjistí pozice dané antény a obou postranních. Následně jsou tyto tři umístěny do cyklu *for*, kde se nasimuluje vysílač, který přes cyklus *for* projde všechny úhly kolem těchto antén po celých 360°. Během jeho průchodu se hledá, kdy nastane okamžik, ve kterém daná anténa zachycuje signál jako první oproti sousedním, následně se vezme vysílač o úhel předtím a zjišťuje se, zda i v tomto daném postavení též zachycuje signál jako první. Když tuto podmínku nesplňuje, je tento úhel uložen jako proměnná *pomer0*, což reprezentuje úhel příchodu signálu, ve kterém se jeví jako prvotní. Pakliže prvotní podmínky nesplňuje, je opět vybrán předcházející úhel a zjišťuje se, zdali zde podmínku splňuje. Při splnění je tento úhel brán jako moment, ve kterém o toto prvotní privilegium přichází a je uložen do proměnné *pomer1*. Tím se zjistí hranice možných úhlů příchodu. Může také nastat situace, kdy hodnota *pomer1* přesáhne hodnotu 360°, protože Matlab nepozná, že daná hodnota přesáhla úhel 360°, ale bere ho jako obyčejný úhel, mohlo by to vyústit při odečtení k změně rozsahu z hodnot 290°-50° na 50°-290°, to je ošetřeno přes funkci *if*, kdy na konci cyklu je porovnávána velikost těchto dvou proměnných a při zjištění daného přechodu je vytvořena proměnná *posuv*, která tento posuv přes úhel 360° udává, aby bylo známo, jaké podmínky mají být využity při zjišťování správného úhlu z párů, které je popsáno v kapitole 2.5.



Obr. 20– Vývojový diagram zjištění hranic možných úhlů příchodu²⁰

2.4 Výpočet možných úhlů

Na výpočet úhlů byla použita cyklometrická funkce \arcsin , kde se počítal rozdíl mezi vzdáleností fázového rozdílu jednotlivých přijímačů reprezentovaný proměnnou d_{ab} , kde ab udává indexy přijímačů a vzdálenosti mezi samotnými přijímači proměnnou d .

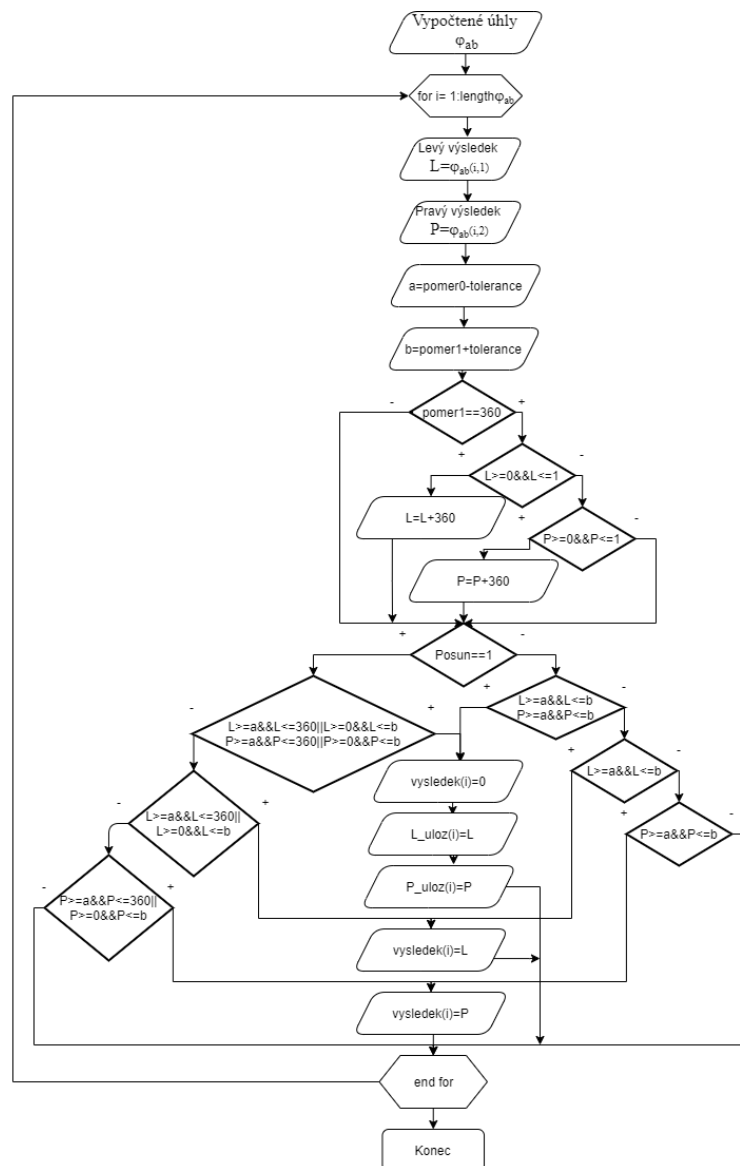
²⁰ Vlastní zdroj

$$\varphi_{ab} = \arcsin\left(\frac{d_{ab}}{d}\right) \quad (2.5)$$

Tento vypočtený úhel nemusí vždy být správný z důvodu, že musíme brát v potaz, že při měření daného úhlu můžeme brát i fakt, že se vysílač může nacházet i na opačné straně a tím vznikají dva možné výsledky (pár), kde se tento vysílač může nacházet a přes hledací algoritmus se tento výsledek upřesní. To však ale neplatí u soustav tvořených pouze ze dvou antén nebo při vyšších soustavách, kde všechny přijímače jsou umístěné v jedné linii, tam tato nejednoznačnost nelze odstranit. Do výsledného vzorce jsou zahrnuty i úhly, kde se lámou časové rozdíly antén takzvané zlomové úhly, které jsou vypočteny přes arctan souřadnic daných antén a tím zmenšujeme možnou chybu v těchto konkrétních místech.

2.5 Zjištění správného úhlu

Jak už bylo zmíněno v předchozí kapitole, při výpočtu možného úhlu vznikají dva možné výsledky neboli pár. Tato část programu na Obr. 21 se zaměřuje na hledání správného výsledku z daného páru. Za pomoci znalostí možných hranic úhlů příchodu, o jejichž vzniku pojednává kapitola 2.3, se vytvoří cyklus *for*, který je spjatý s počtem párů, které byly vypočteny. Dále se pár rozdělí na jednotlivé části levou *L* a pravou *P* a vytvoří se podmínky z vypočítaných proměnných *pomer0* a *pomer1*, ke kterým je zahrnuta proměnná *tolerance*, ta plní úlohu mezí, ve kterých budou podmínky zahrnuty, protože může nastat situace, kdy hledaný výsledek bude mít vyšší či nižší hodnotu od reálné a bez nich by nebyl do výpočtů zahrnut. Toto by mohlo vést k vybrání druhého špatného úhlu a tím zanést do výsledku chybu. Následně jsou zkontrolovány ochrannou podmínkou, která zajišťuje situaci, kdy hranice končí přímo na hodnotě 360°, kde následné párové výsledky mohou nabývat hodnot 0°-1° a tím se nacházejí mimo hranice a nemusí být zahrnuty, a proto je k nim přičtena hodnota 360°, aby se této situaci zabránilo. Následně projdou kontrolou, zda hranice nepřekročily úhel 360° přes proměnnou *posuv*. Tím jsou zvoleny vhodné podmínky *if*, kde se každý pár podrobí těmto hranicím a hledá se v nich hodnota, která těmto možným hranicím odpovídá a je uložena do proměnné *vysledek*. Může ale nastat situace, kdy se obě hodnoty nacházejí v těchto podmínkách, pak je výsledná hodnota nastavena jako nulová a obě dané hodnoty jsou uloženy do specifických proměnných *L_uloz* *P_uloz* a přechází se na další pár.

