

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Principy MLAT a směrového zaměřování ADS-B pro
vícekanálový přijímač

Bc. Adam Půta

Vedoucí práce: Ing. Pavel Puričer, PhD.

Studijní program: Letectví a kosmonautika

Studijní obor: Avionika

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci vypracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze dne 5.1.2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Půta** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **393089**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**
Studijní obor: **Avionika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Principy MLAT a směrového zaměřování ADS-B pro vícekanálový přijímač

Název diplomové práce anglicky:

Principles of MLAT and direction finding for ADS-B signal in multichannel receiver

Pokyny pro vypracování:

Prostudujte formát a metody příjmu a zpracování ADS-B signálu v leteckých systémech. Dále se seznamte s metodami směrového zaměřování a multilaterace v oblasti leteckých systémů se zaměřením na použití ADS-B signálu. Na základě získaných znalostí pak navrhnete vhodný postup pro detekci a zpracování ADS-B signálu ve vícekanálovém přijímači na bázi softwarového rádia, jenž by bylo použitelné jako podpůrný systém směrového zaměřování nebo multilaterace v oblastech standardně nevybavených ADS-B infrastrukturou. Navržené metody a algoritmy ověřte simulacemi a vhodně implementujte v rámci vybrané platformy HW (SDR).

Seznam doporučené literatury:

- [1] E. Piracci, G. Galati, and M. Pagnini, "ADS-B signals reception: A Software Defined Radio approach," in 2014 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), Benevento, Italy, May 2014, vol. 2014, doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2014.6865985.
- [2] RTCA, Inc., "RTCA/DO-260B, Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz extended Squitter Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services – Broadcast (TIS-B)." RTCA, Inc., 2009.
- [3] W. Harman, J. Gertz, and A. Kaminsky, "Techniques for improved reception of 1090 MHz ADS-B signals," in 17th DASC. AIAA/IEEE/SAE. Digital Avionics Systems Conference. Proceedings (Cat. No.98CH36267), Bellevue, WA, USA, Oct. 1998, vol. 2, p. G25/1-G25/9 vol.2, doi: 10.1109/DASC.1998.739844.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Puričer, Ph.D., katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **17.09.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.01.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **20.02.2022**

Ing. Pavel Puričer, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Pavlu Puričerovi, Ph.D. za odborné a vstřícné vedení mé diplomové práce.

Anotace

Tato práce si klade za cíl aplikovat postupy, které se uplatňují v problematice MLAT za použití ADS-B signálu. V aplikační části se zabývá problematikou rozlišování signálů od různých letadel. Dále je pozornost problematice určení směru příchodu signálu a implementaci algoritmů pro MLAT. Na závěr zkoumá možnosti práce s reálnými daty naměřenými pomocí SDR.

Klíčová slova

MLAT, SDR , Korelace, Navigace, AoA, TDoA

Abstract

The goal of this diploma thesis is to investigate how to realize elementary parts of MLAT systems using ADS-B. In application part are verifying algorithms for distinguishing signals from airplanes in flight. Next step is to determine the direction of arrival of this signals and implement MLAT algorithms. In the end of this thesis a research of working with real ADS-B data based on SDR is done.

Key words

MLAT, SDR , Correlation, Navigation, AoA, TDoA

1 Úvod	1
2 Principy šíření radarového signálu	2
2.1 Generování radarového signálu.....	2
2.2 Šíření radarového signálu.....	3
3 Metody zjišťování polohy	6
3.1 Primární radar.....	6
3.2 Sekundární radar – SSR.....	7
3.2.1 Múd A.....	7
3.2.2 Múd C.....	9
3.2.3 Múd S.....	9
3.2.4 ELS Múd S.....	11
3.2.5 EHS Múd S.....	11
3.3 ADS-B.....	11
3.3.1 ADS-B in/out.....	12
3.3.2 ADS-B rámeč.....	12
4 Metody zpracování příchozího signálu za účelem stanovení polohy letounu	14
4.1 SS – Signal strenght.....	14
4.2 AoA – Angle of arrival.....	15
4.3 ToA – Time of arrival.....	17
4.4 TDoA – Time difference of arrival.....	19
5 Implementace MLAT	21
5.1 Korelace signálů ADS-B.....	22
5.2 AoA pro MLAT.....	25
5.3 Hyperbolická metoda.....	37

6 Výsledky simulace	43
6.1 Rozlišení ADS-B pomocí korelací.....	43
6.2 Měření úhlů a TDoA.....	49
6.3 Simulace AoA/SS a TDoA 2-D.....	82
7 Měření na reálných datech	99
8 Výsledky měření	102
9 Závěr	106

Seznam zkratek

PPM – Pulse position modulation, pulzně polohová modulace

AoA – Angle of arrival, úhel příletu

ToA – Time of arrival, doba příletu

TDoA – Time difference of arrival, rozdíl časů

ToF – Time of flight, doba letu

SS – Signal strength, síla signálu

LF – Low frequency, nízkofrekvenční

DP – Dolní propust'

ENU – North, East, up

SDR – Software defined radio, softwarově definované rádio

MLAT – Multilateration, multilaterace

HW – Hardware

SW – Software

Seznam tabulek

Tabulka 6.1: Vliv výstupního šumu na určení úhlu 45°	73
Tabulka 6.2: Vliv výstupního šumu na určení úhlu 90°	73
Tabulka 6.3: Vliv vstupního šumu na určení úhlu 45°	74
Tabulka 6.4: Vliv vstupního šumu na určení úhlu 90°	74
Tabulka 6.5: Výpočet TDoA na základě úhlu.....	80

Seznam obrázků a grafů

Obrázek. 2.1: Shannonův komunikační řetězec upravený pro radar.....	1
Obrázek. 2.2: Elektromagnetická vlna.....	3
Obrázek. 3.1: Princip primárního radaru.....	6
Obrázek 3.2a: Dotazovací signál SSR.....	8
Obrázek 3.2b: Odpověď v módu A.....	8
Obrázek.3.3a: Průběh dotazovacího signálu v módu S.....	9
Obrázek.3.3b: Odpověď na dotazovací signál v módu S.....	10
Obrázek.3.4a: formát Short Squitter.....	10
Obrázek.3.4b: formát Extended Squitter.....	10
Obrázek 3.5: Princip ADS-B.....	12
Obrázek 3.6: ADS-B rámec odpovědi.....	13
Obrázek. 4.1: Vzdálenost letounu od radiomajáku určená pomocí SS.....	15
Obrázek 4.2: Princip AoA.....	16
Obrázek. 4.3: Anténní řada pro fázovou interferometrii.....	16
Obrázek. 4.4a: Princip ToA pro určení vzdálenosti od přijímače.....	18
Obrázek 4.4b: Princip ToA pro určení polohy.....	18
Obrázek 4.5: Princip TDoA.....	20
Obrázek 5.1: ADS-B zprávy se šumem a různou amplitudou a časovým posunem.....	22
Obrázek 5.2: Flukтуаční pás.....	24
Obrázek 5.3: Korelace celého záznamu s replikou s menší amplitudou.....	25
Obrázek.5.4: Algoritmus měření fázového posuvu.....	26
Obrázek.5.5: Interferometrické měření úhlu dopadajícího signálu.....	29
Obrázek 5.6: Zaměřování polohy pomocí AoA s dvěma přijímači.....	34
Obrázek: 5.7: Nejednoznačnost určení y-ové souřadnice.....	35
Obrázek 5.8: Vliv vzdálenosti P1 a P3 na určení y-ové souřadnice.....	36
Obrázek: 5.9 Kombinace algoritmů AoA a SS.....	37
Obrázek 6.1: Korelace signálu SNR 50, 72 maxim.....	43
Obrázek 6.2: Korelace signálu SNR 50, 9 maxim.....	44

Obrázek 6.3: Korelace signálu SNR 50, 1 maxim.....	44
Obrázek 6.4: Korelace signálu SNR 10, 16 maxim.....	45
Obrázek 6.5: Korelace signálu SNR 10, 5 maxim.....	45
Obrázek 6.6: Korelace signálu SNR 10, 1 maxim.....	46
Obrázek 6.7: Korelace signálu SNR -0,5, 2 maxim.....	46
Obrázek 6.8: Korelace signálu SNR -0,5, 1 maxim.....	47
Obrázek 6.9: Korelace signálu SNR -0,5, 1 maxim.....	47
Obrázek 6.10: Korelace signálu SNR -0,5, 1 maxim, zašuměná replika ADS-B signálu.....	48
Obrázek 6.11: Modulovaný obdélníkový periodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B, posuv 0°.....	49
Obrázek 6.12: Rozdílový signál po směšování 0°.....	50
Obrázek 6.13: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 0°.....	50
Obrázek 6.14: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 0°.....	51
Obrázek 6.15: Modulovaný obdélníkový periodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B, posuv 45°.....	51
Obrázek 6.16: Rozdílový signál po směšování 45°.....	52
Obrázek 6.17: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 45°.....	52
Obrázek 6.18: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 45°.....	53
Obrázek 6.19 Modulovaný obdélníkový periodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B, posuv 90°.....	53
Obrázek 6.20: Rozdílový signál po směšování 90°.....	54
Obrázek 6.21: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 90°.....	54
Obrázek 6.22: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 90°.....	55
Obrázek 6.23 Modulovaný obdélníkový periodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B, posuv 180°.....	55
Obrázek 6.24: Rozdílový signál po směšování 180°.....	56
Obrázek 6.25: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 180°.....	56
Obrázek 6.26: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 180°.....	57
Obrázek 6.27: Modulovaný obdélníkový neperiodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B, posuv 0°.....	57
Obrázek 6.28: Rozdílový signál po směšování 0° symbol 0.....	58
Obrázek 6.29: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 0° symbol 0.....	58
Obrázek 6.30: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 0° symbol 0.....	59
Obrázek 6.31: Modulovaný obdélníkový neperiodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B, posuv 45°.....	59

Obrázek 6.32: Rozdílový signál po směšování 45° symbol 0.....	60
Obrázek 6.33: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 45° symbol 0.....	60
Obrázek 6.34: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 45° symbol 0.....	61
Obrázek 6.35: Modulovaný obdélníkový neperiodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B, posuv 90°.....	61
Obrázek 6.36: Rozdílový signál po směšování 90° symbol 0.....	62
Obrázek 6.37: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 90° symbol 0.....	62
Obrázek 6.38: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 90° symbol 0.....	63
Obrázek 6.39: Modulovaný obdélníkový neperiodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B, posuv 180°.....	63
Obrázek 6.40: Rozdílový signál po směšování 180° symbol 0.....	64
Obrázek 6.41: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 180° symbol 0.....	64
Obrázek 6.42: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 180° symbol 0.....	65
Obrázek 6.43: Modulovaný obdélníkový periodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B se symbolem „-1“, posuv 0°.....	65
Obrázek 6.44: Rozdílový signál po směšování 0° symbol -1.....	66
Obrázek 6.45: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 0° symbol -1.....	66
Obrázek 6.46: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 0° symbol -1.....	67
Obrázek 6.47: Modulovaný obdélníkový periodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B se symbolem „-1“, posuv 45°.....	67
Obrázek 6.48: Rozdílový signál po směšování 45° symbol -1 (SNR out/in 50dB/50dB).....	68
Obrázek 6.49: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 45° symbol -1 (SNR out/in 5dB/50dB).....	68
Obrázek 6.50: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 45° symbol -1 (SNR out/in 50dB/5dB).....	69
Obrázek 6.51: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 45° symbol -1 (SNR out/in 50dB/-0,5dB).....	69
Obrázek 6.52: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 45° symbol -1 (SNR out/in 50dB/-50dB).....	70
Obrázek 6.53: Modulovaný obdélníkový periodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B se symbolem „-1“, posuv 90°.....	70
Obrázek 6.54: Rozdílový signál po směšování 90° symbol -1 (SNR out/in 50dB/50dB).....	71
Obrázek 6.55: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 90° symbol -1 (SNR out/in 5dB/50dB).....	71
Obrázek 6.56: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 90° symbol -1 (SNR out/in 50dB/5dB).....	72
Obrázek 6.57: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 90° symbol -1 (SNR out/in 50dB/-0,5dB).....	72

Obrázek 6.58: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 90° symbol -1 (SNR out/in 50dB/-50dB).....	73
Obrázek 6.59: Vliv odchylky určení úhlu na SNR (vstupním a výstupním šumu).....	74
Obrázek 6.60: Modulovaný obdélníkový periodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B se symbolem „-1“, posuv 180°	75
Obrázek 6.61: Rozdílový signál po směšování 180° symbol -1.....	75
Obrázek 6.62: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 180° symbol -1.....	76
Obrázek 6.63: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 180° symbol -1.....	76
Obrázek 6.64: Nevhodné parametry filtru typu DP pro úhel 45° (SNR out/in 100dB/100dB).....	77
Obrázek 6.65: Nevhodné parametry filtru typu DP pro úhel 45° symbol 0 (SNR out/in 100dB/10dB).....	77
Obrázek 6.66: Nevhodné parametry filtru typu DP pro úhel 45° symbol 0 (SNR out/in 10dB/10dB).....	78
Obrázek 6.67: Nevhodné parametry filtru typu DP pro úhel 45° symbol -1 (SNR out/in 100dB/10dB).....	78
Obrázek 6.68: Nevhodné parametry filtru typu DP pro úhel 45° symbol -1 (SNR out/in 10dB/10dB).....	79
Obrázek 6.69: Vliv filtru typu DP na zpoždění rozdílových signálů.....	79
Obrázek 6.70: Vytvoření rozdílového signálu ze signálu ADS-B.....	80
Obrázek 6.71: Úhel mezi signály ADS-B 45°	81
Obrázek 6.72: Úhel mezi signály ADS-B 90°	81
Obrázek 6.73: Porovnání dat z hyperbolického TDoA a AoA/SS pro x souřadnici.....	82
Obrázek 6.74: Porovnání dat z hyperbolického TDoA a AoA/SS pro y souřadnici.....	83
Obrázek 6.75: Anti-kolizní poplach (OK-MRK OK-FOR).....	83
Obrázek 6.76: Neurčitost y-ové polohy mezi P1(AoA1) a P3(SS).....	84
Obrázek 6.77: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 80dB P1P3 =500m.....	84
Obrázek 6.78: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 80dB P1P3 =500m.....	85
Obrázek 6.79: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 40dB P1P3 =500m.....	85
Obrázek 6.80: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 40dB P1P3 =500m.....	86
Obrázek 6.81: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 20dB P1P3 =500m.....	86

Obrázek 6.82: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 20dB P1P3 =500m.....	87
Obrázek 6.83: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 80dB P1P3 =200m.....	87
Obrázek 6.84: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 80dB P1P3 =200m.....	88
Obrázek 6.85: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 40dB P1P3 =200m.....	88
Obrázek 6.86: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 40dB P1P3 =200m.....	89
Obrázek 6.87: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 40dB P1P3 =50m.....	89
Obrázek 6.88: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 40dB P1P3 =50m.....	90
Obrázek 6.89: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a TDoA SNR 120dB P1P3 =100m.....	90
Obrázek 6.90: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a TDoA SNR 120dB P1P3 =100m.....	91
Obrázek 6.91: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 120dB P1P3 =100m.....	91
Obrázek 6.92: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 120dB P1P3 =100m.....	92
Obrázek 6.93: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a TDoA SNR 80dB P1P3 =100m.....	92
Obrázek 6.94: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a TDoA SNR 80dB P1P3 =100m.....	93
Obrázek 6.95: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 80dB P1P3 =100m.....	93
Obrázek 6.96: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 80dB P1P3 =100m.....	94
Obrázek 6.97: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a TDoA SNR 60dB P1P3 =100m.....	94
Obrázek 6.98: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a TDoA SNR 60dB P1P3 =100m.....	95
Obrázek 6.99: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 60dB P1P3 =100m.....	95
Obrázek 6.100: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 60dB P1P3 =100m.....	96

Obrázek 6.101: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a TDoA SNR 50dB P1P3 =100m.....	96
Obrázek 6.102: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a TDoA SNR 50dB P1P3 =100m.....	97
Obrázek 6.103: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 50dB P1P3 =100m.....	97
Obrázek 6.104: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 50dB P1P3 =100m.....	98
Obrázek 7.1: HSDR software.....	99
Obrázek 7.2: HSDR nastavení nahrávání.....	100
Obrázek 8.1: Nahrání dat z HSDR do matlabu, pokus o detekci ADS-B.....	102
Obrázek 8.2: Vygenerování preamble ADS-B, pokus korelaci s naměřenými daty.....	102
Obrázek 8.3: Kontrola provozu na Radar24 Ryanair.....	103
Obrázek 8.4: Vygenerování preamble ADS-B, pokus korelaci s naměřenými daty z SDR toolbox.....	103
Obrázek 8.5: Naměřená data pomocí SDR toolbox.....	104
Obrázek 8.6: Kontrola provozu na Radar24 Turkish Airlines.....	104
Obrázek 8.7: Zapojení SDR s notebookem.....	105

Kapitola 1

1) Úvod

Civilní leteckou dopravu lze rozdělit do čtyř hlavních skupin. První skupinou je obchodní letecká doprava, která slouží pro přepravu velkého počtu lidí, nebo nákladu ve velkých dopravních letadlech. Tato skupina se vyznačuje tím, že dopravní letadla létají zpravidla ve vysokých nadmořských výškách při vysokých rychlostech. Do druhé skupiny patří letouny takzvaného všeobecného letectví (anglicky general aviation), které mohou sloužit pro výcvik pilotů, sportovní nebo vyhlídkové lety. V této skupině se vyskytnou letouny s pevnými křídly a vrtulníky. Oba typy strojů pak zpravidla létají v nižších nadmořských výškách mnohem nižšími rychlostmi. Třetí skupinu tvoří vrtulníky letecké záchranné služby nebo policie. Poslední čtvrtou skupinu tvoří bezpilotní stroje. V dnešní době je stále vyžadováno, aby byly bezpilotní stroje řízeny lidskou obsluhou, nebo autonomně, ale stále pod kontrolou řídicího operátora.

Během několika posledních desetiletí došlo k razantnímu zvýšení objemu letecké dopravy. Tento trend bude pokračovat také v následujících letech, a to nejen kvůli nárůstu počtu pilotovaných letounů, ale zejména i těch bezpilotních. Z tohoto důvodu je zjišťování polohy letadel ve vzdušném prostoru klíčovým prvkem v řízení letového provozu, a to zejména během kritických fází letu, jako je vzlet, přiblížení před přistáním a samotné přistání. Další důvod pro přesnou znalost polohy letounu (a jeho výšky) je zabránění srážky s jiným letounem v daném vzdušném prostoru. Letečtí dispečeri pomocí těchto údajů vytváří rozestupy (vertikální a horizontální) tak, aby se letouny navzájem neohrožovaly. Nejde přitom jen o samotné zabránění kolize. Letoun, který letí v blízkosti jiného letounu vytváří nežádoucí aerodynamický jev, známý jako turbulence v úplavu. Ta může v lepším případě snížit komfort letu, a v extrémním případě způsobit havárii stroje.

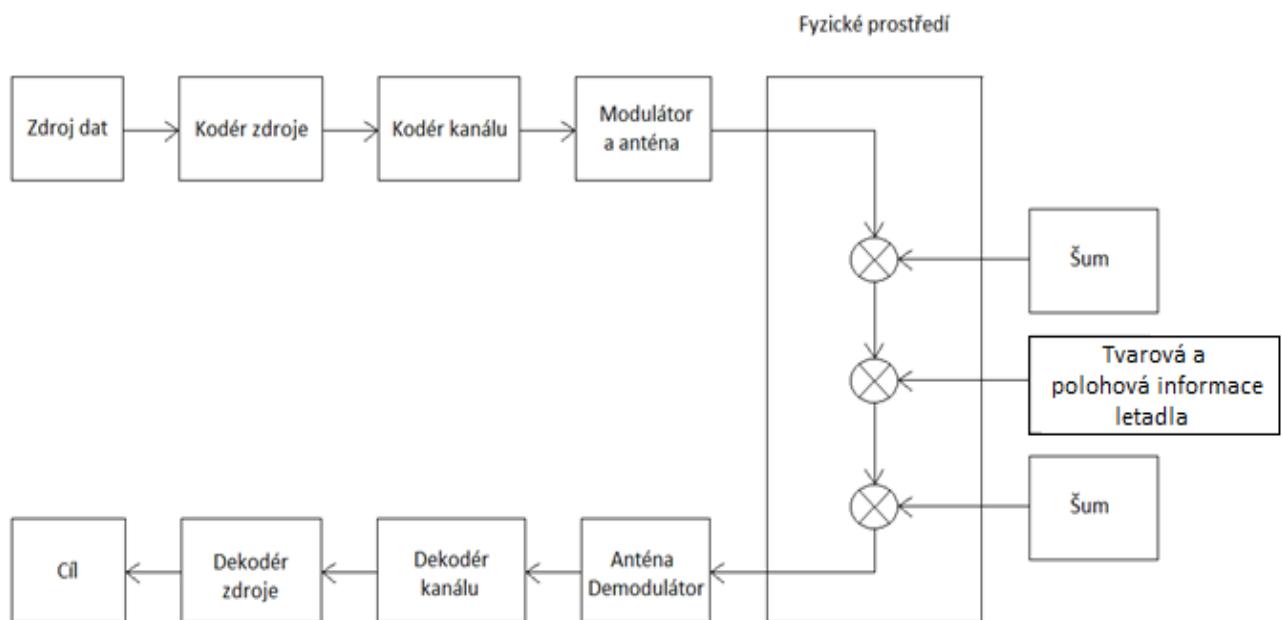
Velká vnitrostátní nebo mezinárodní letiště jsou díky instituci řízení letového provozu (ŘLP) velmi dobře zabezpečena. ŘLP zde využívá velmi rozlehlou a rozmanitou síť detekčních prvků pro detekci provozu ve vzdušném prostoru. To ale v současné době neplatí pro malá rekreační vnitrostátní letiště, kterých je v poměru k těm velkým daleko více. Tato letiště zpravidla nemají k dispozici, ať už z ekonomických, infrastrukturních, či jiných důvodů zavedený systém kontroly a řízení letového provozu, a to i přes to, že provoz (tranzitní nebo přímo vztažený k danému letišti) na některých z nich je, nebo může být velmi silný, a to zvyšuje riziko leteckých nehod.

Cílem této diplomové práce je popsat algoritmy pro realizaci jednotlivých částí systém pro zaměření letounu, či letounů ve vzdušném prostoru pomocí multilateračního (MLAT) příjmu ADS-B signálu s využitím platformy softwarově definovaného rádia (SDR), tyto algoritmy následně implementovat pomocí simulací v prostředí matlab/simulink, a poté otestovat na reálných datech ze SDR. V budoucnu by takto koncipovaný systém by mohl být využit jako podpůrný, cenově dostupný prvek pro dozorování leteckého provozu na malých soukromých letištích. Pověřená osoba by na základě dat ze SDR zobrazených pomocí aplikace na PC poskytovala pomocí vysílačky informace pilotům o okolním provozu.

Kapitola 2

2) Principy šíření radarového signálu a jeho generování

Obecný princip radaru lze popsat upraveným Shannonovým komunikačním řetězcem[6].



Obrázek. 2.1: Shannonův komunikační řetězec upravený pro radar

2.1) Generování radarového signálu

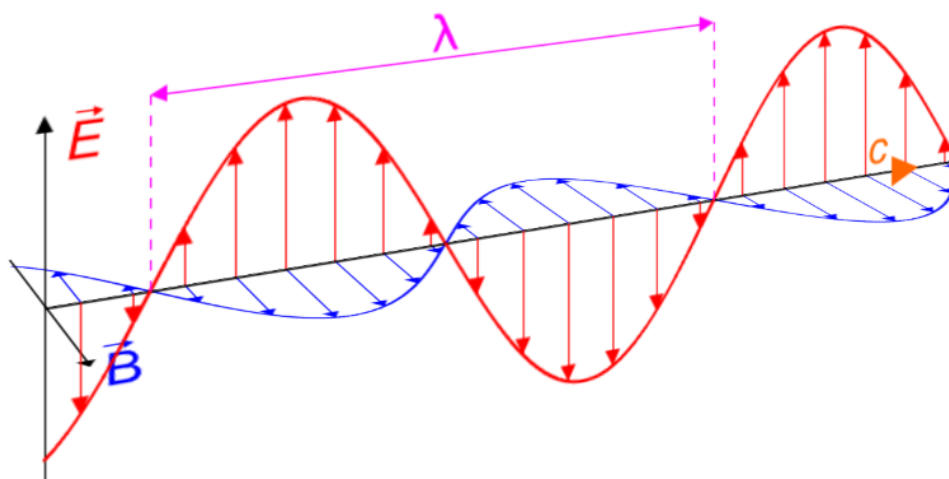
Radarový signál je z pohledu dat reprezentován posloupností „1“ a „0“, v případě spojitých dat spojitým signálem. Tyto data je potřeba namodulovat na nosný „fyzický signál“.

Mezi modulace radarového signálu patří ON/OFF klíčování nebo také dvoustavová amplitudová modulace (AM), tj. logická „1“ je reprezentována obdélníkovým pulzem s definovanou amplitudou, a přesně definovanou délkou trvání. Tato modulace je jednoduchá z hlediska implementace. Nevýhodou je vysoká energetická náročnost pro zajištění dosahu a rozlišení.

Mezi další typy patří například signál se spojitou vlnou CW (anglicky continuous wave), FM CW, fázové modulace a další.

2.2) Šíření radarového signálu

Fyzikální reprezentací radarového signálu je elektromagnetická vlna, která je generována radarovou anténou. Elektromagnetická vlna se skládá z vektoru elektrického pole E a vektoru magnetického pole B a samozřejmě z vektoru, který charakterizuje směr šíření vlny. Zpravidla jde o směr v ose Z .



Obrázek. 2.2: Elektromagnetická vlna

Pokud výsledný vektor elektrického pole kmitá ve stále stejném směru, mluvíme o takzvané lineární polarizaci. Lineární polarizace může být horizontální, nebo vertikální. Dalším typem polarizace je polarizace kruhová. Ta nastává v případě, že výsledný vektor pole nekmitá pouze v jedné rovině, ale ve více rovinách kolmých na směr šíření vlny. Hlubší popis problematiky polarizace nebude v této práci hlouběji diskutován.

Obecně lze říct, že radarová anténa je v podstatě směrový zářič. Vyzářuje do okolního prostředí určitý výkon P_{out} . Ten je dán jako součin účinnosti antény a příkonu, který je do antény přiveden:

$$P_{Radiated} = \eta_{ant} P_{in} \quad [W] \quad (2.1)$$

Kde $P_{Radiated}$ je výkon vyzářený anténou, η_{ant} je účinnost antény, popřípadě anténní řady a P_{in} je výkon dodaný do antény.

Během cesty paprsku, která je dvojnásobná (paprsek letí k objektu a zpět) dochází k útlumu signálu vlivem Huygensova principu. Ten říká, že elektromagnetická vlna, která se volně šíří prostorem, ztrácí svojí energii, protože v každém bodě vlnoplochy dochází ke generování dalších vlnoploch, a tím pádem k „ředění“ její energie.

Míru degradace energie vlny, která závisí na frekvenci (a tím pádem na vlnové délce) a délce dráhy, po které se vlna šíří, popisuje útlum ve volném prostoru (anglicky free space loss):

$$L_{loss} = \frac{1}{\left(\frac{\lambda}{2\pi R}\right)^2} \quad [-] \quad (2.2)$$

kde λ ($= c_0/f$) je vlnová délka (podíl rychlosti světla ve vakuu a frekvence) a R je délka dráhy.

Zcela obecně lze výkon vyslaný radarovou anténou popsat radarovou rovnicí [1]:

$$P_r = \frac{P_s G_s^2 \sigma_{RCS} \lambda^2}{(4\pi)^3 R_{MAX}^4 L_D L_{ATM} L_f} \quad [W] \quad (2.3)$$

Kde P_r je přijatý výkon, G_s zisk radarové antény, σ_{RCS} je účinná odrazná plocha, λ je vlnová délka, R_{MAX} je vzdálenost mezi vysílačem/přijímačem a letícím objektem, L_D jsou ztráty v zařízení, L_{ATM} jsou ztráty v atmosféře a L_f jsou ztráty fluktuací signálu vlivem natočení cíle.

Vzdálenost objektu od zdroje signálu je tedy:

$$R_{MAX} = \sqrt[4]{\frac{P_s G_s^2 \sigma_{RCS} \lambda^2}{(4\pi)^3 P_r L_D L_{ATM} L_f}} \quad [m] \quad (2.4)$$

V této práci je diskutována možnost zaměřování polohy letounů pomocí multilaterace ADS-B signálu. Protože je příjem ADS-B založený na principu sekundárního radaru, není potřeba v rovnici (2.3) brát v úvahu odraz signálu od objektu (letounu). Systém je tedy popsán klasickou radiokomunikační rovnicí.

$$P_r = P_s G_s G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R_{MAX}}\right)^2 \quad [W] \quad (2.5)$$

Odtud pak získáme vzdálenost R_{MAX} jako:

$$R_{MAX} = \frac{\lambda}{4\pi \sqrt[2]{\frac{P_r}{P_s G_s G_r}}} \quad [m] \quad (2.6)$$

Porovnání vztahů (2.3) a (2.5) ukazuje, že u radarové rovnice, tedy u systému, který pracuje s odrazem signálu od objektu zpět k vysílači klesá přijatý výkon se čtvrtou mocninou vzdálenosti. U systému s aktivní odpovědí, tj. u sekundárního radaru klesá tento výkon pouze se druhou mocninou.

Zisk antény G_S je dán vztahem:

$$G_S = \eta_{ant} D \quad [-] \quad (2.7)$$

$$D = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad [^\circ] \quad (2.8)$$

kde D je směrovost antény a A je anténní apertura.

Dopplerův jev pro pohyb zdroje vůči pozorovateli (přijímači):

$$f = \frac{f_0}{1 \pm \frac{v}{c}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.9)$$

kde f je nová frekvence daná vzdalováním, nebo přibližováním zdroje, v je rychlost zdroje a c je rychlost světla.

Pro úplnost dodejme, že vliv na maximální vzdálenost R_{MAX} , na kterou jsme schopni objekt detekovat má vliv také přítomnost zemského povrchu. Existuje několik modelů[1], které tento vliv zohledňují, ale pro potřeby této práce nebude tato problematika hlouběji probírána, stejně jako vliv Dopplerova jevu.

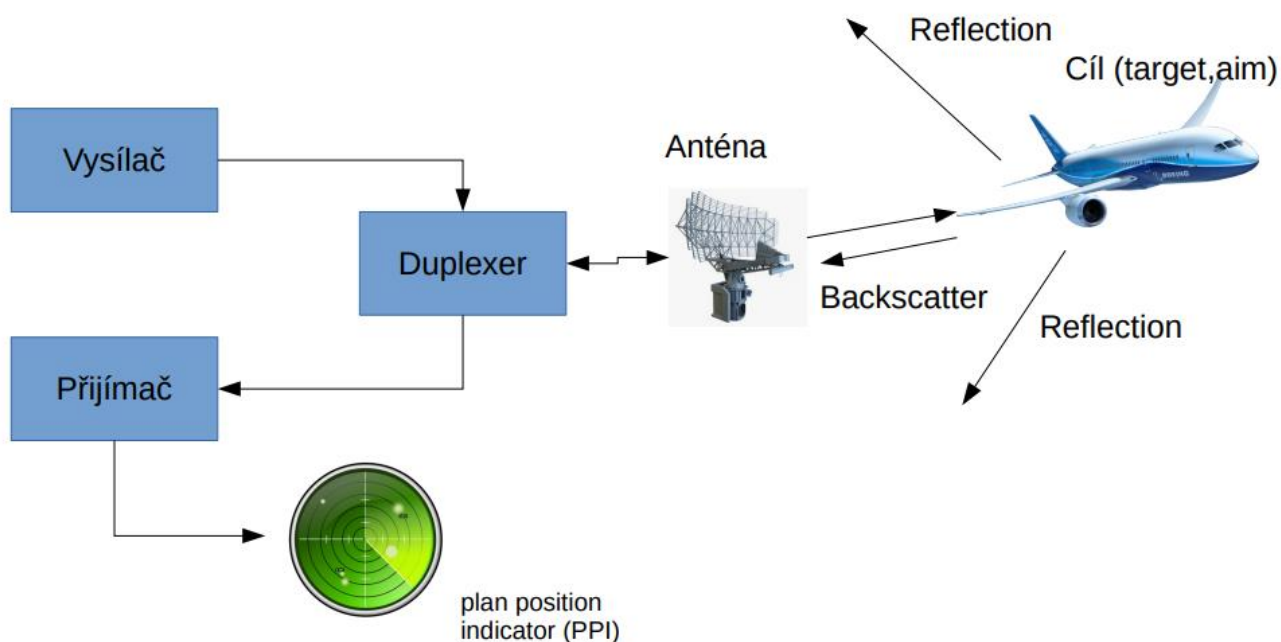
Kapitola 3

3) Metody zjišťování polohy

ŘLP v praxi využívá několik metod zjišťování polohy. Patří sem primární, sekundární radar, ADS-B a multilaterace.