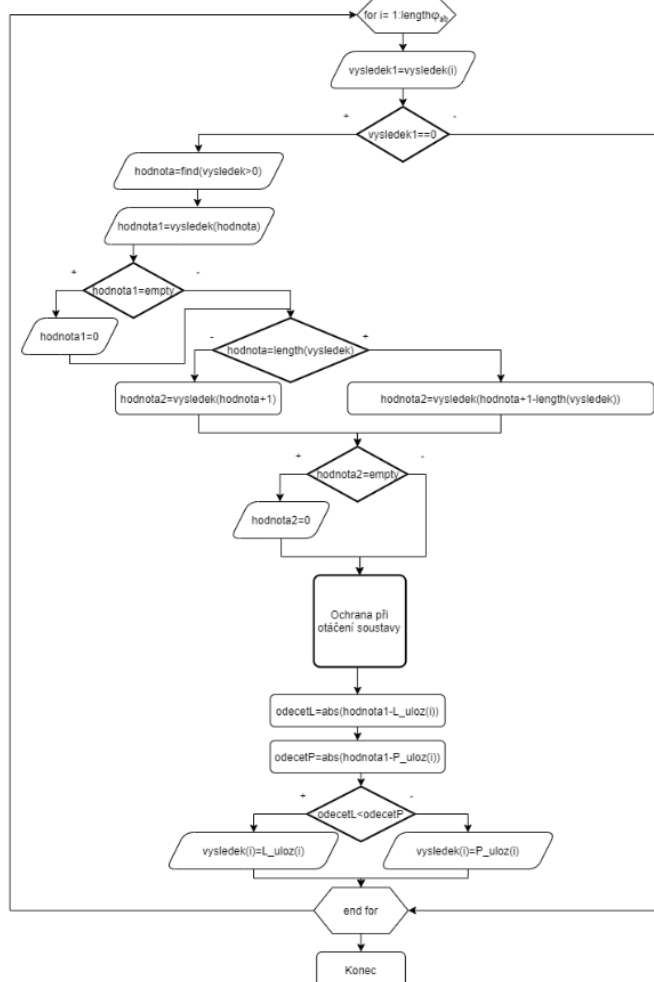


Obr. 21– Vývojový diagram zjištění správných úhlů páru²¹

Po prohledání všech možných párů se začnou přes další cyklus *for* vyobrazený na Obr. 22 vyhledávat místa, kterým byla udělena nulová hodnota a z proměnné *vysledek* se vezme nenulová hodnota proměnná *hodnota1*, která reprezentuje již správně zjištěný úhel. Tato hodnota je zkontrolována, zda není prázdná, protože může nastat situace, kdy všechny páry měly výsledky v hranicích a nemusí zde být žádná hodnota, to nastává kolem nulového úhlu a dosazením 0 se tento problém vyřeší. Následně je vytvořen další parametr *hodnota2*, který předbíhá parametr *hodnota1* a slouží jako ochrana při otáčení soustavy. Může totiž nastávat situace, kde při otáčení přijímací soustavy mohou nastávat problémy u zlomových úhlů 360°-0°, kdy výsledná hodnota páru může být oproti své špatné části nižší. To může vést k problému, protože se výsledná hodnota zjišťuje odečtem od *hodnota1*, kde může nastat situace vybrání nesprávné hodnoty. V této ochranné části jsou mezi sebou porovnávány

²¹ Vlastní zdroj

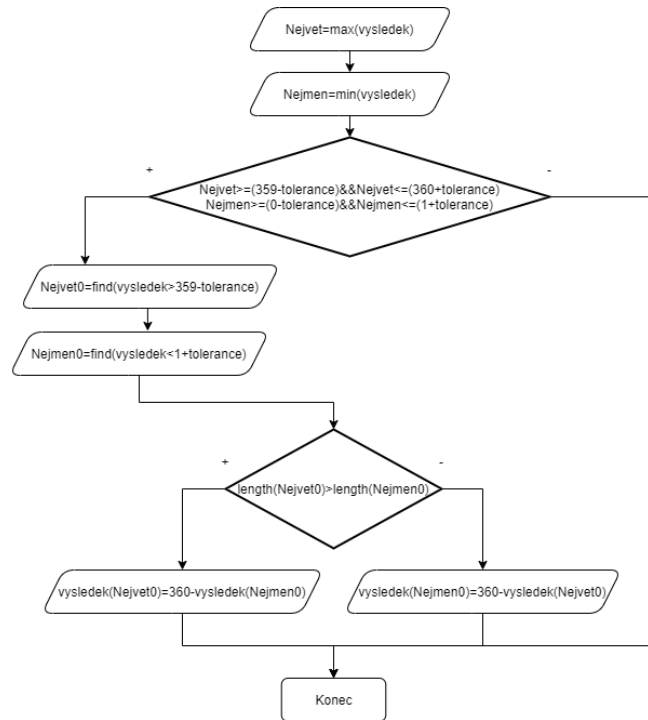
hodnoty *hodnota1* a *hodnota2* společně s párovými výsledky *L_uloz* *P_uloz*. Na základě těchto vazeb je *hodnota1* vhodně upravena buď přičtením hodnoty 360, nebo naopak odečtením od ní, aby se těmto krajním chybám zabránilo. Následně jsou hodnoty *L_uloz* *P_uloz* odečteny od upravené *hodnota1* a poté se hledá nejmenší hodnota odečtů a daná hodnota je na tento post dosazena. Tím se tato nejednoznačnost v daných místech vyřeší.



Obr. 22– Vývojový diagram zjištění správných úhlů páru²²

Další chyba může nastávat v krajních úhlech, a to jsou úhly 360° - 0° , kdy nastává, že jeden výsledek páru bude mít hodnotu kolem úhlu 360° a další zase u 0° . Jelikož se finální úhel počítá průměrnou hodnotou těchto úhlů, může nastat na těchto úhlech velká chybovost. To je zajištěno způsobem, jež je zobrazen na Obr. 23, že se v parametru *vysledek* vyhledávají hodnoty blížíící se těmto úhlům a podle jejich nalezeného počtu, kterého je víc, se rozhoduje, zdali by mělo nastat u konkrétních úhlů přičtení nebo odečtení jejich hodnoty o 360° . Tímto způsobem je zajištěno správné dohledání a dokorigování úhlů, ze kterých se následně spočítá jejich průměrná hodnota, která má reprezentovat hledaný úhel.

²² Vlastní zdroj



Obr. 23– Vývojový diagram pro upřesnění úhlů na hranici 360²³

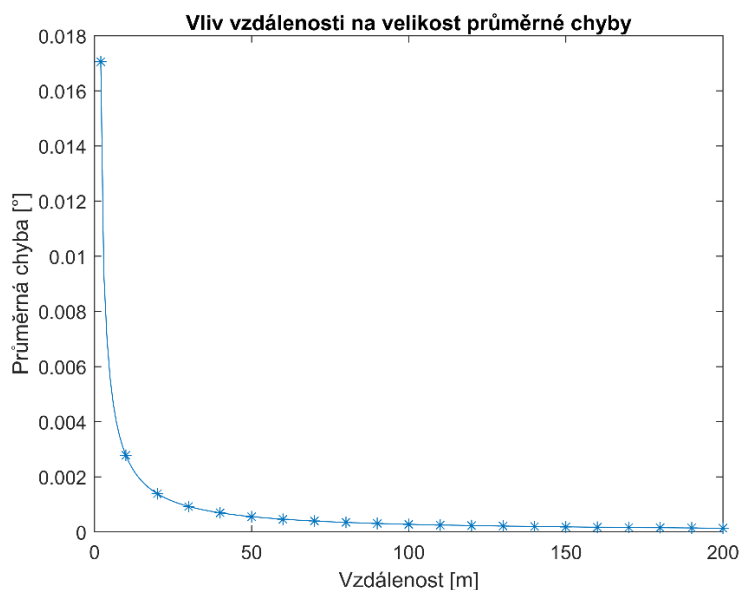
²³ Vlastní zdroj

3 Analýza vlivů ovlivňující přesnost měření

Tato kapitola je zaměřena na vlivy, které byly během poznatků upozorovány, že mají vliv na míru přesnosti simulátoru. Jedná se o vliv vzdáleností vysílací antény od přijímací soustavy, vliv zlomových úhlů a počtu antén, ze kterých je sestavena přijímací soustava.

3.1 Vliv vzdálenosti mezi vysílačem a přijímací soustavou

Jelikož se úhel počítá přes poměr vzdáleností mezi jednotlivými přijímači a vysílači a vzdáleností mezi přijímači podle rovnice (2.5), tak může nastávat situace při malých vzdálenostech mezi přijímací soustavou a vysílačem, kdy jsou tyto vzdálenosti pro jednotlivé přijímače velice rozdílné a tím pro každý přijímač mohou vycházet jiné výsledné úhly, což vede k horší přesnosti. Se zvětšujícím se odstupem vysílače se pak tyto rozdíly vzdáleností vyrovnávají. Na Obr. 24 je vidět graf při soustavě tvořené ze tří antén bez pootočení na frekvenci 860MHz s rozestupem mezi anténami $\frac{\lambda}{2}$, jak vzdálenost ovlivňuje velikost průměrné chyby výpočtu.