3.1) Primární radar

První metoda spočívá v použití takzvaného primárního radaru, kdy pozemní vysílač vyšle v určitém směru elektromagnetickou vlnu, která se po kontaktu s letícím objektem odrazí zpět k místu vyslání, kde jí pozemní přijímač, který může být na stejném nebo jiném místě přijme, a na základě rozdílu časů vyslání, času příjmu a směru, ze kterého byl signál detekován vypočte polohu letícího objektu, jeho výška a rychlost. Základní schéma primárního radaru ukazuje obrázek 3.1[1]



Obrázek. 3.1: Princip primárního radaru

Vzdálenost objektu od radaru je definována takto:

$$R = \frac{c_0 t_{meas}}{2} \quad [m] \quad (3.1)$$

kde R je vzdálenost letícího objektu od radarového vysílače/přijímače, c_0 je rychlost (ve vakuu) světla a koeficient $1/2$ je z důvodu šíření signálu „tam a zpět“.

Tato metoda se stále hojně využívá po celém světě. Nevýhodou této metody je však potřeba filtrovat odrazy od jiných objektů, například ptáků. Další nevýhodou je také fakt, že vhodným tvarováním objektu (letounu), respektive velikostí jeho odrazné plochy může být radarový obraz letounu velmi malý až žádný. Toho se částečně využívá v technologii Stealth¹. Z předchozí kapitoly vyplývá, že míra energie přijatého signálu závisí na tvaru letounu, a také na délce, kterou musí radarový paprsek urazit.

3.2) Sekundární radar – SSR

Sekundární radar, neboli z anglického „secondary surveillance radar“ (SSR) pracuje na principu dotazu a odpovědi. Opět zde máme vysílací a přijímací anténu (obě antény stejně jako v případě primárního radaru rotují). Rozdíl je však v tom, signál vyslaný pozemní anténou přijme palubní zařízení, kterému se v letecktví nazývá odpovídač, nebo také transpondér. Vyhodnotí-li odpovídač, že dotazovací signál je určen právě jemu, odešle pomocí palubní antény odpověď, kterou zachytí pozemní stanice. V závislosti na módu odpovídače jsou ve zprávě uvedeny informace o letové hladině, pozici nebo kódovém volacím znaku letounu. Módy SSR jsou následující:

- A
- C
- A/C
- S

3.2.1) Mód A

Dotazovací signál v módu A vysílá na frekvenci 1030 MHz a používá tři pulzy P1, P2 a P3. Začátek pulzu P1 je od začátku pulzu P2 vzdálen 2us. Začátek náběžné hrany pulzu P1 je od náběžné hrany pulzu P3 vzdálen 8us. Takto koncipovaný dotazovací pulz vyvolá odezvu odpovídače ve formě pulzů. Délka signálu odpovědi je 20,3 us. Takto vygenerovaná odpověď obsahuje jeden ze 4096 možných kódů. Každý

¹ Kromě vhodného tvarování letounu se používají také speciální nátěry, které část energie radarového signálu přemění na teplo.

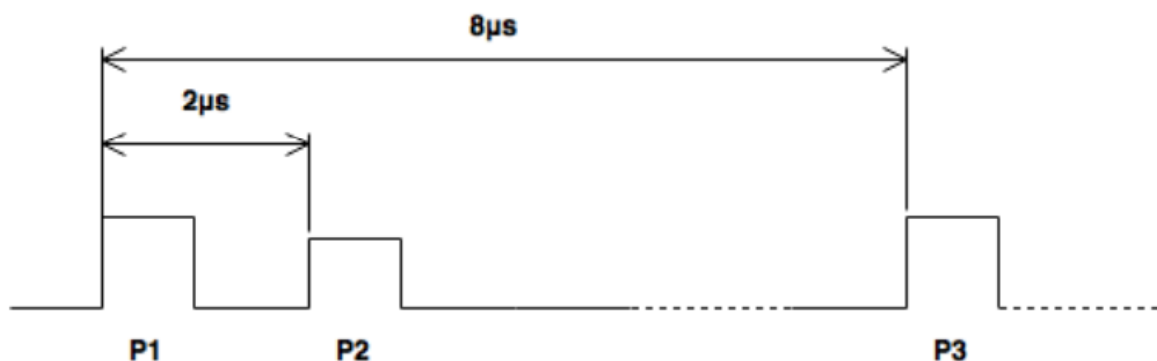
kód reprezentuje informaci složenou z:

- indetifikátor letounu
- Squawk kód – kód manuálně nastavený pilotem na palubním odpovídači (standardně 7000)
- SPI (Special Position Identification)

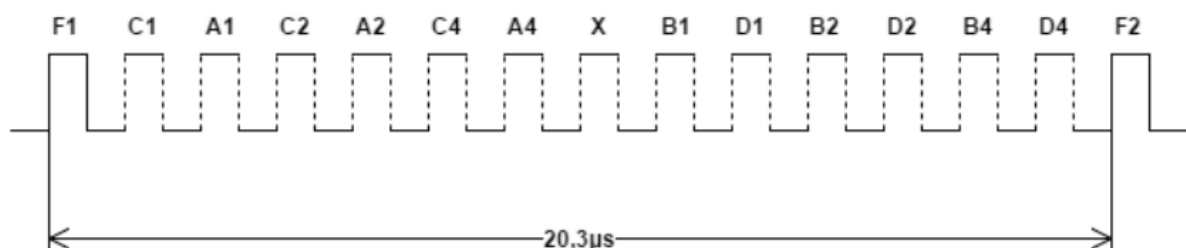
Identifikátor letounu je v podstatě registrační značka letounu, neboli volací znak. Pro Českou republiku je začátek volacího znaku OK.

Squawk kód slouží také k identifikaci letounu za letu. Navíc existují speciální kódy, které popisují situaci za letu. Například kód 7500 je kód pro únos letounu, 7600 je ztráta radiového spojení a 7700 je jiná tíseň.

V odpověď může být obsažen také SPI (Special Position Identification) pulz. Tento pulz je aktivován pilotem na vyžádání řídicího letového provozu, v případě, že je nutné letoun rychle identifikovat například v silném vzdušném provozu. Obrázky 3.2a[2] a 3.2b[2] znázorňují dotazovací signál a signál odpovědi.



Obrázek 3.2a: Dotazovací signál SSR



Obrázek 3.2b: Odpověď v módu A

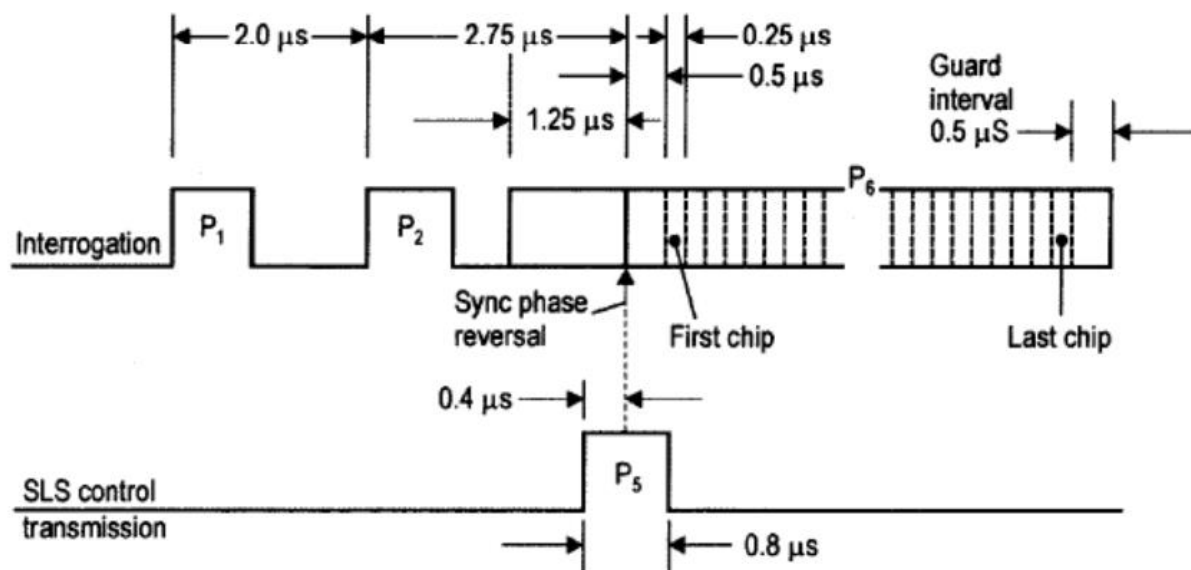
Pulzy F1, F2,.....,Fn v odpovědi zahajují rámeček komunikace. Pulzy A, B ,C a D jsou nositeli informace o letadle.

3.2.2) M3d C

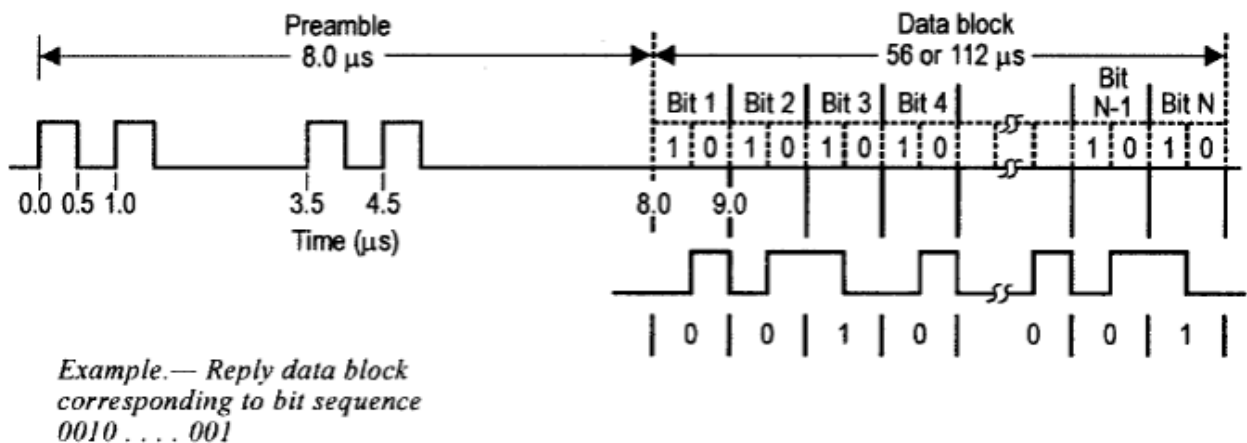
Tento m3d se liší od p3edchoz3iho m3du A ve dvou sm3erech. Vzd3alenost pulz33 P1 a P3 v dotazovac3m sign3lu je 28us. Druh3 rozd3l je v tom, že odpov3e3 obsahuje tak3 informaci o barometrick3 v3yšce. Barometrick3 v3yška je v tomto p33p3ad3 vzt3ažen3 k mezin3rodn3 standardn3 atmosfére, zn3mou pod zkratkou MSA, kter3 je nam3řena v odpov3dači na palub3. Tlakov3 v3yšky se podle normy ICAO d3l3 v rozsahu 1000 až 126 750 stop, v intervalech po sto stop3ch. P33slušn3 intervaly jsou v odpov3di k3dov3ny r3zn3mi kombinacemi bit33. Barometrick3 v3yška je v m3du C k3dov3na Gillhamov3m k3dem.

3.2.3) M3d S

M3d S vys3l3 dotazovac3 sign3l na 1030 MHz a odpov3e3 je vys3l3na na 1090 MHz, a využíva modulaci PPM (z ang. pulse position modulation). Um3 vykon3vat stejn3 funkce jako m3dy A/C, ale liší se v moźnosti použit3 tzv. selektivn3ho dotazov3n3. Dotazovac3 sign3l m3 stejn3 jako u m3du A/C dva pulzy P1 a P2. Pulz P1 je od pulzu P2 vzd3len3 2us. Každ3 z pulz33 m3 d3lku 0,8us. Po pulzu P2 n3sleduje pulz P6, kter3 m3 šířku 1,25us. Nach3z3 se 3,5us od n3běžn3 hrany pulzu P1. Na obr3zku 3.3a[3] je zobrazen dotazovac3 sign3l m3du S. Pr3b3eh odpov3di je na obr3zku 3.3b[3].

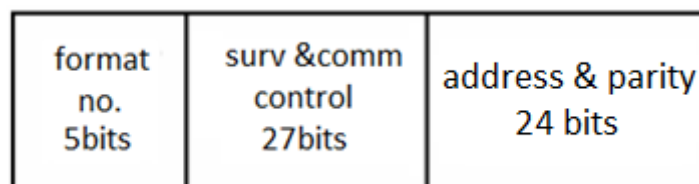


Obr3zek.3.3a: Pr3b3eh dotazovac3ho sign3lu v m3du S

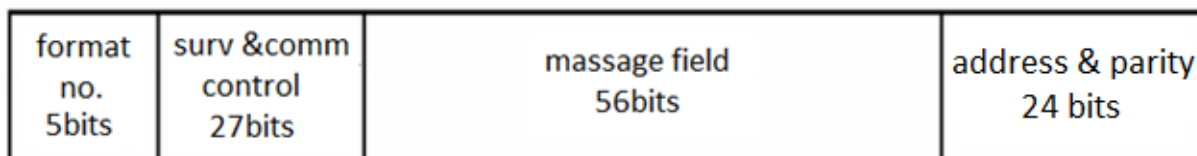


Obrázek 3.3b: Odpověď na dotazovací signál v módu S.

Datové rámce se v módu S dělí z hlediska délky zprávy na takzvaný Short Squitter a Extended Squitter. Rámec Short Squitter se skládá z 56 bitů. V případě rámce Extended Squitter je zpráva složena ze 112 bitů. Přidaných 56 bitů v Extended Squitter rámci obsahuje textovou pole. Toto pole obsahuje zprávy stejně jako rámec ADS-B data.