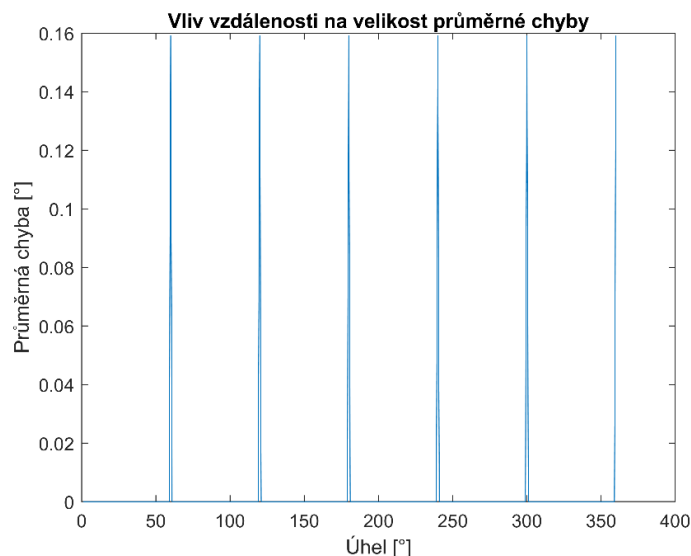
Obr. 24– Graf závislosti vzdálenosti mezi vysílačem a přijímací soustavou na průměrné chybě²⁴

3.2 Vliv zlomových úhlů

Při výpočtech úhlů se můžeme setkat s takzvanými zlomovými úhly, kde se lámou časové rozdíly antén a vytváří se zde chyba z důvodu nejasnosti, která anténa zachycuje v daném místě signál jako první. Tyto úhly lze vypočítat přes arctan souřadnice daných antén. Jejich počet je roven dvojnásobku všech možných časových kombinací, protože tento úhel může nastat, jak je vidět na Obr. 25 u soustavy se třemi anténami v úhlu 60° a taktéž na jeho opačné straně posunutě o 180° v úhlu 240°. V těchto úhlech pak mohou nastat výpočetní chyby

²⁴ Vlastní zdroj

s mnohem větší chybou, jako u ostatních a tím snížit celkovou přesnost simulátoru. Je možné snížit velikost jejich chyb tím, že se bude soustava skládat z více antén, o čemž pojednává následující kapitola.



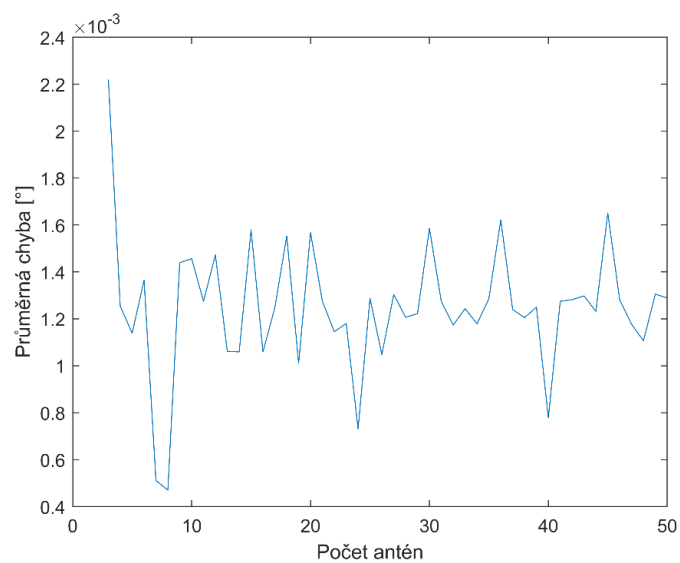
Obr. 25– Graf vizualizace zlomových úhlů²⁵

3.3 Vliv počtu antén v přijímací soustavě

Pro odstranění nejednoznačnosti výsledků je zapotřebí, aby soustava byla složena z více jak dvou antén. Avšak s rostoucím počtem antén vzniká více zlomových úhlů, ve kterých si jsou dvě antény rovny, nebo kde se lámou a vytváří se zde tím výpočetní chyba, což je vykompenzováno tím, že s větším počtem antén se tato chyba zmenšuje. Na Obr. 26 je pak vidět při nastavené frekvenci 860MHz na vzdálenosti 10 metrů s rozstupem mezi anténami

$\frac{\lambda}{2}$, jak počet antén v soustavě ovlivňuje výslednou přesnost.

²⁵ Vlastní zdroj

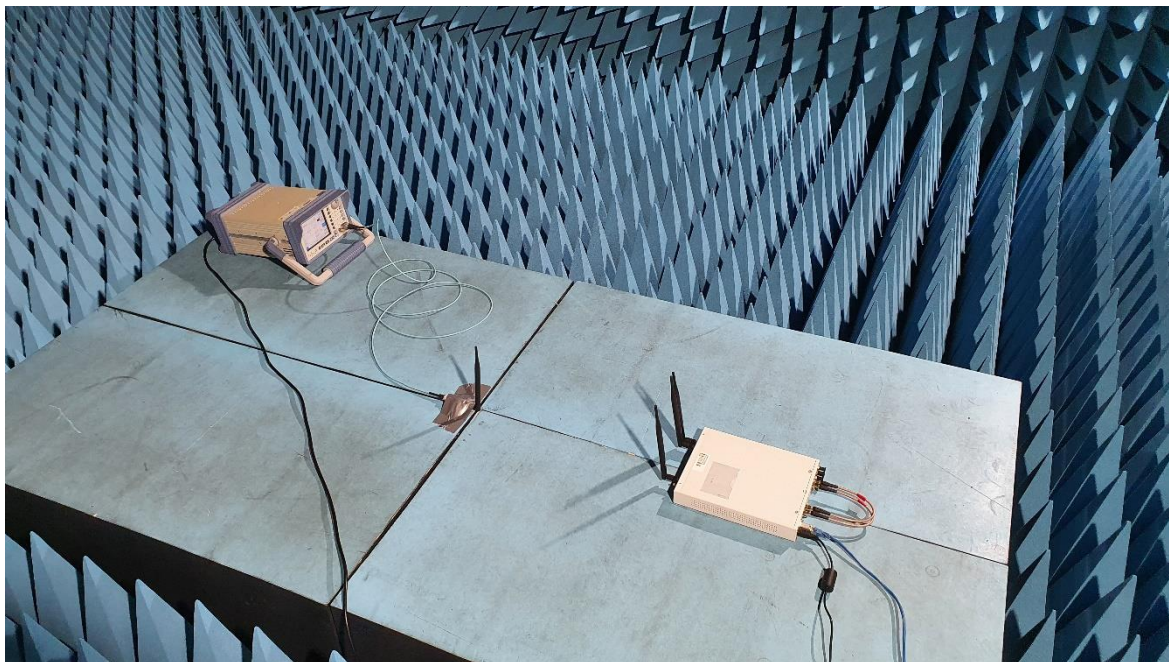


Obr. 26– Graf závislosti počtu antén v soustavě na průměrnou chybu²⁶

²⁶ Vlastní zdroj

4 Měření

Tato kapitola je věnována popisu měření, které bylo provedeno za účelem otestování funkčnosti měřicího simulátoru na reálných hodnotách. Na Obr. 27 je ukázáno měřicí pracoviště v bezodrazové komoře. Hardwarové vybavení bude popsáno v následujícím oddíle.



Obr. 27– Ukázka měřicího pracoviště²⁷

4.1 Vektorový generátor SM300

Jako zdroj vysílaného signálu byl použit vektorový generátor SM300 (Obr. 28) od společnosti Rohde&Schwarz zabývající se vývojem radiomonitoringu, radiolokace, radiokomunikace a dalších. Důležité parametry generátoru popisuje Tabulka 2.[16]

Tabulka 2– Důležité parametry vektorového generátoru SM300 [16]

Frekvenční oblast	9kHz~3GHz
Nastavení rozlišení	0.1Hz
Referenční frekvence	10MHz
Činitel stojatého vlnění	<1.8
Impedance	50Ω
Operační teplota	5°C~45°C

Tímto zdrojem se generuje sinusový signál o frekvenci 860MHz, který je posléze vysílán anténou do prostoru. Nebyla využita žádná modulace, byl přímo vysílán čistý sinusový signál.

²⁷ Vlastní zdroj



Obr. 28– Vektorový generátor SM300²⁸

4.2 Anténa VERT900

Pro vysílání a přijímání dat mezi jednotlivým rozhraním byl zvolen typ antény VERT900 (Obr. 29). Jedná se o výrobek společnosti Ettus Research, která se zabývá vývojem a distribucí více druhů softwarových radií a antén pro bezdrátovou komunikaci a posílání dat. Důležité parametry antény popisuje Tabulka 3.[12]

Tabulka 3– Důležité parametry antény VERT900 [12]

Frekvenční oblast	824~ 960-1710~ 1990MHz
Zisk	3dBi
Polarizace	Lineární
Činitel stojatého vlnění	3.0:1
Impedance	50Ω

Jeden z nejdůležitějších parametrů antény je frekvenční rozsah. Díky přímému konektoru na těle antény je i velmi jednoduchá instalace a ukotvení pro zamezení vychýlení antén při jejich používání a zkruslení jejich parametrů.

²⁸ Vlastní zdroj



Obr. 29– Anténa VERT900²⁹

Tyto antény byly využity po čtyřech kusech, kde jedna anténa slouží jako část vysílací části, která vysílá signál na zbylé tři antény, které tvoří přijímací část. Tato přijímací část byla postavena v přímce z důvodu jejich absence kabelu za účelem odstranění ztrát, které by kabely způsobily.