Obrázek 3.4a: formát Short Squitter



Obrázek 3.4b: formát Extended Squitter

3.2.4) ELS M3d S

Dle poŹadavkŹ na palubn3 odpov3da3e existuj3 dv3 3rovn3 m3du S. Prvn3 3rovn3 je „Elementary Surveillance” (ELS). P3edpisy ICAO poŹaduj3 na ELS n3sleduj3c3 poŹadavky[4]:

- vys3l3n3 24bitov3 ICAO adresu odpov3da3e
- odpov3di na dotazy od SSR
- vys3l3n3 informac3 o statusu letu ve vzduchu a na zemi
- vys3l3n3 informac33 o v3Źice v rozliŹen3 25 ft
- podpora p3enosu identifikace letadla (BDS 20hex)
- vys3l3n3 tzv. Ground Initiated Comm B Protocol (BDS 17hex)
- vys3l3n3 informace o schopnosti vys3l3n3 data linku (BDS 10hex)
- ACAS aktivn3 RA - Resolution Advisory (RA jeden z poplaŹn3ch sign3lŹ TCAS²)

3.2.5) EHS M3d S

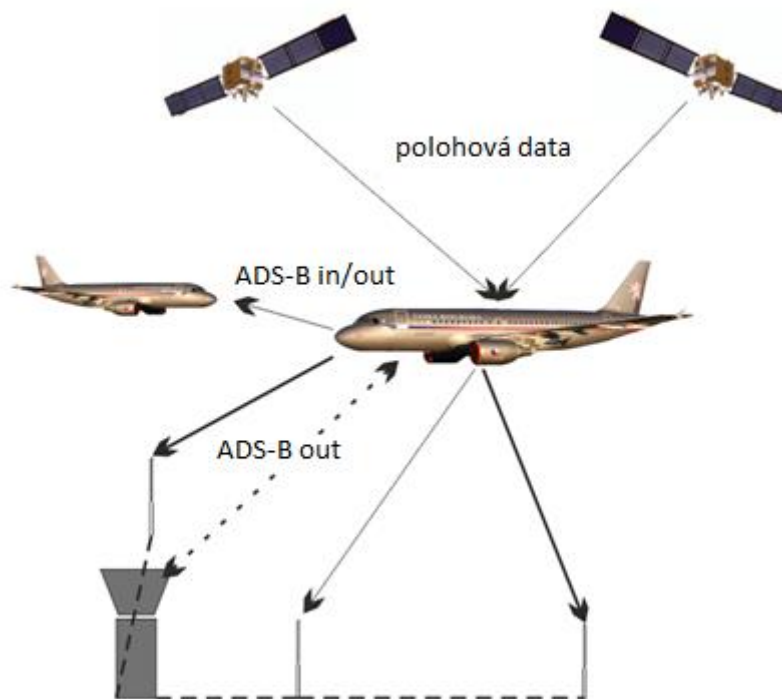
Druhou 3rovn3 je „Enhanced Surveillance” (EHS). Pro EHS plat3 to stejn3 poŹadavky jako pro ELS a nav3c je rozŹ33ena o n3sleduj3c3 funkce:

- nastaven3 v3Źky
- 3hel p333n3ho sklonu
- zem3pisn3 traŹov3 3hel
- rychlost zm3ny traŹov3ho 3hlu
- traŹovou rychlost
- magnetick3 kurz
- indikovanou vzduŹnou rychlost a Machovo 33slo
- vertik3ln3 rychlost

3.3) ADS-B

Nejnov3jŹm3m typem technologie, kter3 se pouŹ3v3 v leteck3 navigaci je Automatic Dependant Surveillance – Broadcast, zn3m3 jako ADS-B. ADS-B slouŹ3 prim3rn3 k identifikaci polohy letounu. K tomu vyuŹ3v3 polohov3 data ze syst3mu GPS, respektive GNSS. Ty pot3 odeŹle do s3t3 pozemn3ch stanic, a tak3 okoln3m letadlŹm, rovn3Ź vybaven3ch syst3mem ADS-B. V3hodou tedy je, okoln3 letadla spolu mohou komunikovat i bez p33t3mnosti pozemn3 stanice. ADS-B je zav3d3n za 333elem zv3Źen3 bezpe3nosti leteck3 dopravy je v r3mci programŹ NextGen (Next Generation Air Transport System) a SESAR (Single European Sky ATM Research). Obr3zke 3.5[5] zn3zorŹuje princip ADS-B syst3mu.

² Traffic collision avoidance system – syst3m indikuje t33 stav3: Clear of conflict – Źadn3 nebezpe33, TA – jin3 letouny potenci3ln3 na kolzn3m kurzu, RA – hroz3c3 nebezpe33 sr3Źky.



Obrázek 3.5: Princip ADS-B

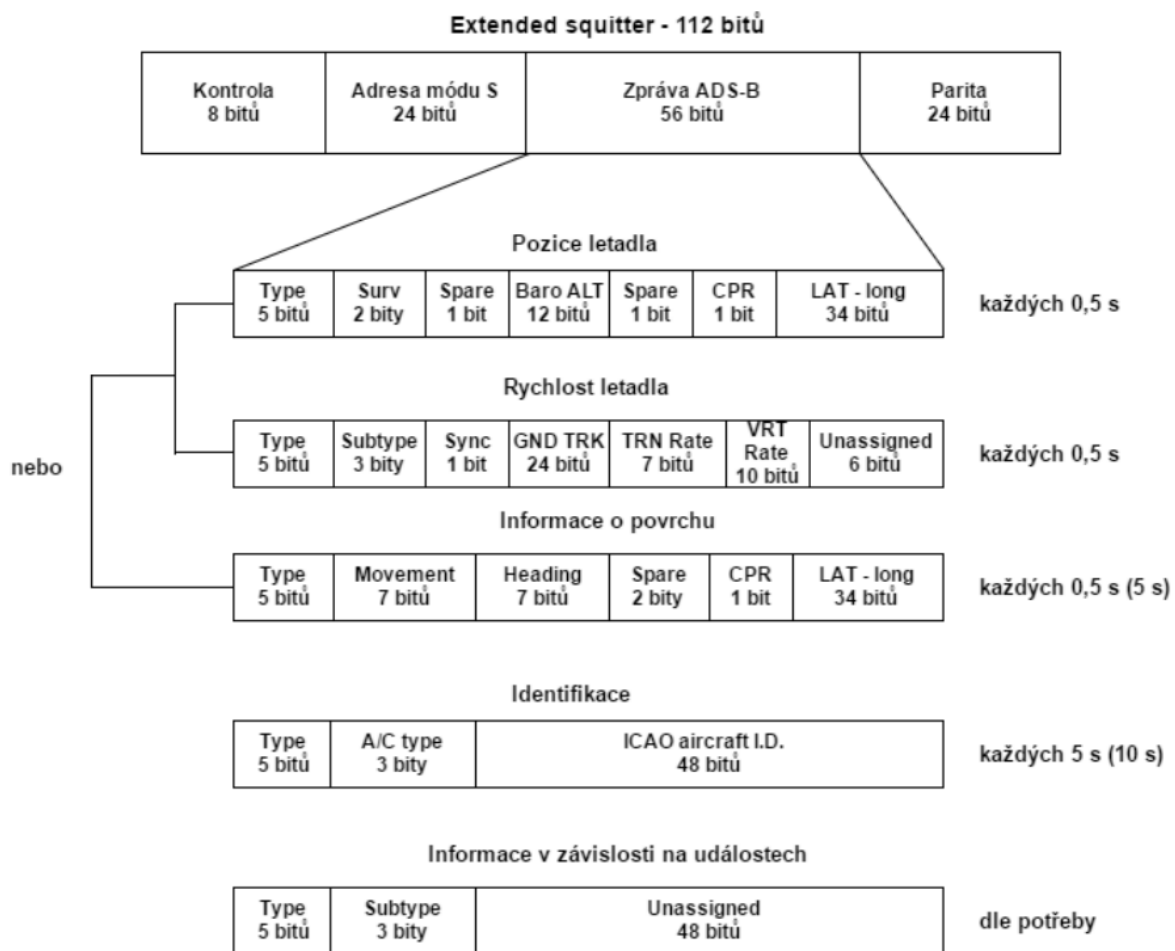
Protože ADS-B vysílá na stejném kmitočtu jako SSR, může přijímač ADS-B přijímat odpovědi na dotazy SSR.

3.3.1) ADS-B in/out

Jak bylo uvedeno výše, ADS-B může informace přijímat nebo vysílat. V případě, že je letoun vybaven systémem ADS-B out, vysílá letových data (z pravidla dvakrát za sekundu). V případě ADS-B in může informace také přijímat. Moderní dopravní letadla jsou vybavena systémem ADS-B in/out. To znamená, že mají schopnost data vysílat i přijímat. ADS-B out, tedy vysílání, probíhá dvakrát za sekundu.

3.3.2) ADS-B rámec

Obsah zprávy ADS-B, respektive rámce odpovědí jsou na obrázku 3.6[2][11][12].



Obrázek 3.6: ADS-B rámeček odpovědi

Kapitola 4

4) Metody zpracování příchozího signálu za účelem stanovení polohy letounu

Pro stanovení přesné polohy letounu, respektive zeměpisných souřadnic, musí existovat vztažený bod, vůči kterému se konkrétní letoun pohybuje, a mění tak vůči tomuto bodu svou polohu. Takovým bodem může být pozemní radar. Ten poskytuje informaci o letounu řídicímu letového provozu. Dalším zařízením, které poskytuje informaci o poloze stroje je radiomaják. Na základě přijatého signálu z radiomajáku může pilot určit svou polohu. Radiomajáky vysílají do prostoru signál, který konkrétní letoun zachytí. Existuje několik metod zpracování signálu z radiomajáků[11].

- SS - signal strenght
- AoA - angel of arrival
- ToA - time of arrival
- TDoA
- RSS

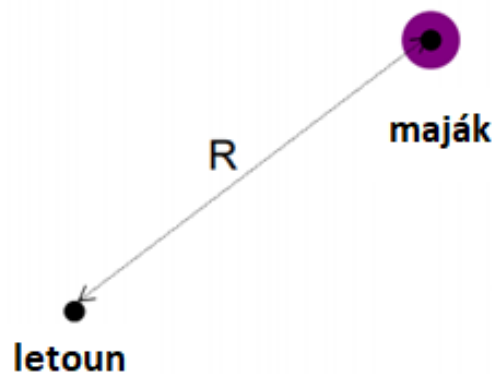
4.1) SS – Signal strenght

Princip zjišťování polohy, respektive vzdálenosti přijímací radiostanice vůči referenci (pozemnímu vysílači). Tento princip vychází z radiokomunikační rovnice, kde na základě úrovně přijatého signálu dostaneme poloměr kružnice, respektive poloměr koule, na které se přijímač signálu nachází vzhledem k vysílači. Chceme-li zjistit polohu od radiomajáku, potřebujeme systém, který je založený na principu „více vysílačů“, které jsou zpravidla rozprostřeny na nějaké ploše. Na základě informace o jednotlivých úrovních přijatých signálů pak můžeme vypočítat polohu radiostanice vůči tomuto systému. Výhodou tohoto přístupu je relativně snadná implementace detektoru úrovně signálu. Nevýhodou SS metody je v útlumu signálu s ohledem na vzdálenost letounu od radiomajáku. To znamená, že čím větší oblast chceme pokrýt, tím více energie musíme dodat do vysílače. Základní princip je ilustrován na obrázku 4.1[7]. V případě pasivního systému, například ADS-B příjem pomocí SDR lze radarovou rovnici (2.3) přepsat do tvaru rádiové rovnice:

$$P_r = P_v \cdot G_v \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad (4.1)$$

Z toho vyplívá vztah pro vzdálenost R od přijímače:

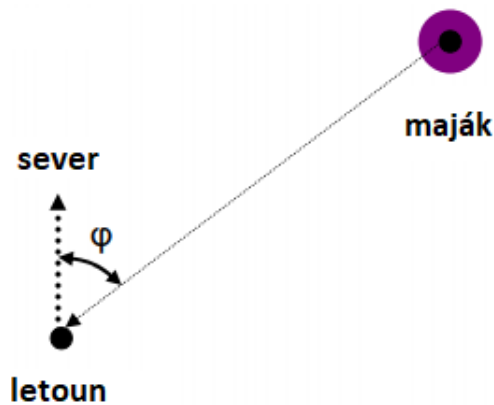
$$R = \frac{\lambda}{4\pi \sqrt{\frac{P_r}{G_r G_v P_v}}} \quad (4.2)$$



Obrázek. 4.1: Vzdálenost letounu od radiomajáku určená pomocí SS

4.2) AoA – Angle of arrival

AoA je termín označující techniku, pomocí které je zjišťována poloha radionavigačního přijímače vzhledem k pozemnímu vysílači (radiomajáku). Princip je založeném na zjištění úhlu přicházejícího signálu vzhledem k nějaké referenci. Tato reference bývá zpravidla zeměpisný, respektive magnetický sever. Technika AoA je použita v radarech, radiokompasech nebo automatických radiokompasech tzv. ADF. Je několik způsobů, jak měřit směr přicházejícího signálu[7][8].



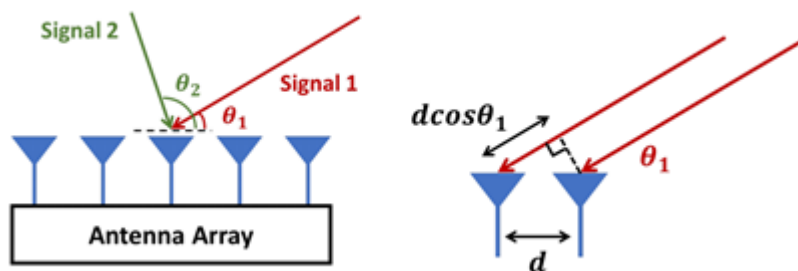
Obrázek 4.2: Princip AoA

a)

Směrová anténa se umístí na otočný systém, který rotuje. V momentu příchodu signálu se zaznamená úhel natočení antény a intenzita příchozího signálu. Zdroj je poté lokalizován ve směru, odkud signál přišel nejsilněji. Důležitými parametry jsou citlivost antény a šířka vysílaného svazku. V praxi se používá druhá stacionární anténa. Síla signálu změřená oběma anténami se porovnává a tím se částečně kompenzuje vliv rušení příjmu signálu přicházejícího z určitého směru.

b)

Použitím několika stacionárních antén (v praxi dvou, tří nebo čtyř). Tyto antény mohou být směrové, nebo všesměrové. V případě systému s otočnými směrovými anténami jsou pevně natočeny do určitého směru. Porovnáním parametrů signálu (síla, fáze atd.) na všech anténách a směru natočení se určí směr příchodu signálu. U všesměrových antén se úhel určí z porovnání síly signálu, nebo časů dopadu na každou anténu. Použitím více antén můžeme lépe odfiltrout vliv okolního rušení. Měření síly signálu na takto koncipovaném systému antén musí probíhat paralelně. To znamená ve stejném čase. Tato metoda se označuje jako interferometrická.



Obrázek. 4.3: Anténní řada pro fázovou interferometrii

4.3) ToA – Time of arrival

ToA, neboli *time of arrival* je metoda, založená změřením času, kdy byl signál detekován. Podle rovnice 4.1 signál urazí určitou vzdálenost za jednotku času. V metodě ToA se používají dva přístupy[8].

a)

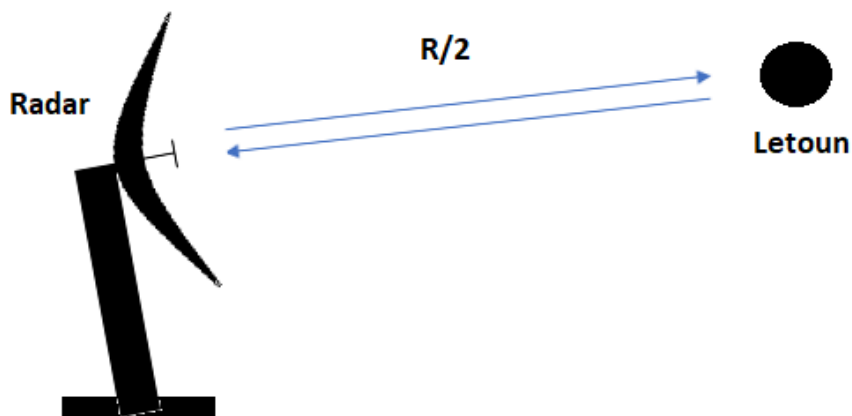
Měření tzv. jednosměrného šíření signálu. Nejprve se změří čas odeslání signálu vysílačem a čas, kdy byl signál obdržěn na přijímači. Poté se z těchto časů spočítá jejich rozdíl. Aby nedocházelo k časovému posuvu, potřebuje tento systém časovou synchronizaci mezi vysílačem a přijímačem. Kvůli potřebě synchronizace časové základny je tento systém náročný z hlediska systémového návrhu (tj. z hlediska HW a SW implementace).

b)

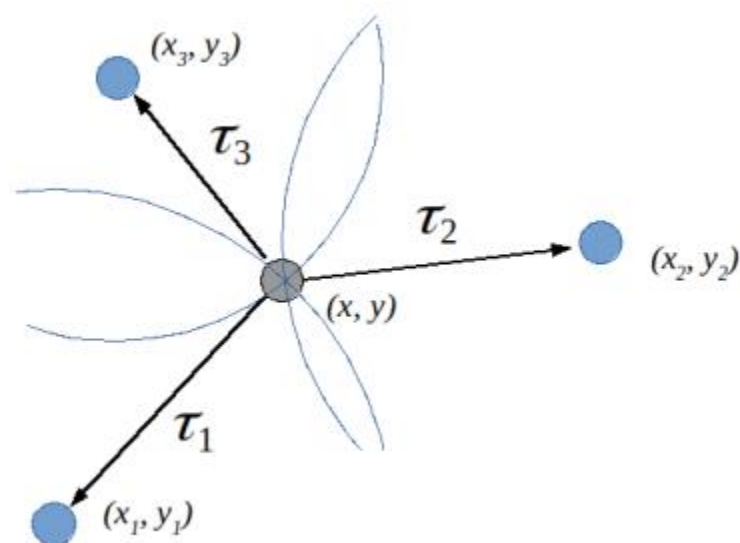
Při takzvaném zpátečním měření se zjišťuje doba, která je potřebná k tomu, aby signál překonal určitou vzdálenost. Stejně, jako u principu SSR, je ale v tomto případě signál přijímačem odeslán zpět k vysílači. Výhodou je, že není potřeba časová synchronizace. Vzdálenost letounu od vysílače, kterou zjistíme při použití této metody, je definována rovnicí (4.3), a princip je ilustrován na obrázku 4.3.

$$R = \frac{1}{2}c_0t [m] \quad (4.3)$$

Radar vyšle signál, který letí k cíli a zpět. Z toho důvodu je potřeba vzdálenost v rovnici (4.3) dělit dvěma (vzdálenost R je dvojnásobná). Při využití metody ToA je potřeba vzít v úvahu čas, respektive zpoždění které nastává v elektronických obvodech během zpracování. Tento čas je potřeba odečíst od doby, kterou signál potřebuje na překonání vzdálenosti R. Metody pracující s časem jsou vhodné pro venkovní použití. Příkladem jsou letiště, nebo rozlehlá prostranství, kde se předpokládá přímá viditelnost mezi vysílačem a přijímačem, a kde je zajištěna co nejmenší odrazivost od okolních staveb hor apod.



Obrázek. 4.4a: Princip ToA pro určení vzdálenosti od přijímače



Obrázek 4.4b: Princip ToA pro určení polohy

V praxi je možné se setkat s termínem ToF, nebo-li dobou letu, a je často zaměňován s ToA pro určení vzdálenosti. ToA pro určení polohy využívá soustavy tří rovnic o třech neznámých.

$$ToA_i = \Delta_{clock} + \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} + e \quad (4.4)$$

kde x, y, z reprezentuje souřadnice cíle, x_i, y_i, z_i souřadnici i -tého přijímače, Δ_{clock} je vliv asynchronizace hodin v jednotlivých přijímačích a e je chyba měření na jednotlivých přijímačích. Princip ToA, nebo-li ToF lze využít pouze u aktivních systémů, kde pozemní vysílač/přijímač vyšle signál, který se vrátí vlivem odrazu zpět (primární radarový systém) nebo na základě odpovědi, jedná-li se o dotazovací signál (SSR). Tento přístup lze použít také u systému GPS, kdy je čas o vyslání signálu součástí datové zprávy.

Protože je cílem této práce zaměřit se na možnosti zpracování signálu ADS-B pomocí systému SDR, který je pasivní, znamená to, že tento systém sám o sobě nevysílá, ale pouze přijímá signály z okolí, nebude metoda ToA/ToF využita pro směrové zaměřování.

4.4) TDoA – Time difference of arrival

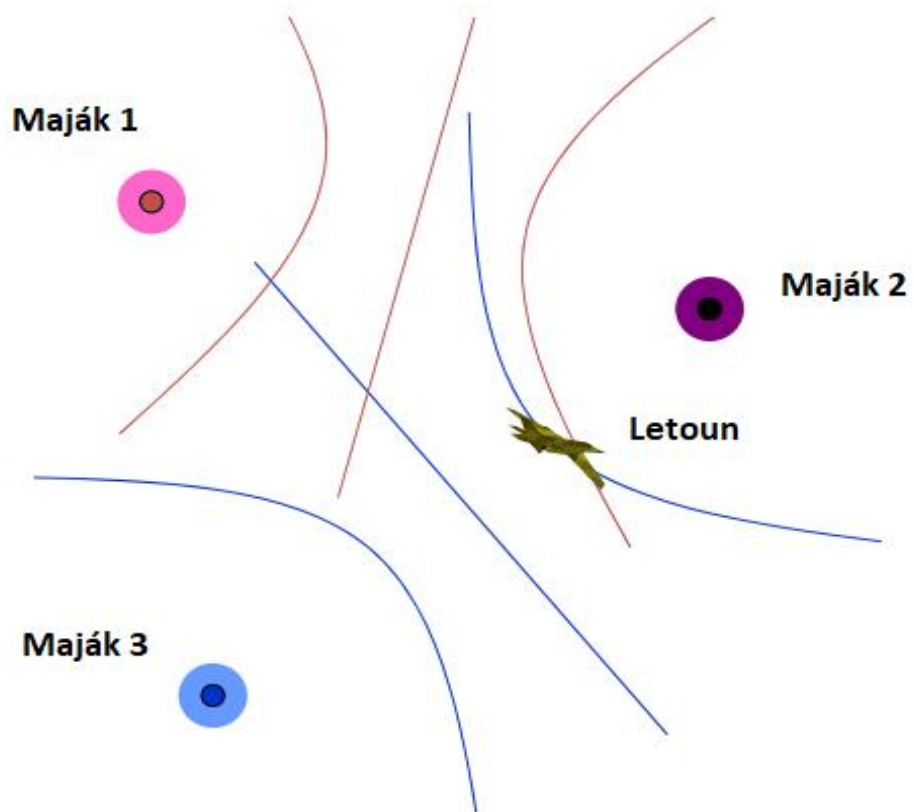
Princip TDoA, známý také jako hyperbolický systém. Protože systém využívá rozdíly časů jednotlivých příchoďů signálu na jednotlivé antény, nepotřebuje sice výše zmíněnou časovou synchronizaci mezi vysílačem a přijímačem, ale vyžaduje synchronizaci mezi všemi přijímacími anténami. Díky jednotlivým časům se vypočítá hyperbola, která je určena dvěma, nebo třemi vysílači. TDoA je další metoda použita pro multilateraci. Tento princip je popsán v kapitole 5. Využití lze nalézt například u systémů Loran, Omega, Tamara a Deca[7][8]. Existuje několik postupů výpočtů polohy pomocí TDoA[9][10]:

- 2-D metoda
- 3-D metoda
- Iterační metody

Metoda 2-D vyžaduje alespoň tři pozemní přijímače. S její pomocí lze získat pozici letounu (x,y) , bez výšky, ve které se letoun nachází. Řešení této úlohy jsou dva kořeny kvadratické rovnice pro souřadnici $x(x_1, x_2)$ a $y(y_1, y_2)$. Přidáním dalších přijímačů, nebo zkombinováním více metod pro směrové zaměřování lze nesprávné polohové údaje eliminovat. Údaj o výšce se dá zjistit například pomocí dekódování zprávy módu C nebo S, nebo ze zprávy ADS-B.

Metoda 3-D nám poskytne kromě polohy (x,y) také informaci o výšce stroje. Stejně jako u 2-D metody vyjdou dvě možná řešení. Špatné řešení lze eliminovat například tím, že některé souřadnice vyjdou fyzikálně špatně, například záporná výška letu atd..

Iterační metoda je z hlediska výpočetního výkonu hardwaru nejnáročnější. Jedná se v podstatě o aproximační metodu, při které se hledá minimální rozdíl od hodnot předcházejících. Nevýhodou je potřeba znalosti počáteční polohy. Z toho vyplývá, že iterační metoda musí být použita v kombinaci s předešlými metodami.



Obrázek 4.5: Princip TDoA

Kapitola 5

5) Implementace MLAT

MLAT s využitím ADS-B signálu slouží jako detekční systém, který vyhodnocuje polohu letounu na základě příjmu signálu (v tomto případě signálu ADS-B), který vysílá konkrétní letoun. Princip MLAT je tedy je obecný pro jakýkoliv signál obecného časového průběhu. Tato diplomová práce se zabývá zpracováním signálu na fyzické vrstvě. To znamená, že, pro principy MLAT je nutné znalost fyzikálních parametrů detekovaných signálů, jako jsou časy příchodů na jednotlivé pozemní přijímače (princip ToA/TDoA) nebo úhly, pod kterými tyto signály k přijímačům přicházejí (princip AoA), popřípadě intenzita přicházejícího signálu (SS). MLAT systém může být v praxi doplněn o dekódování samotné ADS-B zprávy, ze které je poté použita informace o poloze letounu za účelem zpřesnění lokalizace. Abychom mohli rozlišit jednotlivá letadla v daném prostoru, je potřeba provést korelace přichozích signálů s předem naměřenými replikami (nebo jejich částmi) ADS-B signálů při prvotním vstupu letounů do hlídané oblasti. Obecný algoritmus zjištění polohy letounu pomocí MLAT s využitím ADS-B signálu:

- Korelace jednotlivých replik ADS-B s naměřeným signálem z SDR, nebo simulace
- Zjištění TDoA pomocí fázového posuvu přijatého signálu interferometrickou metodou
- Na základě hyperbolické metody a metod AoA, SS, případně jejich kombinací případně zjištění polohy letounu
- Otestování jednotlivých systémů v prostředí matlab/simulink

Jak bylo řečeno výše, získaná data ze SDR jsou nejprve použita pro vytvoření replik signálů jednotlivých letadel. Replikou signálu je v buď celý ADS-B signál, nebo jeho určitá část, která odpovídá například preambuli a ID. Touto replikou se koreluje přichozí signál, a tím na základě maxim korelační funkce dojde k rozlišení různých letounů. Pro zjednodušení budeme počítat s předem známými replikami ADS-B signálů, které jsou použity pro korelace a odlišování různých letadel. Po identifikaci jednotlivých letounů je provedena lokalizace. Pro lokalizační principy ToA/TDoA je nutné, aby pozemní přijímače byly synchronizované. Protože již dopředu známe repliky vzorků signálů ADS-B, není pro účely této práce synchronizaci potřeba řešit. V této práci jsou pro MLAT použity následující metody, respektive jejich kombinace. Hyperbolická metoda, založená na TDoA mezi jednotlivými přijímacími stanicemi metoda na principu AoA, tedy na principu úhlu dopadajícího signálu a metoda SS, tedy měření síly respektive intenzity dopadajícího signálu.

Souřadnicový systém, ve kterém jsou provedeny simulace a ověřování algoritmů je systém lokálních souřadnic ENU (E-east, N-north, U-up).

5.1 Korelace signálů ADS-B

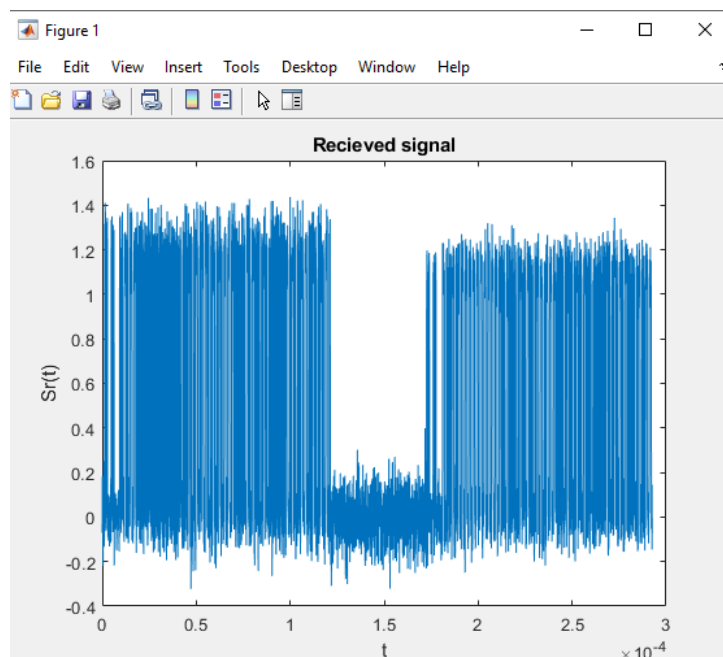
Aby bylo možné rozlišit jednotlivá letadla, která vysílají ADS-B signál, je potřeba provést korelace mezi přijatým signálem a jeho celou replikou, nebo její částí. Pro tento účel bude na vygenerovaném ADS-B signálu otestována funkce korelace mezi přijatým vzorkem signálu a předem známou replikou. Rozlišování jednotlivých ADS-B zpráv provedeno na základě zjištění počtu maxim korelačních funkcí. Kvůli výpočetnímu výkonu HW, který signál zpracovává je snaha provést jednoznačné rozlišení signálů ADS-B s co možná nejkratší replikou signálu. Taková replika musí obsahovat kromě preamble alespoň ID letounu, protože každý letoun má unikátní identifikátor. Cílem je tedy jediného maxima korelační funkce.

Kód generování ADS-B signálu:

```
%.....Signal_1.....
ID1 = [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; %adresa letadla mode-S
M1 = message1(ID1); %vytvoreni zpravy
A1 = 0.5 + (1.5 - 0.5)*rand(1,1); %signal_1 amplitude
signal_code1 = A1*ADSB(Ts, M1); % zakodovani, pridani preamble, votvoreni a
pridani CRC
signal_sum1 = awgn(signal_code1, SNR3, 'measured'); %noise added

%.....Signal_2.....
ID2 = [0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1];
M2 = message2(ID2);
A2 = 0.5 + (1.5 - 0.5)*rand(1,1); %signal_2 amplitude
signal_code2 = A2*ADSB(Ts, M2); % zakodovani, pridani preamble, votvoreni a
pridani CRC
signal_sum2 = awgn(signal_code2, SNR3, 'measured'); %noise added
```

Z kódu je patrné, že každý signál obsahuje různé ID, a jde tedy o dvě různé zprávy. Funkce *message1* a *message2* vytvoří 112 bitů dlouhý řetězec, který slouží jako jádro ADS-B signálu.



Obrázek 5.1: ADS-B zprávy se šumem a různou amplitudou a časovým posunem

Funkce *message* pro první signál:

```
function [ M1 ] = message1( ID1 )
%creating message
M1(1:112) = round(rand(1, 112)); %ADS-B message 112 bits
M1(55:88) = 0;
M1(9:32) = ID1; %prirazení ID čísla letadla na příslušnou pozici
M1(47:80) = 0; %LON LAT
M1(89:112) = parsekvence(M1(1:88), ID1); %přidání parity
M1';save zprava_gen.txt M1 -ASCII;

end
```

Druhý signál je téměř totožný. Jak bylo řečeno výše, liší se v ID letounu. Protože se ADS-B signál skládá z jasně definovaných částí, je signál rozčleněn na dané segmenty. Každý takto vygenerovaný signál má náhodně zvolenou amplitudu, a náhodně vygenerovaná data o zeměpisné poloze. Pro vygenerování preamble a parity, slouží funkce *preamble a parsekvence*, které jsou součástí přílohy. Funkce *bindiv a kódováníadsb* jsou popsány v [2].