4.3 Koherentní přijímač NI-USRP-2945

Jako hlavní přijímací prvek bylo použito zařízení USRP-2945 (Obr. 30) známé jako zařízení typu SDR (Softwarově definované rádio), je vyráběno firmou National Instruments, která se zabývá vývojem automatizovaných testovacích zařízení a jejich následnému ovládní sběru dat a strojového vidění. Toto zařízení bylo navrženo a uzpůsobeno pro rychlé a snadné prototypování vysoce výkonných bezdrátových přijímacích systémů. Jeho účelem je schopnost vysílání/přijímání a následná analýza signálů šířících se prostorem. Model je vybaven dvoustupňovou superheterodynou architekturou s čtyřmi nezávislými kanály přijímače, kde každý pár má vlastní místní oscilátor. Důležité parametry přístroje popisuje [13]. Tabulka 4 vystihuje základní parametry zařízení USRP-2945.



Obr. 30– USRP-2945³⁰

²⁹ Vlastní zdroj

³⁰ Vlastní zdroj

Tabulka 4– Důležité parametry zařízení USRP-2945 [14]

Počet kanálů	4
Frekvenční rozsah	10MHz~6GHz
Rozsah zesílení	0dB~95dB
Maximální okamžitá šířka pásma v reálném čase	80MHz
Maximální vzorkovací frekvence I/Q	100MS/s
Analogový-digitální převodník	14bitů
Operační teplota	0°C~55°C

Na předním panelu přístroje se nachází několik portů (Obr. 31). Port JTAG je USB port, přes který se hostitelský počítač připojuje k FPGA pro jeho obnovení a konfiguračnímu zařízení Xilinx iMPACT pro načtení nového bitového souboru. Dále se zde nacházejí čtyři vstupní svorky RX pro RF signál, které jsou rozděleny po párech do dvou skupin (RF0, RF1), kde každá tato dvojice má svůj slastní místní oscilátor. RX je tvořena konektorem SMA s impedancí 50Ω. Poslední konektor je AUX I/O, což je univerzální I/O (GPIO) port řízený FPGA. A v neposlední řadě tlačítko PWR na zapnutí/vypnutí přístroje. Dále se zde nacházejí i kontrolní LED diody. Každý RX má vlastní diodu, při vypnutém stavu nám oznamuje, že kanál nepřijímá žádná data, naopak při zeleném rozsvícení, data přijímá. Dále je tu dioda REF, která nám označuje stav referenčního signálu, nesvítlí-li, není připojen žádný referenční signál, pokud zeleně bliká, je připojeno, ale nebyl zachycen referenční signál, či svítí zeleně a je zachycen referenční signál. Vedle REF se nachází PPS dioda, která udává synchronizační impuls po sekundě, pokud nesvítlí, není časová reference připojena a zařízení není zachyceno na tuto referenci a pokud svítí, je připojena. GPS ukazatel indikuje, zda je připojené (zelená) GPSDO či nikoliv (zhasnuto). A poslední LINK kontroluje, zda je zařízení připojeno (zelená) k hostitelskému počítači.[15]



Obr. 31– Přední panel USRP-2945³¹

Na zadním panelu se nacházejí další možné porty (Obr. 32). Konektor PWR slouží na zapojení napájecího kabelu přístroje. Dále je zde 1G/10G ETH, což jsou dva ethernetové terminály na připojení 1G ethernet kabelu nebo 10G ethernet kabelu s hostitelským počítačem pro vysokorychlostní přesun dat v reálném čase s kontrolními diodami nad sebou, pro kontrolu připojení a toku dat. Pak skupinu LO OUT 1, kde se nacházejí svorky IF2

³¹ Vlastní zdroj

a IF1. IF2 svorka představuje výstup pro IF LO signál z RF1 a IF1 svorka představuje výstup pro RF LO signál z RF. Pod nimi se nachází skupina REF, která se skládá ze svorky IN a OUT. Svorka IN je vstup pro externí referenční signál pro LO a OUT jeho výstupem. Za větráky se nacházejí dvě totožné skupiny LO IN 0 a LO IN 1, v každé se nachází svorka IF2 a IF1. Přestavují svorky pro externí signál ke vstupu IF LO na RF0, tento signál může být použit i jako zdroj LO pro RF0, pro jeho následné nastavení. PCIe x4 konektor pro přenos dat. PPS TRIG skupina se svorkou IN a OUT. IN představuje vstup pro synchronizační časovou referenci PPS a také může být použit jako aktivní vstup (TRIG IN) a OUT pro jeho výstup. A poslední GPS ANT vstupní port pro signál z antény GPS.[15]



Obr. 32– Zadní panel USRP-2945³²

Aby bylo zařízení schopno pracovat pro fázově koherentní provoz, musí se modifikovat tak, že se na zadním panelu propojí skupiny LO OUT 1 a LO IN 0 (Obr. 33) stejně dlouhými kabely, aby nenastalo zpoždění v toku dat, přes LO OUT 1 se společně LO synchronizují a vytvoří dojem jednoho místního oscilátoru pro všechny čtyři kanály. [15]



Obr. 33– Synchronizace místních oscilátorů³³

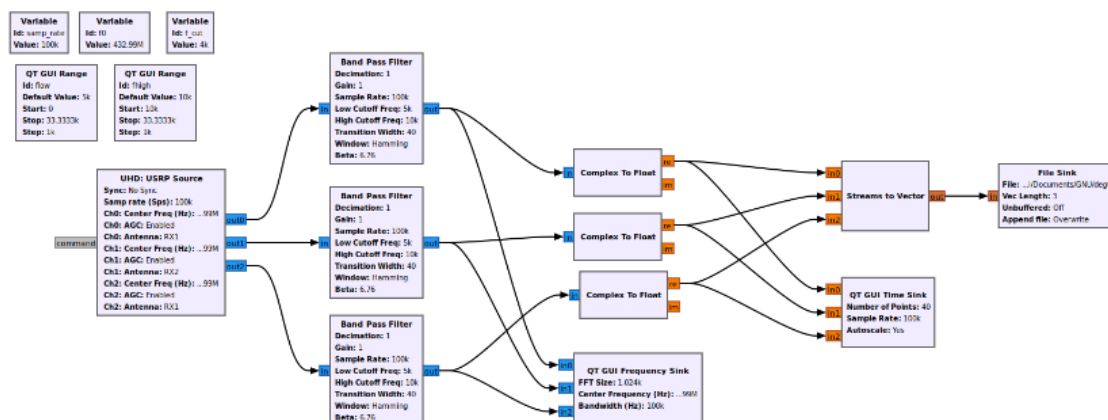
³² Vlastní zdroj

³³ Vlastní zdroj

Zařízení je možné programovat pomocí softwaru LabVIEW, Matlab a taktéž GNU Radio, které bylo pro komunikaci zvoleno a tento software bude blíže popsán v následujících kapitolách.

4.4 GNU Radio

GNU Radio je bezplatná sada nástrojů pro vývoj softwarů, je vyvíjena společností GNU Radio. Tento software má své unikátní rozhraní zpracované pomocí bloků (Obr. 34), ve kterých se nacházejí různorodé procesy pro zpracování signálů a tyto procesy se následně implementují do softwarových radií. Je využíván pro softwarové vytvoření definovaných radií nebo i k vytváření simulací. Jeho uplatnění je široce používáno ve výzkumných, akademických a vládních prostředích k výzkumu bezdrátové komunikace a i radiových systémů pracujících v reálném čase.[17]

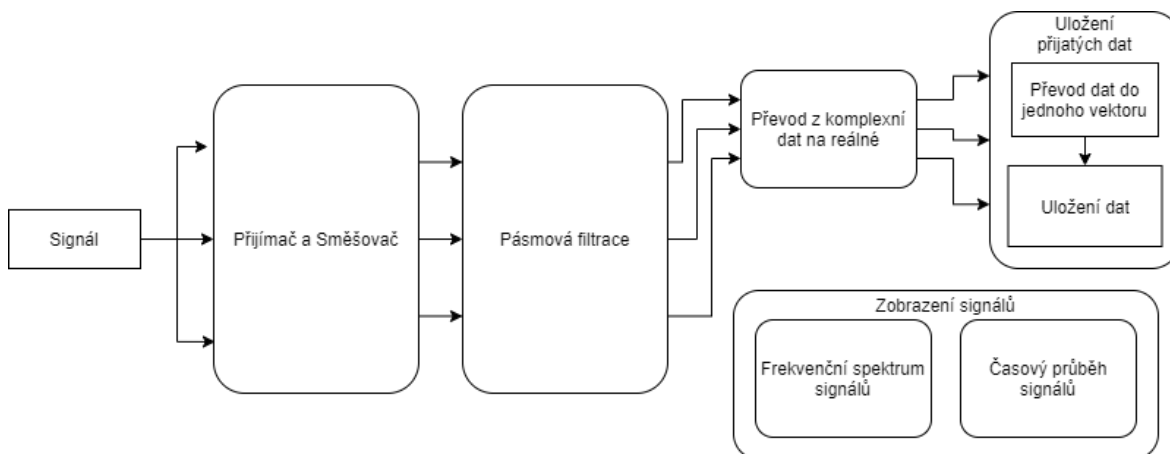


Obr. 34– Rozhraní GNU Radia³⁴

4.4.1 Popis programu softwarového přijímače

Pro přijímání vysílaného signálu byl použit přístroj USRP-2945, který byl programován přes software GNU Radio. Pro správnou funkci se přístroj musel mírně modifikovat, jak je uvedeno v kapitole 4.3. Struktura softwaru je popsána na Obr. 35.

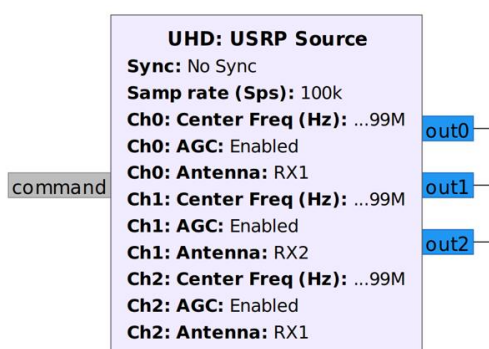
³⁴ Vlastní zdroj



Obr. 35– Blokové schéma softwarového přijímače³⁵

4.4.2 Přijímač a směšovač

Všechny signály jsou zaznamenávány přes blok (Obr. 36), kde se volí přijímací a vysílací svorky. Pro zachytávání určitých signálů je pro každý kanál nastavena centrální frekvence $f_0 = 860\text{MHz}$, na které se přijímají signály. Přijaté signály jsou směšovány na frekvenci 10kHz, neboť při takto velkých frekvencích není možné správně vzorkovat signály bez přetečení vyrovnávací paměti v přijímači, což vede k velkému zkreslení hodnot. Signály jsou posléze vzorkovány přes nastavitelnou proměnnou *samp_rate* na 100kHz. Následně jsou tyto signály rozděleny do jednotlivých výstupů, kde se s každým kanálem pracuje nezávisle.



Obr. 36– Přijímací/Směšovací blok³⁶

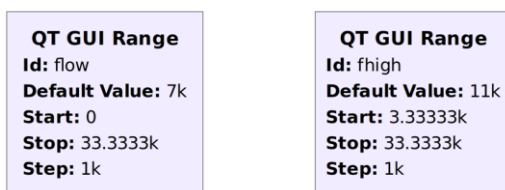
4.4.3 Pásmová filtrace

I po směšování signálu na mezifrekvenci může nastat, že se v daném signálu mohou stále nacházet nežádoucí složky. Proto je nutné tyto signály ještě nechat projít přes pásmovou propust (Obr. 38), které ořízne jen konkrétní úsek frekvenčního pásma a odstraní jej. Filtr využívá princip oken, kde je daný signál vynásoben funkcí okna a nabývá nenulových

³⁵ Vlastní zdroj

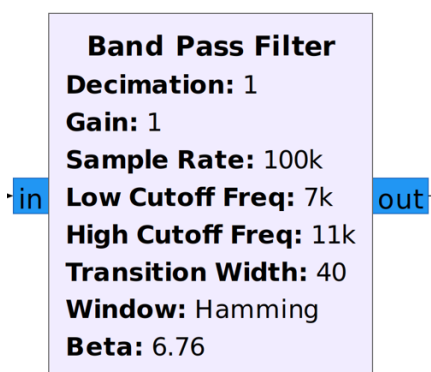
³⁶ Vlastní zdroj

hodnot jen v intervalech daného okna, která se mohou libovolně nastavovat. Pro nastavení těchto hranic slouží proměnné *flow* pro spodní hranici a *fhigh* pro horní hranici (Obr. 37).



Obr. 37– Proměnné hranic filtru³⁷

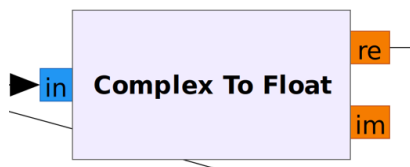
Tyto proměnné jsou zhotoveny ve tvaru posuvníků, s kterými je možné manipulovat a tím je měnit jednoduše během měření.



Obr. 38– Pásmový filtr³⁸

4.4.4 Převod z komplexních dat na reálná

Přijaté signály jsou reprezentovány jako komplexní signál. Ovšem pro naše účely stačila pouze reálná složka tohoto komplexního signálu. Hlavním důvodem bylo to, že jsme vysílali pouze reálný harmonický signál na frekvenci 860MHz, a proto bylo možné využít tuto konverzi. Na Obr. 39 je znázorněn převodník komplexní hodnoty na reálnou a imaginární.



Obr. 39– Převodník z komplexního tvaru na reálné hodnoty (imaginární hodnoty)³⁹

4.4.5 Uložení přijímaných signálů

Jak bylo zmíněno v kapitole 4.4.2, tak byly signály rozděleny do samostatných výstupů pro jejich separované zpracování. Pro ukládání se ale musely spojit do jednoho datového toku pro následnou jednodušší manipulaci. Na to byl využit blok na Obr. 40.

³⁷ Vlastní zdroj

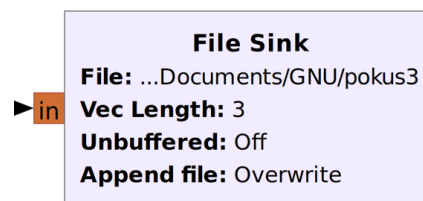
³⁸ Vlastní zdroj

³⁹ Vlastní zdroj



Obr. 40– Blok pro kompresy dat do jednoho toku⁴⁰

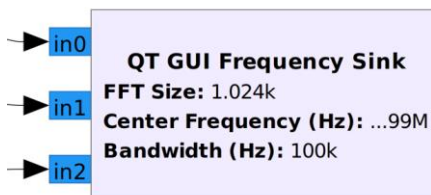
Zde se vytvořil jeden datový vektor, kde pro každý signál byl vyhraněn jeden řádek pro odlišení signálů. Posléze byl tento vektor uložen přes blok (Obr. 41). Tento blok následný vektor uložil do námi pojmenovaného souboru *pokus3*. Zápis započal v moment zapnutí programu a mohl být jen vypnut jejím ukončením, což vede k problematice, kdy pro kalibraci a měření musí být zvolen jeden a ten samý datový soubor, protože při opětovném zapnutí programu se vnitřní oscilátory znovu jinak rozladí a předchozí kalibrace nesplní svůj účel. Toto vede k vytvoření souboru, který může zabírat velké množství dat.



Obr. 41– Blok pro uložení dat⁴¹

4.4.6 Zobrazení přijímaných signálů

Přijaté signály jsou také i vizuálně zobrazeny. Ve frekvenční oblasti (spektru) přes blok (Obr. 42), kde se berou pro její vytvoření data v komplexním tvaru a následně se zde mohou nastavovat pásmové filtry a pozorovat, které frekvence byly tímto přenastavením odfiltrovány.



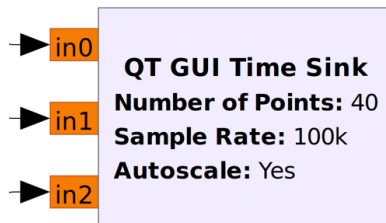
Obr. 42– Blok pro zobrazení frekvenčního spektra signálů⁴²

⁴⁰ Vlastní zdroj

⁴¹ Vlastní zdroj

⁴² Vlastní zdroj

Jsou vizuálně zobrazeny také v časové oblasti přes blok (Obr. 43), kde je ukázán časový průběh jednotlivých signálů. Tento průběh vyžaduje mít data v nekomplexním tvaru a slouží k vizuální kontrole stavu přijatých signálů.



Obr. 43– Blok pro zobrazení časového průběhu signálů⁴³

4.5 Zpracování naměřených dat

Pro ověření simulátoru byl navržen samostatný skript v Matlabu. Tento skript využívá hlavní jádro simulátoru. Skript ovšem obsahuje ještě přidané části, které jsou nezbytné pro reálné měření. Hlavními částmi jsou upřesnění vzorkování signálů a samotná kalibrace měřicího přijímače. Obě tyto problematiky jsou popsány v následujících oddílech.

4.5.1 Upřesnění vzorkování signálu

Podmínkou správného měření fázového posuvu jednotlivých signálů je mít přesně určená místa, kde daný signál stoupá a prochází hodnotou nula. Jelikož byl signál použit na frekvenci 860MHz, měla by být vzorkovací frekvence podle vzorkovacího teorému minimálně dvojnásobná a vyšší, než je signál sám. Ale z důvodu, že přístroj při takto vysokém vzorkování přetékal a vytvářel zkreslené údaje výstupních signálů, bylo zapotřebí snížit vzorkovací frekvenci. To mělo za následek, že signál nebyl dobře proložen a na vzorkované hodnoty nezaznamenávaly pak dobře průchod signálu nulou. To bylo dosaženo tím, že program prohledával jednotlivé navzorkované hodnoty signálu a hledal oblasti, ve kterých hodnota vzorku měnila velikost ze záporných hodnot na kladné, a to díky tomu, že v tomto daném intervalu se funkce sinus jeví jako lineární. Po najetí této oblasti se uložily souřadnicové hodnoty těchto vzorků, $x(1)$ $y(1)$ pro vzorek před průchodem osou x a $x(2)$ $y(2)$ k vzorku po průchodu osou x a byla na ně aplikována směrnicová rovnice přímky.

$$y = k \cdot x + q \quad (4.1)$$

Pro zjištění směrnice přímky k bylo využito podílu rozdílu souřadnic jednotlivých prvků

$$k = \left(\frac{y(2) - y(1)}{x(2) - x(1)} \right) \quad (4.2)$$

a pro úsek q se použila upravená rovnice přímky, za hodnoty x a y byly dosazeny souřadnice jednoho ze vzorků.