Generování zpoždění mezi signály:

```
%.....Delay_signal.....
delay_signal = [0:Ts:(delay_var1)*10^(-6)];
delay_signal_phase12 = [0:Ts:(delay_var1_phase12)*10^(-6)];
delay_signal_phase34 = [0:Ts:(delay_var1_phase34)*10^(-6)];
delay_signal_noise = awgn(delay_signal,SNR3,0.0001); %adding noise to delay
between signals
delay_signal2 = [0:Ts:(delay_var2)*10^(-6)];
delay_signal2_noise = awgn(delay_signal2,SNR3,0.0001); %adding noise to delay
between signals
```

Výsledný signál, který můžeme reálně získat:

```
%.....Signal_1 + Signal_2 + delay between.....
signal12_code = [ delay_signal signal_code1 delay_signal2 signal_code2];
signal12_code_noise = [ delay_signal_noise signal_sum1 delay_signal2_noise
signal_sum2];
```

Pro „zašumění“ signálu byla použita funkce *awgn*, které přidá gaussovský šum. Funkce *awgn* má následující parametry:

- Vstupní signál, který má být zašuměn
- SNR, odstup signál šum v dB
- Příznak *measure* který automaticky změří úroveň vstupního signálu, kvůli aplikaci SNR

Korelace mezi celým signálem a replikou:

```
%.....S Correlation framing S1.....
R_frame = xcorr(signal12_code,signal_code1(time_frame_1*20:time_frame_2*20));
R_frame_norm = R_frame/max(R_frame);
R_frame_noise =
xcorr(signal12_code_noise,signal_code1(time_frame_1*20:time_frame_2*20));
R_frame_noise_norm = R_frame_noise/max(R_frame_noise);
```


Pro zjištění maxim korelačních funkcí, respektive jejich počtu slouží následující kód:

```
%.....find number of max correlation.....
num_max_corr_noise = 0;
num_max_corr = 0;
num_corr = 0;
num_max_corr_noise = 0;
num_corr_noise = 0;
for counter =1:length(R_frame_norm)

    num_corr = R_frame_norm(counter)/max(R_frame_norm);
    if num_corr >= 0.92 && num_corr <= 1.05
        num_max_corr = num_max_corr + 1;
    end

end

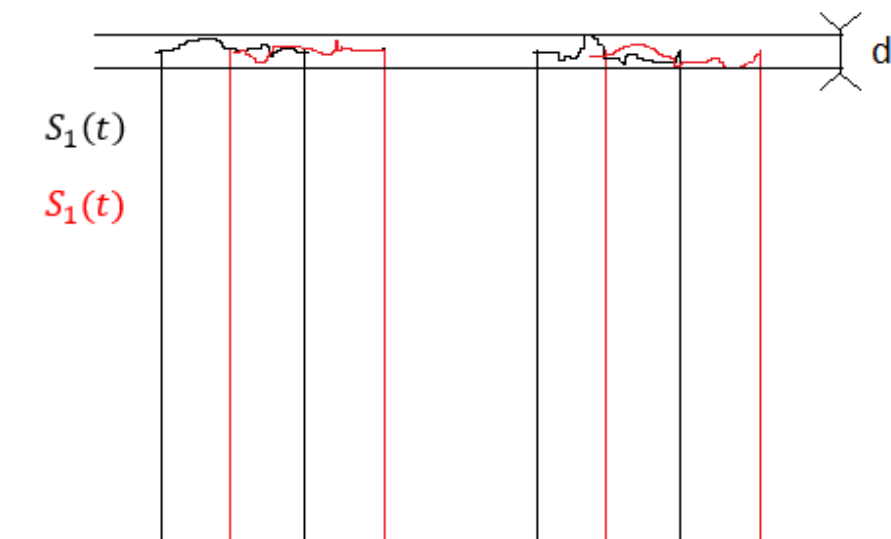
for counter =1:length(R_frame_noise_norm)

    num_corr_noise = R_frame_noise_norm(counter)/max(R_frame_noise_norm);
    if num_corr_noise >= 0.92 && num_corr_noise <= 1.05
        num_max_corr_noise = num_max_corr_noise + 1;
        % time_frame_2 = time_frame_2 + 1;
    end

end

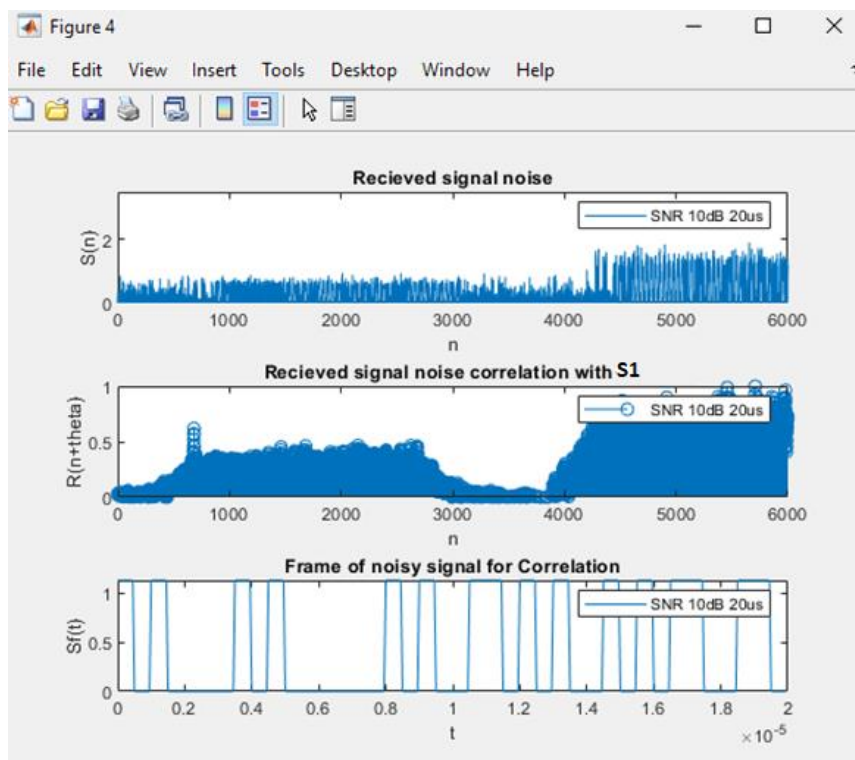
end
```

Maximum korelační funkce je nalezeno jako podíl hodnoty korelační funkce v daném čase k maximální hodnotě celého vektoru. Za ideálního stavu by podmínka pro inkrementaci proměnné *num_max_corr* byla splněna, pokud by se proměnná *num_corr* rovnala hodnotě 1. Vlivem šumu však hodnota fluktuuje v určitém pásmu hodnot. Jako spodní hranice tohoto pásu byla zvolena hodnota 0,92 a horní hodnota 1,05. Tato funkce po přidání do cyklu *while* od komentování iterace proměnné *time_frame* nalezne minimální délku repliky pro jednoznačné určení letounu.



Obrázek 5.2: Fluktuační pás

Větší problém nastává, pokud korelujeme signál s replikou signálu, který má menší amplitudu než druhý signál v záznamu. V takovém případě sice u toho signálu vyjde jedno korelační maximum, avšak celkový počet maxim korelace na daném záznamu bude větší. Aby algoritmus vyhledávání počtu maxim fungoval, je potřeba použít signál s amplitudou stejnou, větší, nebo provádět korelace po úsecích, tedy rozdělit celý záznam na jednotlivé signály, a na ty použít korelační funkce s jejich replikou.



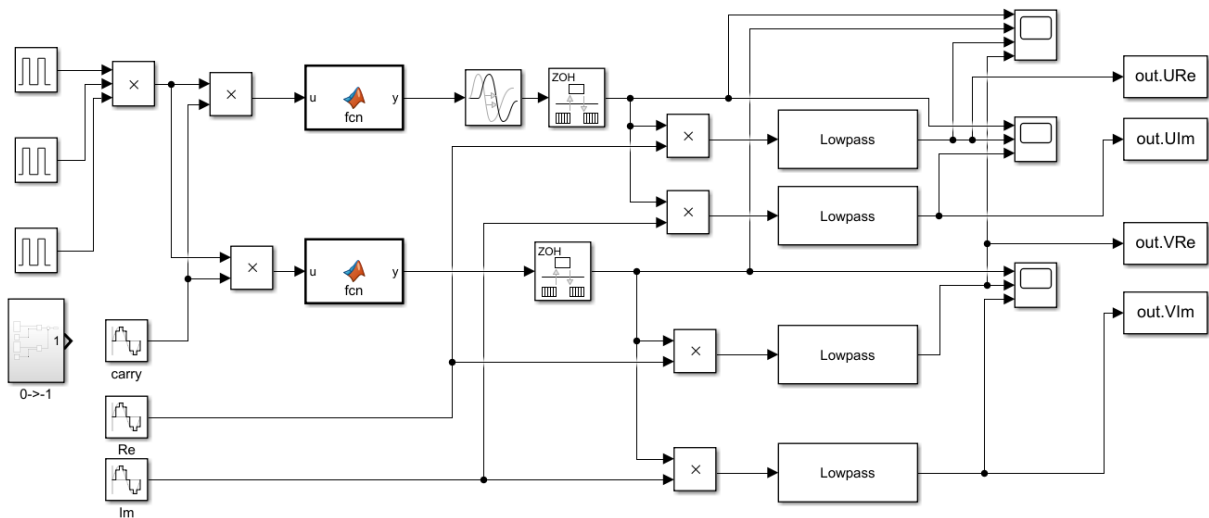
Obrázek 5.3: Korelace celého záznamu s replikou s menší amplitudou

5.2) AoA pro MLAT

Druhá metoda je AoA. Pro použití metody AoA je potřeba znát jednotlivé časy příchodů signálu na jednotlivé kanály přijímačů. Tyto časy slouží ke stanovení fázového posuvu přicházejícího signálu. Ze znalosti fáze se pomocí goniometrických funkcí vypočte úhel, pod kterým signál dopadá na interferometrickou anténní řadu. Přijímače jsou potřeba nejméně dva. Fázi je možné měřit dvěma způsoby.

- Pomocí rozdílu časů dopadu signálů na obě antény (TDoA mezi kanály jednoho přijímače)
- Pomocí rozkladu signálu na reálnou a imaginární část komplexní obálky a aplikací vztahu pro výpočet úhlu mezi dvěma vektory

Pro rozklad signálu na komplexní obálku bylo použito prostředí simulink pro ověření dílčích postupů. Následně byl postup vyzkoušen na simulovaném ADS-B v matlabu.



Obrázek.5.4: Algoritmus měření fázového posuvu

Vstupní signálové bloky na levé straně simulují chování signálu ADS-B. Nejedná se přímo o repliku signálu ADS-B z hlediska struktury dat, ale simulování fyzické vrstvy, to znamená posloupnost „1“ a „0“, které jsou modulovány vysokofrekvenčním signálem, nosnou. Každý rámeček ADS-B obsahuje aperiodickou posloupnost zmíněných „1“ a „0“. Každý signálový blok generuje periodickou posloupnost, ale každý z nich má délku trvání pulzu a periodu. První blok vlevo od shora má generuje signál o kmitočtu 666,6kHz. Zbylé bloky mají menší kmitočty, a tím pádem po přivedení na násobící blok dojde k realizování podobné aperiodické posloupnosti, jako je tomu u ADS-B. Blok vlevo dole simuluje posloupnost „1“ a „-1“ (blok se zapojí ve chvíli, kdy je tuto posloupnost potřeba otestovat). Tento výsledný signál je modulován nosným signálem *carry* o kmitočtu 5MHz, a zašuměn pomocí bloku *user defined function*, ve kterém je použita funkce *awgn*. Modulovaný signál je rozdělen paralelně do dvou větví. Jedna z větví je blokem *time delay* zpožděna. Tato koncepce simuluje rozdílné doby příchodu signálu na fázovou anténní řadu v případě AoA. Bloky signálů *Re* a *Im* jsou pomocí bloku násobení použity k „smíšení“ s modulovaným signálem. Tím dojde k rozložení modulovaného signálu na reálnou a imaginární část komplexní obálky. Bloky *Re*, *Im* a *carry* používají vzorkovací kmitočet 200 MHz. Reálnou a imaginární část signálu je potřeba filtrovat pomocí filtru dolní propust DP. Matematický popis signálu po smíšení (pro reálnou část):

$$d(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) \cdot \cos(2\pi f_c t) = \frac{d(t)}{2} + \frac{d(t)}{2} \cos(2\pi 2f_c t) \quad (5.1)$$

kde $d(t)$ je datová posloupnost, f_c je kmitočet nosné, $2 f_c$ je dvojnásobek kmitočtu nosné. Tuto složku filtrujeme pomocí DP. Tím zbavíme signál vyšších frekvencí, a zůstane pouze signál o rozdílovém kmitočtu, který vznikne jako rozdíl mezi kmitočtem nosné a kmitočtem signálu Re a Im . V tomto konkrétním případě je 5kHz. Výše zmíněná posloupnost „1“ a „-1“ by měla zlepšit průběh rozdílového signálu, a tím zpřesnit výpočet fázového úhlu.

$$Re: d(t)\cos(2\pi(f_c - f_{Re})t) \quad (5.2)$$

$$Im: d(t)\sin(2\pi(f_c - f_{Im})t) \quad (5.3)$$

kde $f_{Re} = f_{Im} = 4,995$ MHz. Tím jsou k dispozici čtyři harmonické signály, dva pro reálnou část a dva pro imaginární část (první signál bez zpoždění a druhý zpožděný). Každý signál tvoří vektor. Pro zjištění úhlu mezi těmito signály, tedy vektory, lze aplikovat vztah:

$$\alpha_{Re} = \cos^{-1}\left(\frac{uRe \cdot uRe_{zpožděná}}{|uRe| \cdot |uRe_{zpožděná}|}\right) \quad (5.4)$$

$$\alpha_{Im} = \cos^{-1}\left(\frac{vIm \cdot vIm_{zpožděná}}{|vIm| \cdot |vIm_{zpožděná}|}\right) \quad (5.5)$$

kde uRe a vIm jsou vektory reálné a imaginární složky signálu. Nakonec jsou vektory uRe , vIm nahrány bloky vpravo do matlab souboru a zpracovány. Výsledné úhly se zprůměrují.

$$\alpha = \frac{(\alpha_{Re} + \alpha_{Im})}{2} \quad (5.6)$$

Rozdíl příchodů časů signálu na fázovou anténní řadu se vypočte:

$$\tau_{\Delta} = T \frac{\alpha}{360^{\circ}} \quad (5.7)$$

Tento časový rozdíl odpovídá TDoA pro systém AoA.

Výpočet v matlabu:

Načtení dat ze simulinku:

```
a = out.URe.data;
b = out.VRe.data;
c = out.UIm.data;
d = out.VIm.data;
```

Vytvoření jedno sloupcového vektoru z dat ze simulinku:

```
a = squeeze(a(1, :, :));
b = squeeze(b(1, :, :));
```

```

c = squeeze(c(1, :, :));
d = squeeze(d(1, :, :));

a = a(2500:52500);
b = b(2500:52500);
c = c(2500:52500);
d = d(2500:52500);                                     %period 20000 with shift 2500

```

Aplikace vztahů (5.3) a (5.4):

```

fi_re = acos(dot(a,b)/(norm(a)*norm(b)));
fi_deg_re = rad2deg(fi_re)

fi_im = acos(dot(c,d)/(norm(c)*norm(d)));
fi_deg_im = rad2deg(fi_im);

```

Průměrování úhlů:

```

fi_deg = (fi_deg_re + fi_deg_im)/2

```

Vykreslení grafu:

```

plot([1:1:length(a)],b,[1:1:length(a)],a)
xlim([0,length(a)])
xlabel('n')
ylabel('S(n)')
title("LF signal output SNR 50dB/input SNR 50dB lowpass filter")
legend('diferrence signal shifted 90°','diferrence signal')

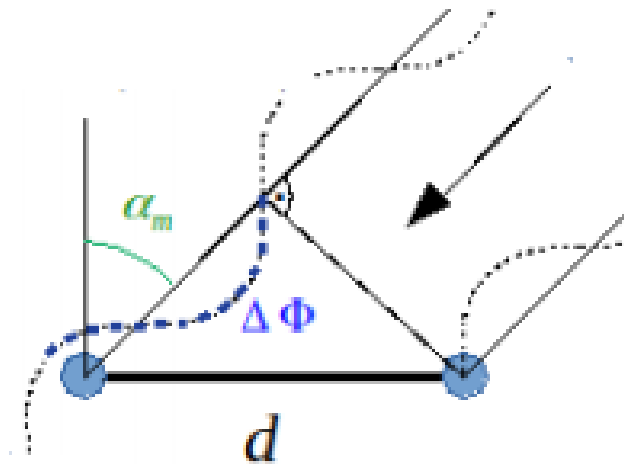
```

Pro otestování algoritmu na ADS-B signálu byl aplikován stejný princip jako v simulinku. Kód ze souboru ATC_1:

```

fs = 1/Ts;
fs_processing = 54.5*fs;
Carril = cos(2*pi*fs_processing*t);
Carri_signal_codel = Carril.*signal_codel;
Re = cos(2*pi*(fs_processing-k*fs_processing)*t).*Carri_signal_codel;
Re_filter = lowpass(Re,0.0001*(fs_processing),fs_processing);
Im = sin(2*pi*(fs_processing-k*fs_processing)*t).*Carri_signal_codel;
Im_filter = lowpass(Im,0.0001*(fs_processing),fs_processing);
Carri_phase12 = cos(2*pi*fs_processing*t_phase12) + delay_var1_phase12*10^(-6);
Carri_signal_codel_phase12 = Carri_phase12.*signal_codel_delayed12;
Re_phase12 = cos(2*pi*(fs_processing-
k*fs_processing)*t_phase12).*Carri_signal_codel_phase12;
Re_filter_phase12 = lowpass(Re_phase12,0.0001*(fs_processing),fs_processing);
Im_phase12 = sin(2*pi*(fs_processing-
k*fs_processing)*t_phase12).*Carri_signal_codel_phase12;
Im_filter_phase12 = lowpass(Im_phase12,0.0001*(fs_processing),fs_processing);