⁴³ Vlastní zdroj

$$q = y(1) - k \cdot x(1) \quad (4.3)$$

Pro dopočítání hodnoty vzorku procházejícího nulou už bylo k zapotřebí jen zpětně dosadit do rovnice, kdy je hodnota $y = 0$.

$$x_{y=0} = -\frac{q}{k} \quad (4.4)$$

Tím byla odstraněna nejednoznačnost a zpřesnění vzorkovaného signálu.

4.5.2 Kalibrace a uložení hodnot

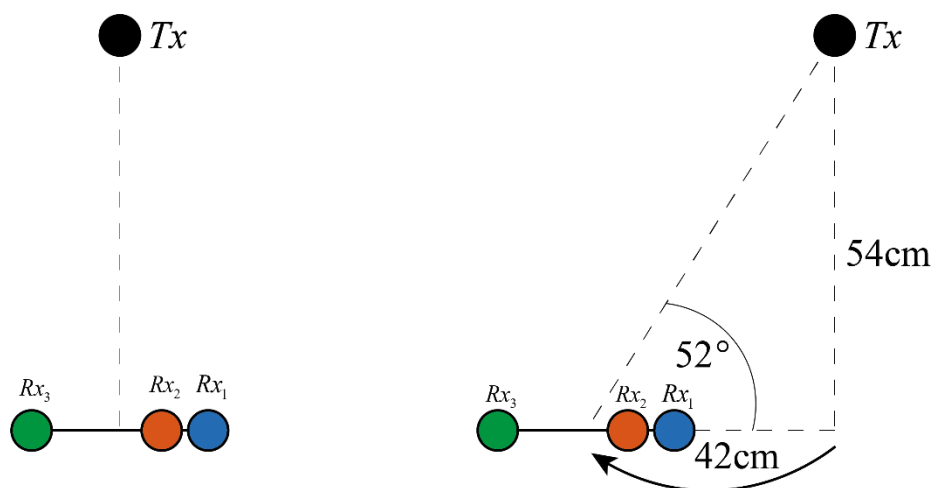
Pro správný výpočet fázových rozdílů signálů musíme prvně zajistit, že žádný signál nebude ovlivněn fázovým posuvem ať už kvalitou jeho přijímacího kabelu, či zpožděním uvnitř přijímacího zařízení. Tento problém je řešen přes takzvanou kalibraci. Kalibrační proces funguje na principu, kdy se vybere jedna referenční anténa (v našem případě první), podle které se korigují ostatní antény (signály). Vysílač se nastaví do určité vzdálenosti od dané antény nejlépe v místech, kde si jsou dvě antény kolmo k vysílači osově souměrné a změří se přesné vzdálenosti mezi vysílačem a ostatními anténami. Naměří se průběhy jednotlivých antén, které jsou následně uloženy do jednotlivých proměnných a jejich signál se upřesní metodou, která byla popsána v předchozí kapitole a určí se vzorkový rozdíl mezi jednotlivými signály. Přes znalost vzdáleností mezi jednotlivými anténami a jejich pozic v prostoru, jsme schopni určit, kde by se měly vůči referenčnímu signálu správně nacházet a daný signál posuneme o určitou průměrnou hodnotu všech časových rozdílů pro konkrétní signál, což nám vytváří naše kalibrační hodnoty. Tyto hodnoty jsou poté převedeny z hodnot vzorků na časové hodnoty přes vynásobení periodou vzorkovací frekvence. Jednotlivé časy jsou mezi sebou odečteny a vznikají tím časové rozdíly jednotlivých signálů, které jsou ještě upraveny podílem hodnoty vysílací frekvence a frekvence, na kterou byly smíšeny v přístroji SDR, aby tyto časové hodnoty odpovídaly časům vysílací frekvence. Poté jsou vytvořeny průměry těchto hodnot a uloženy přes funkci *save* do souboru *mereni.mat* pro jejich opětovné využití v hlavní části programu.

4.6 Realizace měření

Tato část se zabývá realizací ověřovacího měření v rozvržení rozpoložení hardwarových zařízení a následné zpracování naměřených dat.

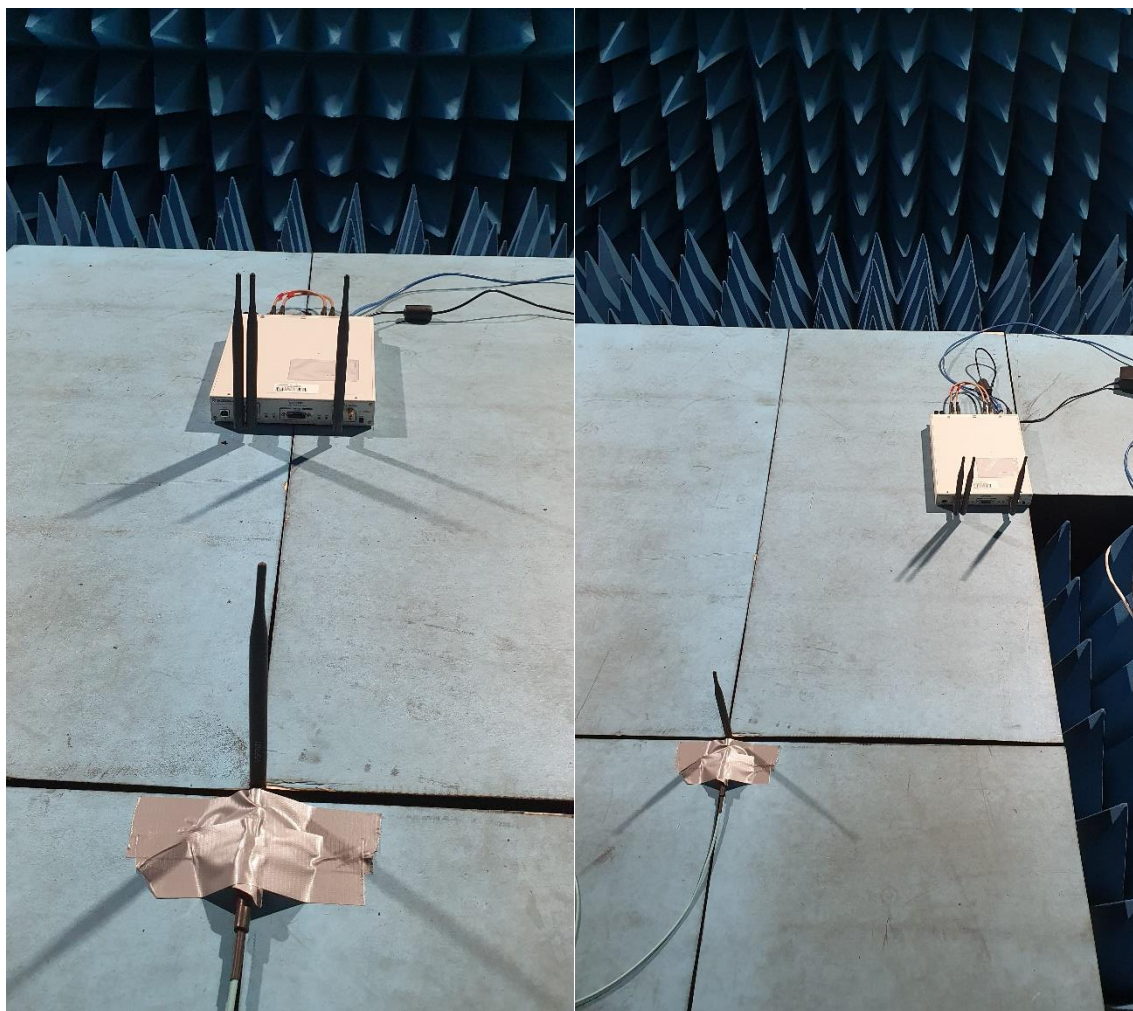
4.6.1 Rozmístění antén

Na Obr. 44 je vizualizováno rozvržení celé soustavy, ve které levá část byla použita pro zaznamenávání hodnot využívaných pro kalibraci zařízení a pravá pro zaznamenávání měřených hodnot.



Obr. 44– Schématické rozvržení realizace měření⁴⁴

Na Obr. 45 je vidět realizované rozpoložení pro jednotlivé části měření.



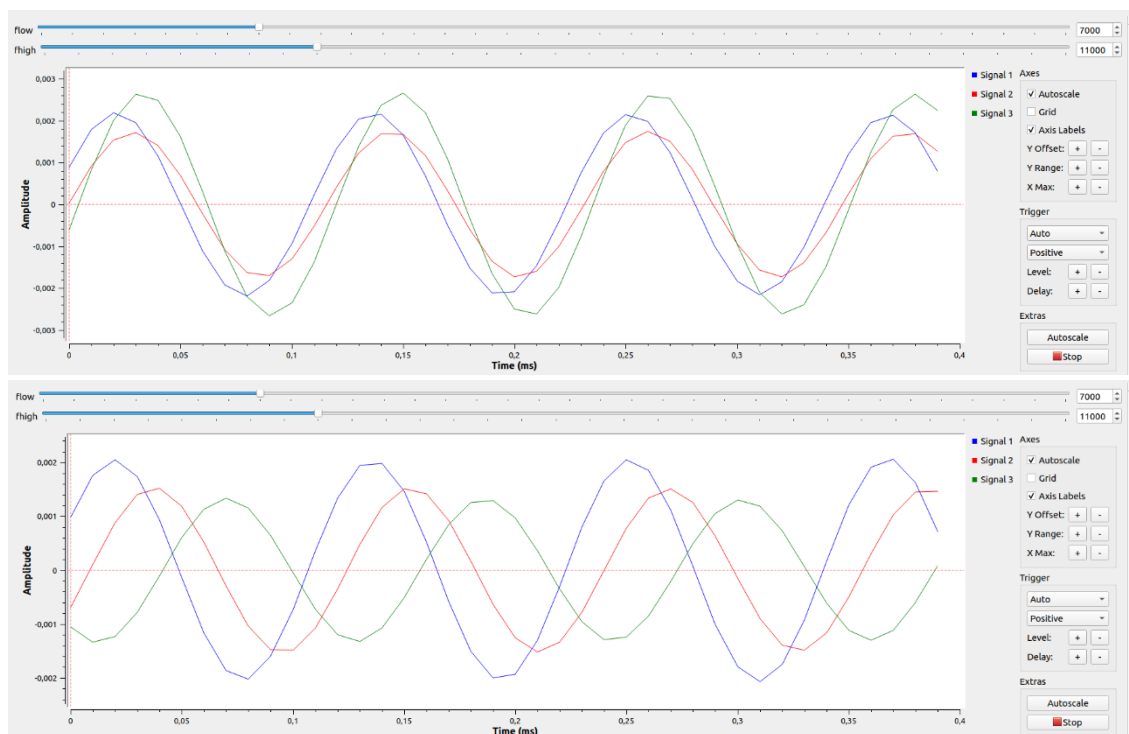
Obr. 45– Realizace měření v bezodrazové komoře⁴⁵

⁴⁴ Vlastní zdroj

⁴⁵ Vlastní zdroj

4.6.2 Vyhodnocení naměřených dat

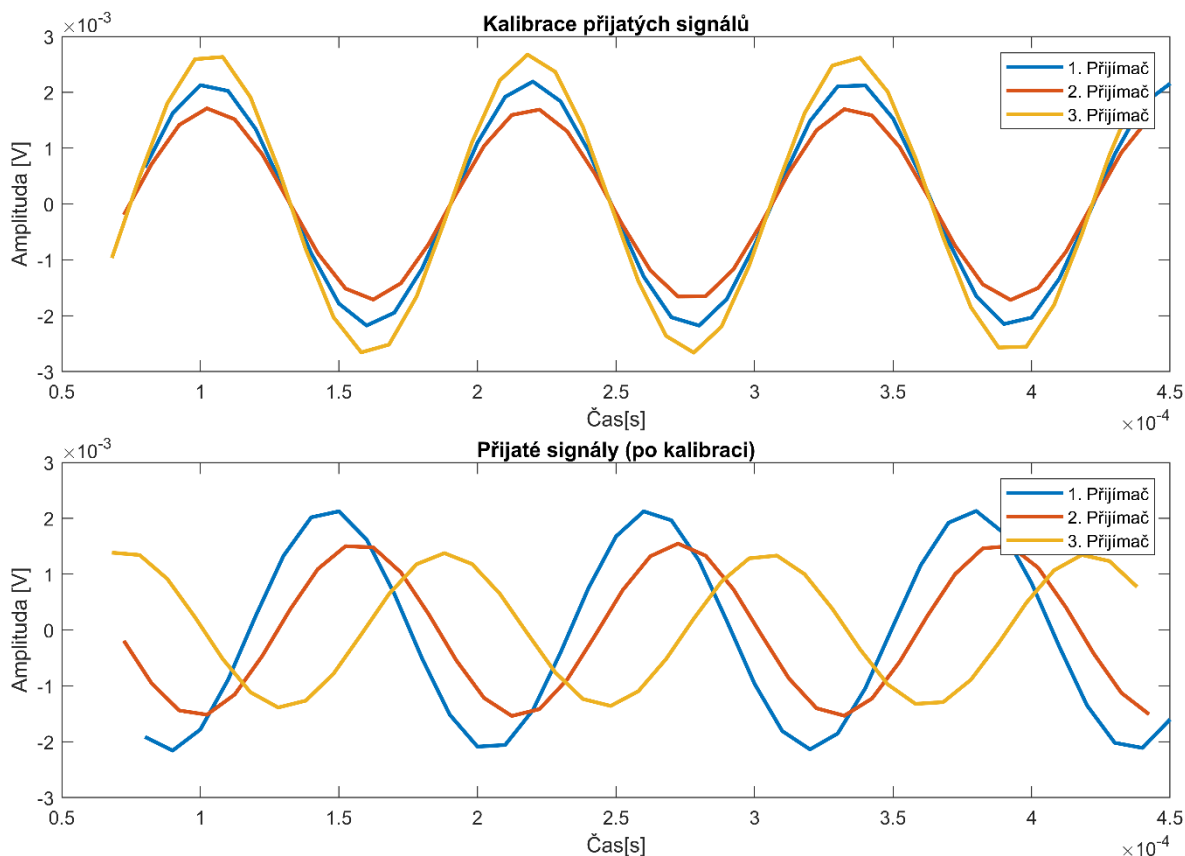
Následná měřená data byla vyobrazena v softwaru GNU Radio v podobě časových průběhů pro jednotlivé části měření (Obr. 46).



Obr. 46– Výsledky měření z SDR: Kalibrační část měření (nahore), měřená část (dole)⁴⁶

Tato data byla zpracována v kalibračním skriptu, bylo u nich upřesněno jejich celkové vzorkování a následně byly jednotlivé signály kalibrovány podle výchozího signálu antény číslo jedna (modrý signál). Nově upravená data jsou zobrazená na Obr. 47.

⁴⁶ Vlastní zdroj



Obr. 47– Výsledky měření z SDR: Kalibrační část měření (nahore), měřená část (dole)⁴⁷

Z kalibrovaných dat byly následně vypočítány fázové a poté časové rozdíly signálů (Tabulka 5), které byly použity v simulačním algoritmu pro dopočet možných hledaných úhlů.

Tabulka 5– Fázové rozdíly a časové rozdíly jednotlivých signálů

ϕ_{12}	34.4477 °
ϕ_{13}	150.2282 °
ϕ_{23}	115.7805 °
t12	$5.5633 \cdot 10^{-5} \mu s$
t13	$2.4262 \cdot 10^{-4} \mu s$
t23	$1.8698 \cdot 10^{-4} \mu s$

4.6.3 Výpočet výsledného úhlu příchodu signálu

Následně byly simulačním programem spočítány možné výsledné úhly (Tabulka 6).

Tabulka 6– Výsledné úhly ze simulátoru

53.4116°	306.5884°
52.6602°	307.3398°

⁴⁷ Vlastní zdroj

52.4300°	307.5700°
----------	-----------

Následně z těchto hodnot byla spočítána průměrná hodnota, která reprezentuje náš hledaný úhel (Tabulka 7).

Tabulka 7– Průměrné hodnoty výsledných hodnot ze simulátoru

52.8339°	307.1661°
----------	-----------

Jelikož byly antény při měření postaveny v jedné přímce, tak se jeví jako přijímací soustava pouze jen se dvěma anténami a při tomto počtu vzniká nejednoznačnost, kdy nemůžeme algoritmicky určit, která z těchto dvou hodnot je ta správná. Ale díky vizuální znalosti celé měřicí soustavy jsme schopni odhadnout, že výsledný úhel by se měl rovnat úhlu 52.8339°. S porovnáním výsledků úhlu s úhlem, který je zobrazen na Obr. 44, můžeme konstatovat, že simulátor počítá hodnotu správně. Rozdíl mezi naměřeným úhlem a správným úhlem je přibližně 0.83°. Závěrem lze říct, že simulátor pracuje správně a dokáže pracovat i s reálnými daty z koherentního přijímače USRP-2945.

Závěr

Účelem bakalářské práce bylo navrhnout a sestrojít výukový simulační program pro určování směru příchodu signálu. Výstupem práce je simulační program a realizované reálné měření společně s jejich zhodnocením.