```



Obrázek.5.5: Interferometrické měření úhlu dopadajícího signálu

Úhel dopadajícího signálu α_m vůči směrníku (v tomto případě vůči mag. severu) se vypočte jako:

$$\alpha_m = \sin^{-1} \left(\frac{\Delta\Phi}{d} \right) \quad (5.8)$$

kde $\Delta\Phi$ je fázový posuv signálu a d značí vzdálenost mezi anténami přijímače. Tato vzdálenost odpovídá polovině vlnové délky $\lambda/2$. Při nosné frekvenci 1090Mhz odpovídá tato vzdálenost:

$$0.5\lambda = 0.5 \frac{c}{f} = \frac{299792458}{1090 \cdot 10^6} = 0,275 = 0,1375\text{m} \quad (5.9)$$

Kód v matlabu definice stanic pro AoA, SS:

```
%Recievers AoA co-ordinates
xc_Reci1 = 4000;
yc_Reci1 = 0;
xc_Reci2 = 6000;
yc_Reci2 = 0;
r_rec = 50;

%.....Reciever AoA 1.....
x1_Reci1 = xc_Reci1 - antenna_distance/2;
x2_Reci1 = xc_Reci1 + antenna_distance/2;
y1_Reci1 = yc_Reci1;
y2_Reci1 = yc_Reci1;
P_tr_Reci1 = 100;
G_tr_Reci1 = 1;
G_rec_Reci1 = 1;
```

```
%.....Reciever AoA 2 .....
x1_Reci2 = xc_Reci2 - antenna_distance/2;
x2_Reci2 = xc_Reci2 + antenna_distance/2;
y1_Reci2 = yc_Reci2;
y2_Reci2 = yc_Reci2;
```

```
%Signal_strength reciever
xc_SS = 4000;
yc_SS = 10;
r_rec_SS = 50;
x_SS = r_rec_SS*cos(theta) + xc_SS;
y_SS = r_rec_SS*sin(theta) + yc_SS;
P_tr = 100;
G_tr = 1;
G_rec = 1;
```

Generování provozu:

```
N_of_A_max = 7;
Number_of_aircraft = round(3+(N_of_A_max-3)*rand(1,1));
callsign_array = ["\leftarrow OK-FOR", "\leftarrow OK-MRK", "\leftarrow
OK-DSL", "\leftarrow OK-ASY".....]
```

```
direction_vector_x(i) =
Aircraft_velocity_mag(i,1)*Aircraft_velocity_x(i);
direction_vector_y(i) =
Aircraft_velocity_mag(i,1)*Aircraft_velocity_y(i);
Aircraft_position(a,i,1) = Aircraft_position(a-1,i,1) +
direction_vector_x(i);
Aircraft_position(a,i,2) = Aircraft_position(a-1,i,2) +
direction_vector_y(i);
```

Nejprve uživatel vybere počet letounu pomocí *Number_of_aircraft*. Z přednastavené databáze volacích znaků dojde k přiřazení volacího znaku konkrétnímu letounu. Pohyb letounu v simulaci zajišťuje *direction_vector_x,y*, který dá letounu směr a velikost rychlosti. Tato proměnná se poté přičte při každé iteraci simulace k proměnné *Aircraft_position_x,y*, respektive k její předcházející hodnotě. Tím vznikne nová souřadnice letounu v ENU. Protože jsou letadla, respektive jejich počáteční polohy generovány náhodně, bylo potřeba teoreticky velké množství simulací, než se konkrétní letoun vydal směrem k letišti. Letadla by vylétávala pryč z mapy. Proto bylo potřeba počáteční souřadnice a vektory rychlostí omezit tak, aby například letoun, který se objeví v prvním kvadrantu mapy směřoval v určitém úhlovém rozsahu ke středu letiště.

Výpočet TDoA pro AoA:

```
%.....Aircraft distance from Antenna recievers....TDoA/ToA for AoA.....
toa1_Reci1(a,i) = Aircraft_dist_from_x1y1_Reci1(a,i)/c;
toa2_Reci1(a,i) = Aircraft_dist_from_x2y2_Reci1(a,i)/c;
toa1_Reci2(a,i) = Aircraft_dist_from_x1y1_Reci2(a,i)/c;
toa2_Reci2(a,i) = Aircraft_dist_from_x2y2_Reci2(a,i)/c;
TDoA_Reci1(a,i) = toa1_Reci1(a,i) - toa2_Reci1(a,i);
TDoA_Reci2(a,i) = toa2_Reci2(a,i) - toa1_Reci2(a,i);
```

Výpočet úhlů:

```
%.....Angle of arrival with North reference.....

delta_fi_Reci1(a,i) = abs((c*TDoA_Reci1(a,i)));
delta_fi_Reci2(a,i) = abs((c*TDoA_Reci2(a,i)));
alpha_g = pi/2;
alpha_g_deg = rad2deg(alpha_g);
alpha_m(a,i) = asin((delta_fi_Reci1(a,i))/(antenna_distance));
alpha_m_deg(a,i) = rad2deg(alpha_m(a,i));
if TDoA_Reci1(a,i) >= 0
alpha_deg(a,i) = alpha_g_deg - alpha_m_deg(a,i);
else
alpha_deg(a,i) = alpha_g_deg + alpha_m_deg(a,i);
end
alpha(a,i) = deg2rad(alpha_deg(a,i));

beta_g = 2*pi;
beta_g_deg = rad2deg(beta_g);
beta_m(a,i) = asin((delta_fi_Reci2(a,i))/(antenna_distance));
beta_m_deg(a,i) = rad2deg(beta_m(a,i));
if TDoA_Reci2(a,i) >= 0
beta_deg(a,i) = real(beta_g_deg - beta_m_deg(a,i));
else
beta_deg(a,i) = real(beta_g_deg + beta_m_deg(a,i));
end
beta_deg_recal(a,i) = beta_deg(a,i)-270;
beta_recal(a,i) = deg2rad(beta_deg_recal(a,i));
```

Výpočet vzdálenosti od bodů P1 a P2:

```
Reci1_dist(a,i) = reciever_distance*((sin(beta_recal(a,i)))/(sin(pi-
(beta_recal(a,i) + alpha(a,i)))));

Reci2_dist(a,i) = reciever_distance*((sin(alpha(a,i)))/(sin(pi-(beta_recal(a,i) +
alpha(a,i)))));
```

Rozlišení y-souřadnice na základě síly signálu na P1 a P3:

```
Aircraft_position_AoA_x(a,i) = Aircraft_position_AoA_x_Reci2(a,i);
if a > 1
P_rec_delta(a,i) = P_rec(a,i) - P_rec(a-1,i);
Aircraft_position_AoA_y_delta(a,i) = (Aircraft_position_AoA_y_Reci2(a,i) -
Aircraft_position_AoA_y_Reci2(a-1,i));
if ((P_rec_delta(a,i) < 0 && Aircraft_position_AoA_y_delta(a,i) < 0) ||
(P_rec_delta(a,i) > 0 && Aircraft_position_AoA_y_delta(a,i) < 0))
if P_rec_Reci1(a,i) <= P_rec(a,i)
Aircraft_position_AoA_y(a,i) = Aircraft_position_AoA_y_Reci2(a,i);
else
Aircraft_position_AoA_y(a,i) = -1*Aircraft_position_AoA_y_Reci2(a,i);
end
else
if P_rec_Reci1(a,i) <= P_rec(a,i)
Aircraft_position_AoA_y(a,i) = (Aircraft_position_AoA_y_Reci2(a,i));
else
Aircraft_position_AoA_y(a,i) = -1*(Aircraft_position_AoA_y_Reci2(a,i));
end
end
else
Aircraft_position_AoA_y(a,i) = Aircraft_position_AoA_y_Reci2(a,i);
end
```


Výpočet souřadnic:

Z P1 a P2

```
%.....Position of Aircraft based on Reciever 1.....
Aircraft_position_AoA_x_Reci1(a,i) = Reci1_dist(a,i)*cos(alpha(a,i)) + abs(xc_Reci1);
Aircraft_position_AoA_y_Reci1(a,i) = Reci1_dist(a,i)*sin(alpha(a,i)) + abs(yc_Reci1);
Aircraft_position_AoA_x_Reci1(a,i) =
awgn(Aircraft_position_AoA_x_Reci1(a,i),SNR,'measured');
Aircraft_position_AoA_y_Reci1(a,i) =
awgn(Aircraft_position_AoA_y_Reci1(a,i),SNR,'measured');
%.....Position of Aircraft based on Reciever 2.....
Aircraft_position_AoA_x_Reci2(a,i) = -1*(Reci2_dist(a,i)*cos(beta_recal(a,i)) -
abs(xc_Reci2));
Aircraft_position_AoA_y_Reci2(a,i) = Reci2_dist(a,i)*sin(beta_recal(a,i)) +
abs(yc_Reci2);
Aircraft_position_AoA_x_Reci2(a,i) =
awgn(Aircraft_position_AoA_x_Reci2(a,i),SNR,'measured');
Aircraft_position_AoA_y_Reci2(a,i) =
awgn(Aircraft_position_AoA_y_Reci2(a,i),SNR,'measured');
```

Teoreticky by se dala funkce *awgn* aplikovat již na proměnou *toa1_Reci1(a,i)* uvedenou výše, avšak po otestování nebyl signál kvalitně zašuměn. Navíc docházelo ke zpomalení celé simulace. Důvodem by mohlo být to, že proměnná *toa1_Reci1(a,i)* později vstupuje do funkce *asin*, která vlivem zašumění parametru není schopna provést rychlý výpočet.

Příklad rozšíření simulace, data z AoA/SS jsou použity pro kontrolu vstupu letounů do letištní zóny.

```
%.....ATZ zone traffic control.....
Aircraft_dist_from_apor(a,i) = sqrt((Aircraft_position_AoA_x(a,i) -
xc)^2+(Aircraft_position_AoA_y(a,i) - yc)^2);
if Aircraft_dist_from_apor(a,i) < r
Zone_flag(a,i) = 1;
if Aircraft_dist_from_apor(a,i) <= r && Aircraft_dist_from_apor(a-1,i) > r
Zone_number_of_planes = Zone_number_of_planes + 1;
end
else
Zone_flag(a,i) = 0;
end
end
```

Je-li letoun v perimetru menším, než je perimetr letiště *r*, *Zone_flag* = 1, jinak 0. Hodnota této proměnné poté rozhodne o zbarvení letounu v závislosti na tom zda je, nebo není v perimetru letiště.

Antikolizní systém:

```
%.....Relative position between aircrafts.....
for i = 1:Number_of_aircraft
for j = 1:Number_of_aircraft
Aircraft_mutual_distance(a,i,j) = sqrt((Aircraft_position_AoA_x(a,i) -
Aircraft_position_AoA_x(a,j))^2 + ((Aircraft_position_AoA_y(a,i) -
Aircraft_position_AoA_y(a,j))^2));
if Aircraft_mutual_distance(a,i,j) <= 2000 && i~=j
Alert_flag(a,i,j) = 1; %Alert trigger
else
Alert_flag(a,i,j) = 0;
end
end
end
end
end
```

Tato funkce hlídá vzájemnou polohu letounů v perimetru letiště. Jsou-li letouny od sebe blíže než je stanovený rozestup, veškerý konfliktní provoz zčervená na základě příznaku `Alert_flag`.

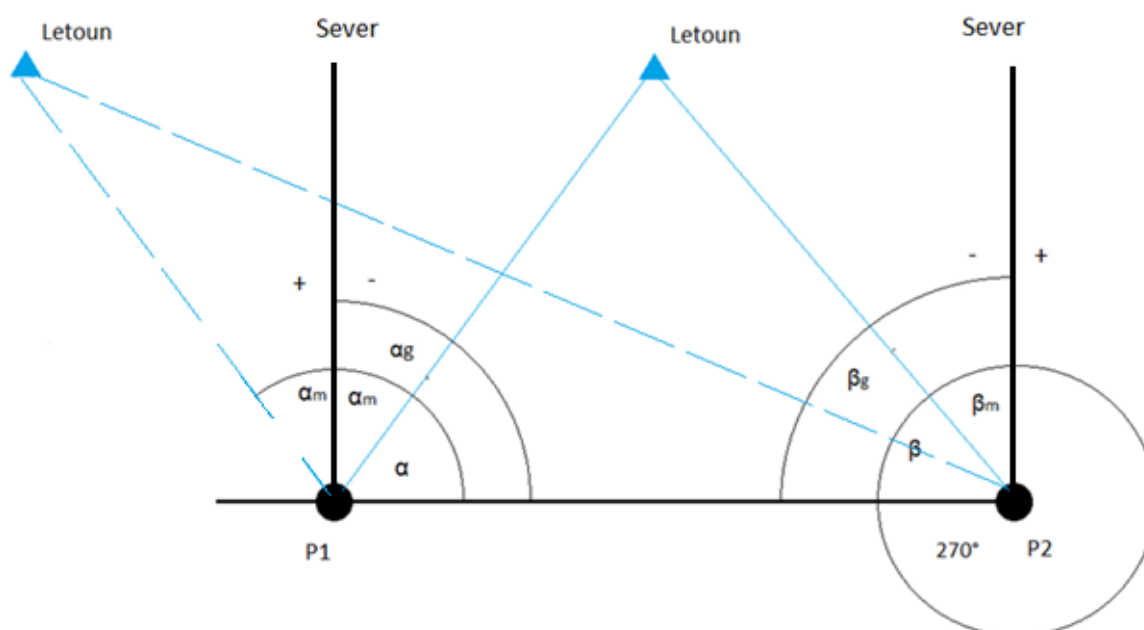
Nakonec následuje funkce *plot* pro vykreslení dat:

```
figure(1);
for a=1:sim_time
    milliPause(10)
    plot(x,y)
    axis equal
    hold on
    plot(x_Reci1,y_Reci1,x_Reci2,y_Reci2)
    hold on
    plot(x_SS,y_SS)
    hold on
    plot(x_Reci1_mlat,y_Reci1_mlat,x_Reci2_mlat,y_Reci2_mlat,x_Reci3_mlat,y_Reci3_mlat)
    hold on
    for i =1:Number_of_aircraft
        if Zone_flag(a,i) == 1
            col = 'y';
%
plot(Aircraft_position(a,i,1),Aircraft_position(a,i,2),'or','MarkerSize',5,'MarkerFaceColor',c
ol)
%
        text(Aircraft_position(a,i,1),Aircraft_position(a,i,2),callsign_array(i))
%
plot(Aircraft_position_AoA_x(a,i),Aircraft_position_AoA_y(a,i),'or','MarkerSize',5,'MarkerFace
Color',col)
%
text(Aircraft_position_AoA_x(a,i),Aircraft_position_AoA_y(a,i),callsign_array(i))

plot(Aircraft_position_X(a,i),Aircraft_position_Y(a,i),'or','MarkerSize',5,'MarkerFaceColor',c
ol)
        text(Aircraft_position_X(a,i),Aircraft_position_Y(a,i),callsign_array(i))
        hold on
        axis([0 10000 -5000 5000])
    end
end
for i =1:Number_of_aircraft
    for j=1:Number_of_aircraft
        if Zone_flag(a,i) == 1 && Alert_flag(a,i,j) == 1
            col = 'r';
%
plot(Aircraft_position(a,i,1),Aircraft_position(a,i,2),'or','MarkerFaceColor',col)
%
text(Aircraft_position(a,i,1),Aircraft_position(a,i,2),callsign_array(i),'Color',col)
%
plot(Aircraft_position_AoA_x(a,i),Aircraft_position_AoA_y(a,i),'or','MarkerSize',5,'MarkerFace
Color',col)
%
text(Aircraft_position_AoA_x(a,i),Aircraft_position_AoA_y(a,i),callsign_array(i))

plot(Aircraft_position_X(a,i),Aircraft_position_Y(a,i),'or','MarkerSize',5,'MarkerFaceColor',c
ol)
        text(Aircraft_position_X(a,i),Aircraft_position_Y(a,i),callsign_array(i))
        hold on
        axis([0 10000 -5000 5000])
    end
end
end
```

Pro systém s dvěma přijímacími stanicemi vypadá geometrická úloha takto:



Obrázek 5.6: Zaměřování polohy pomocí AoA s dvěma přijímači

Pro zjištění vzdálenosti mezi letounem a přijímačem je nutné znát úhel vůči rovině α a β . Tyto úhly zjistíme následovně:

$$\alpha = \alpha_g \pm \alpha_m \quad (5.10)$$

$$\beta = \beta_g \pm \beta_m \quad (5.11)$$

případně v pravotočivé konvenci:

$$\beta = 360 \pm \beta_m - 270 \quad (5.12)$$

Znaménková konvence +/- je u výpočtu úhlů důležitá z hlediska rozlišení toho, je-li letoun od dané stanice nalevo nebo napravo, respektive východně nebo západně. Pro výpočet vzdálenosti letounu od stanice P1, případně P2 použijeme sinovou větu, která vychází z faktu, že součet vnitřních úhlů obecného trojúhelníka je 180° .