Ve vyvinutém simulátoru je možno nastavovat frekvenci vysílaného signálu a nastavení počtu přijímacích antén při sestavení soustavy, což je programově řešeno dvěma způsoby, kde v jednom se mohou manuálně zadávat souřadnice jednotlivých antén a v druhém se vygeneruje soustava sama programově přes matematické operace. Měnění vzdálenosti vysílací antény od soustavy i s generováním její polohy buď přes konkrétní nastavení úhlu, ve kterém se má nacházet, nebo vytvořením celkového projití všech úhlů, což je využíváno pro analýzu soustav nebo přes manuální zadání souřadnic. Dále je možné soustavy pootáčet, tím je simulována situace, kde je soustava postavena tak, že její severní pól není ve směru jedné z antén, ale mezi nimi.

Při vyvíjení algoritmu se musely řešit četné problémy, které by mohly konečné výsledky simulátoru zpřesnit. Jedním z takových problémů bylo řešení při výpočtu rozsahu úhlů první přijímací antény, kde se musely udělat rozdílné kontroly výpočtů pro horní a dolní hranici úhlů, protože při kontrole jen jedné hranice se druhá matematicky dopočítávala, ale toto mohlo být provedeno pouze u soustav s ideálním rozmístěním antén. Při přidání manuálního sestavení a pootáčení se tyto dopočty dopouštěly velkých chyb a muselo se zajistit, aby každá hranice byla kontrolována samostatně. Dále se pak muselo určit, kdy tento rozsah nepřekročil úhel 360° , protože sám Matlab toho není schopen a vznikaly situace, kde byly špatně odhadnuty počáteční a konečné hranice hodnot, což vyústovalo k vybírání špatných výsledných hodnot úhlů. Nastávaly problémy i při hledání správných úhlů v párech, kdy se dané hodnoty mohly nacházet i lehce za hranicemi zjištěných úhlových rozsahů. To bylo dořešeno dosazením toleranční hodnoty, díky které byly tyto drobné odchylky podchyceny do celkového hledacího algoritmu a zpřesnily tak jeho vyhledávání. Do určování nejednoznačných párů při pootočených soustavách nastával problém v místech nulového úhlu, kde toleranční hranice buď přecházely, nebo se jí dotýkaly a tyto celkové přechody měly za následek špatné vybírání správných úhlů, protože se toto určovalo přes odečet od hodnoty 360° , ale při otáčení soustav mohlo nastat, že hledaný úhel byl nižší, a proto byl vybrán vyšší špatný. Z tohoto důvodu se musely vytvořit ochranné podmínky, které tuto hodnotu upravovaly podle znalosti těchto hranic. V neposlední řadě nastával problém u hraničních hodnot, které přecházely úhel 360° , kdy se u úhlů v blízkosti nulového stupně muselo řešit jaké mají nastávat výsledné úhly. To bylo následně vyřešeno jednoduchou metodou, kdy se v hodnotách hledala vyšší přítomnost úhlů kolem nuly a podle ní se následně hodnoty převáděly na správnou stranu.

Následně byl simulátor otestován reálnými hodnotami, které byly naměřeny. Měření těchto hodnot se neobešlo bez žádných komplikací. Jeden z prvních problémů nastal při měření bez neupraveného přijímače USRP-2945, kde bez něj mají každé dva kanály vlastní lokální oscilátor, který pracuje nezávisle na druhém. To mělo za následek nekoherentní příjem

a bylo odstraněno po projití manuálu, kde byla upřesněná modifikace, která tyto oscilátory mohla synchronizovat. Touto modifikací jsme zaručili tříkanálový koherentní přijímač. Měření bylo následně provedeno v bezdrazové komoře pro eliminaci nežádoucího rušení z okolního prostředí. I přes tento fakt zde vznikalo rušení, které vznikalo z úplně jiného zdroje, a to přímo ze samotných přijímacích antén. Z důvodů použití levných všesměrových antén vznikal u nich problém, že přes jejich kabel vycházelo rušení, které ovlivňovalo ostatní signály. To by samozřejmě šlo odstranit odizolováním jednotlivých vodičů, ale nastal u nich i další problém, kdy zakřivení samotného vodiče měnilo jak tvar signálu, tak i jeho fázový posuv. Tento problém byl následně vyřešen nahrazením těchto antén jinými, které ale ovšem byly s přípojkou přímo na anténě bez kabelu a tím byla vytvořena soustava antén v jedné řadě, což vytvořilo pomyslnou soustavu o dvou anténách, u kterých jsme schopni určit směr signálu do 180° a tím vznikají dva výsledné úhly, o kterých musíme rozhodnout podle znalosti vizuálního rozestavení, která z těchto hodnot je správná.

Závěrem lze konstatovat, že se podařilo splnit všechny vytyčené cíle a simulátor je schopen vyhledávat směr příchodu signálu pro různé přijímací soustavy.

Literatura

- [1] Ahmed, N. (2016). *Radio Direction Finding, Theory and Practises*. Získáno 2021-04-10, z ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/289779492_Radio_Direction_Finding_Theory_and_Practises
- [2] Du, H.-J., & P.Y. Lee, J. (2004). Passive Geolocation Using TDOA Method from UAVs and Ship/Land-Based Platforms for Maritime and Littoral Area Surveillance. Získáno 2021-04-13, z <https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc21/p521218.pdf>
- [3] NELSON, Paul Jeffrey. The Relevance Of Time-t ance Of Time-to-digital Conv o-digital Converters To Small Platform o Small Platform Direction Finding Systems [online]. Florida: University of Central Florida, 2008 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z <https://stars.library.ucfedu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=2537&context=etd>. Diplomová práce. University of Central Florida.
- [4] WOLFF, Christian. Richtungsbestimmung mit Radar. Radartutorial.eu [online]. Dora-Koch-Stetter-Weg 22: Wolff, 2006 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Richtungsbestimmung%20mit%20Radar.de.html>
- [5] An Introduction to Radio Direction Finding. Alaris Antennas [online]. University of the Witwatersrand in Johannesburg South Africa: Alaris Holdings, 2014 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.alarisantennas.com/blog/an-introduction-to-radio-direction-finding/>
- [6] ROHDE & SCHWARZ. Introduction into Theory of Direction Finding. Radiomonitoring&Radiolocation [online].Munich,Germany,2010, 2010/2011(),26-49[cit.2021-04-18].Dostupné z: https://cdn.rohde-schwarz.com/us/campaigns_2/a_d/Introduction-Into-Theory-of-Direction-Finding.pdf
- [7] BEZOUŠEK, P. a P. ŠEDIVÝ. Radarová technika. 2. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03036-3.
- [8] WOLFF, Christian. Doppler- Effect. Radartutorial.eu [online]. Dora-Koch-Stetter-Weg 22: Wolff, 2006 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/11.coherent/co06.en.html>
- [9] MOELL, Joseph D. a Curlee THOMAS N. Transmitter hunting : Radio direction finding simplified. 2. _: TAB Books, 1987. ISBN 0-8306-2701-4.
- [10] RDF PRODUCTS. A COMPARISON OF THE WATSONWATT AND PSEUDO-DOPPLER DF TECHNIQUES. WN-004 [online]. 2007, 2007, 2007(), 13 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: http://www.rdfproducts.com/wn004_apl_01.pdf
- [11] *Electronic Warfare and Radar Systems: Engineering Handbook*, Fourth Edition. Naval Air Warfare Center Weapons Division, Point Mugu, California, 2013.

- [12] VERT900: *Product Specification*, Rev 2.1. China: Ettus Research LLC WANSIH ELECTRONIC CO.
- [13] USRP-2945. National Instruments [online]. 11500 North Mopac Expressway, Austin, Texas, 78759-3504: National Instruments, 2017 [cit. 2021-7-20]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/support/model.usrp-2945.html>
- [14] USRP-2945 Specifications. *National Instruments* [online]. 11500 North Mopac Expressway, Austin, Texas, 78759-3504: National Instruments, 2017 [cit. 2021-7-20]. Dostupné z: <https://www.ni.com/documentation/en/usrp-software-defined-radio-reconfigurable-device/latest/specs-usrp-2945/specs/>
- [15] *USRP-2940/2942/2943/2944/2945 Getting Started Guide*. 11500 North Mopac Expressway, Austin, Texas, 78759-3504: National Instruments, 2016. Dostupné také z: <https://www.ni.com/pdf/manuals/375717h.pdf>
- [16] *Manual for Signal Generator R&S SM300*. 81671 München, Germany, 2007. Dostupné také z: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/s/sm300/SM300_BH_GB_V9_03-07.pdf
- [17] About GNU Radio. GNURADIO [online]. _: GNURADIO, 2001 [cit. 2021-7-21]. Dostupné z: <https://www.gnuradio.org/about/>
- [18] What Is MATLAB? MathWorks [online]. Natick, Massachusetts USA: MathWorks, 1994 [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>

Přílohy

Zdrojové kódy společně s datovými soubory měřeného signálu a jeho kalibrací jsou k dispozici na STAGU.