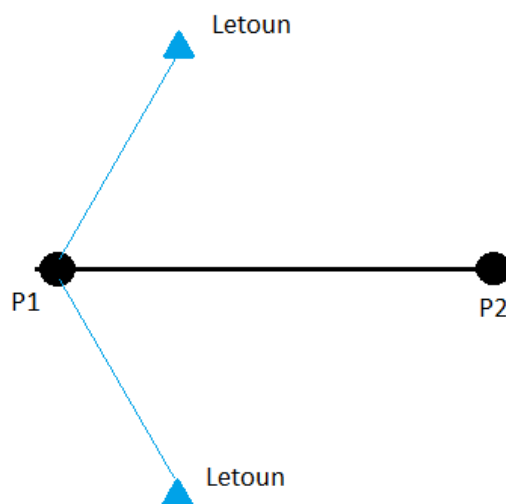
Platí tedy, že vzdálenost mezi P1 a letounem je dána:

$$R_{P1} = \frac{L \cdot \sin(\beta)}{\sin(180 - (\alpha + \beta))} \quad (5.13)$$

Obdobným způsobem se vypočítá vzdálenost mezi P2 a letounem.

$$R_{P2} = \frac{L \cdot \sin(\alpha)}{\sin(180 - (\alpha + \beta))} \quad (5.14)$$

U takto koncipovaného systému, tedy dva přijímače, je problém, že lokální y-ová souřadnice nelze jednoznačně rozlišit, protože úhel α , respektive β je měřený vůči referenční spojnici mezi oběma přijímači.

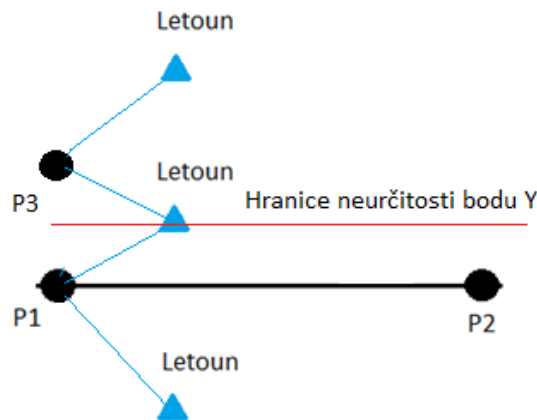


Obrázek: 5.7: Nejednoznačnost určení y-ové souřadnice

Tento problém lze vyřešit buď třetím přijímačem, nebo dalším kanálem například u přijímače P1. Tento další přijímač/kanál označíme jako bod P3 a bude měřit sílu signálu přicházejícího od zdroje. Zároveň bude měřena intenzita signálu v bodě P1. Na základě informace o poloze z interferometrického měření na P1 a P2 a porovnáním síly signálu v bodech P1 a P3 lze získat jednoznačnou informaci o poloze sledovaného objektu. Tato topologie na obrázku 5.4 je jedním z hybridních uspořádání, které je možné pro zaměřování použít. V praxi se lze setkat s mnoha variantami uspořádání.

Důležité také je, aby přijímací bod P3 nebyl příliš blízko, nebo příliš daleko od bodu P1. Pokud je bod P3 příliš blízko, nastává problém s rozlišením hodnoty síly signálu vlivem určité citlivosti rádiového přijímače. V případě simulace je problém dán zaokrouhlováním, výsledné hodnoty síly signálu jsou zaokrouhlovány na určitou přesnost a krátká vzdálenost tedy znamená nerozlišitelnost v y-ové ose. Velkou roli v tomto případě hraje také šum, který se vyskytuje jak v rámci samotného přenosového

kanálu, tak během měření časů (fází) přicházejících signálů. V opačném případě, kdy je bod P3 příliš daleko od bodu P1 dochází k vytvoření pásu neurčitosti, ve kterém je opět problém s jednoznačností y-ové souřadnice.



Obrázek 5.8: Vliv vzdálenosti P1 a P3 na určení y-ové souřadnice

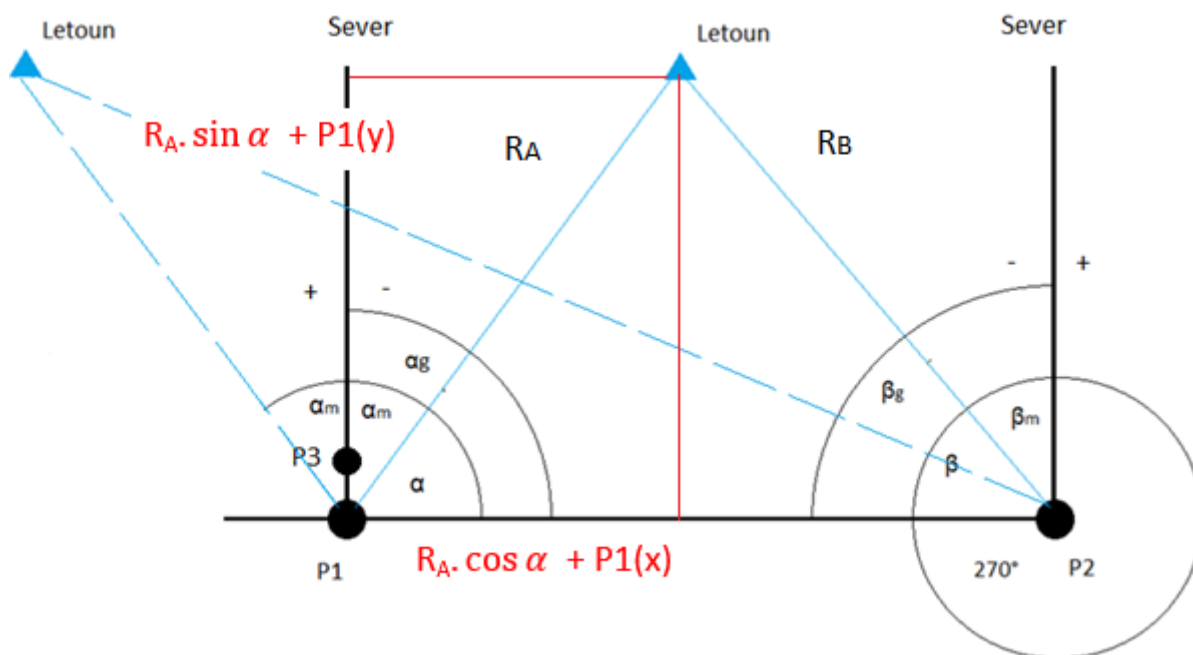
Přesné umístění bodu P3 by v reálné situaci záviselo na parametrech konkrétního přijímače, a také na vlivu okolního prostředí. V simulaci byla vzdálenost vybrána jako nejlepší možný kompromis mezi oběma vlivy. Během simulace byl simulován přijatý výkon, který se se vzdáleností měnil podle vztahu 4.1 a vliv šumu na detekci síly signálu pomocí funkce *awgn*:

```
P_rec_Recil(a, i) =
awgn(P_tr_Recil*G_tr_Recil*G_rec_Recil*L_loss_Recil(a, i), SNR, 'measured'
);
```

Ze znalosti vzdálenosti mezi P1 a letounem (R_A) a úhlu α nebo vzdálenosti mezi P2 a letounem (R_B) a úhlem β , a zároveň ze znalosti intenzity signálu na P1 a P3 lze vypočítat souřadnice letounu pomocí zobrazení z polárních do kartézských souřadnic.

$$x = R_A \cdot \cos(\alpha) + P1(x) \quad (5.15)$$

$$y = R_A \cdot \sin(\alpha) + P1(y) \quad (5.16)$$



Obrázek: 5.9 Kombinace algoritmů AoA a SS

5.3 Hyperbolická metoda

Obecný princip byl zmíněn v kapitole 4. Hyperbolická metoda využívá TDoA, tedy rozdíl časů detekcí. U hyperbolické metody se jedná o rozdíl časů mezi různými přijímači na rozdíl od AoA, kde je časová diference brána mezi jednotlivými kanály přijímače. Pro implementaci hyperbolické metody byl zvolen postup stanovení polohy ve 2-D.

Nejprve je potřeba definovat jako u předešlé metody souřadnice měřících stanic. Po se stanoví vzdálenosti mezi letounem a jednotlivými přijímači stanicemi.[9][10][13]

$$H_1 = \sqrt{(x - xc_Reci1)^2 + (y - yc_Reci1)^2} \quad (5.17)$$

$$H_2 = \sqrt{(x - xc_Reci2)^2 + (y - yc_Reci2)^2} \quad (5.18)$$

$$H_3 = \sqrt{(x - xc_Reci3)^2 + (y - yc_Reci3)^2} \quad (5.19)$$

Nyní je potřeba rozdíl vzdáleností mezi letounem a vedlejším přijímačem a letounem a hlavním přijímačem, který je označen jako Recí3.

Obecně lze rozdíl vyjádřit jako:

$$h_1 = (t_1 - t_3) \cdot c \quad (5.20)$$

$$h_2 = (t_2 - t_3) \cdot c \quad (5.21)$$

A tedy:

$$h_1 = H_1 - H_3 \quad (5.22)$$

$$h_2 = H_2 - H_3 \quad (5.23)$$

$$h_1 + H_3 = H_1 \quad (5.24)$$

$$h_2 + H_3 = H_2 \quad (5.25)$$

Do rovnic (5.24) a (5.25) dosadíme a umocníme:

$$2x \cdot xc_{Reci3} - xc_{Reci3}^2 + 2y \cdot yc_{Reci3} - yc_{Reci3}^2 - 2x \cdot xc_{Reci1} + xc_{Reci1}^2 - 2y \cdot yc_{Reci1} + yc_{Reci1}^2 - h_1^2 = 2h_1 \sqrt{(x - xc_{Reci3})^2 + (y - yc_{Reci3})^2} \quad (5.26)$$

$$2x \cdot xc_{Reci3} - xc_{Reci3}^2 + 2y \cdot yc_{Reci3} - yc_{Reci3}^2 - 2x \cdot xc_{Reci2} + xc_{Reci2}^2 - 2y \cdot yc_{Reci2} + yc_{Reci2}^2 - h_2^2 = 2h_2 \sqrt{(x - xc_{Reci3})^2 + (y - yc_{Reci3})^2} \quad (5.27)$$

Zavedeme modul L1 a L2:

$$L_1 = xc_{Reci1}^2 + yc_{Reci1}^2 - xc_{Reci3}^2 - yc_{Reci3}^2 \quad (5.28)$$

$$L_2 = xc_{Reci2}^2 + yc_{Reci2}^2 - xc_{Reci3}^2 - yc_{Reci3}^2 \quad (5.29)$$

Dosadíme (5.28) a (5.29) do (5.26) a (5.27) a rovnice od sebe odečteme, vzniknou tři koeficienty:

$$a = h_2 \cdot (xc_{Reci3} - xc_{Reci1}) + h_1 \cdot (xc_{Reci2} - xc_{Reci3}) \quad (5.30)$$

$$b = h_2 \cdot (yc_{Reci3} - yc_{Reci1}) + h_1 \cdot (yc_{Reci2} - yc_{Reci3}) \quad (5.31)$$

$$c = \frac{h_2 L_1 - h_2 h_1^2 - h_1 L_2 - h_1 h_2^2}{2} \quad (5.32)$$

Obecná lineární rovnice má tvar:

$$ax + by + c = 0 \quad (5.33)$$

Definujeme:

$$y = ex + f \quad (5.34)$$

$$e = -\frac{a}{b} \quad (5.35)$$

$$f = -\frac{c}{b} \quad (5.36)$$

Rovnice (5.34), (5.35) a (5.36) dosadíme do upravených rovnic (5.26) a (5.27)

$$\frac{2x(xc_{Reci3} - xc_{Reci1}) + 2(ex + f)(yc_{Reci3} - yc_{Reci1}) + L_1 - h_1^2}{2h_1\sqrt{(x - xc_{Reci3})^2 + (ex + f - yc_{Reci3})^2}} = \quad (5.37)$$

Po úpravě a vytknutí x z rovnice (5.37) zavedeme konstanty M, N:

$$M = xc_{Reci3} - xc_{Reci1} + e(yc_{Reci3} - yc_{Reci1}) \quad (5.38)$$

$$N = f(yc_{Reci3} - yc_{Reci1}) + L_1 - h_1^2 \quad (5.39)$$

tyto konstanty dosadíme do upravené rovnice (5.37) a tu poté umocníme:

$$4M^2x^2 + 4MNx + N^2 = 4h_1^2(1 + e^2)x^2 + 8h_1^2(-xc_{Reci3} + ef - eyc_{Reci3})x + 4h_1^2(xc_{Reci3}^2 + f^2 + yc_{Reci3}^2 - 2fyc_{Reci3}) \quad (5.40)$$

Rovnici (5.40) zjednodušíme zavedením dalších konstant a dostaneme:

$$4M^2x^2 + 4MNx + N^2 = Px^2 + Qx + R \quad (5.41)$$

Pro kvadratickou rovnici:

$$Ax^2 + Bx + c = 0 \quad (5.42)$$

Zavedeme substituci:

$$A = 4M^2 - P \quad (5.43)$$

$$B = 4MN - Q \quad (5.44)$$

$$C = N^2 - R \quad (5.45)$$

Řešením kvadratické rovnice je pomocí diskriminantu následující:

$$x_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (5.46)$$

$$y_{1,2} = ex_{1,2} + f \quad (5.47)$$

Kód hyperbolické metody v matlabu:

Zjištění vzdálenosti od přijímačů:

```
%.....Multilat_TDoA.....  
Aircraft_dist_from_Reci1_mlat(a,i) = sqrt((Aircraft_position(a,i,1) -  
xc_Reci1_mlat)^2+(Aircraft_position(a,i,2) - yc_Reci1_mlat)^2);  
Aircraft_dist_from_Reci2_mlat(a,i) = sqrt((Aircraft_position(a,i,1) -  
xc_Reci2_mlat)^2+(Aircraft_position(a,i,2) - yc_Reci2_mlat)^2);  
Aircraft_dist_from_Reci3_mlat(a,i) = sqrt((Aircraft_position(a,i,1) -  
xc_Reci3_mlat)^2+(Aircraft_position(a,i,2) - yc_Reci3_mlat)^2);
```

Doba, za kterou se signál z letounu dostane k přijímačům:

```
toa_Reci1_mlat(a,i) = Aircraft_dist_from_Reci1_mlat(a,i)/c;  
toa_Reci2_mlat(a,i) = Aircraft_dist_from_Reci2_mlat(a,i)/c;  
toa_Reci3_mlat(a,i) = Aircraft_dist_from_Reci3_mlat(a,i)/c;
```

Aplikace vztahů, pro výpočet hyperbol a jejich řešení:

```
%      h1_Reci_mlat(a,i) = Aircraft_dist_from_Reci1_mlat(a,i) -
Aircraft_dist_from_Reci3_mlat(a,i);
%      h2_Reci_mlat(a,i) = Aircraft_dist_from_Reci2_mlat(a,i) -
Aircraft_dist_from_Reci3_mlat(a,i);
      h1_Reci_mlat(a,i) = (toa_Reci1_mlat(a,i) - toa_Reci3_mlat(a,i))*c;
      h2_Reci_mlat(a,i) = (toa_Reci2_mlat(a,i) - toa_Reci3_mlat(a,i))*c;

      L1 = xc_Reci1_mlat^2 + yc_Reci1_mlat^2 - xc_Reci3_mlat^2 - yc_Reci3_mlat^2;
      L2 = xc_Reci2_mlat^2 + yc_Reci2_mlat^2 - xc_Reci3_mlat^2 - yc_Reci3_mlat^2;

      a_mlat(a,i)=(h2_Reci_mlat(a,i)*(xc_Reci3_mlat-
xc_Reci1_mlat))+(h1_Reci_mlat(a,i)*(xc_Reci2_mlat-xc_Reci3_mlat));
      b_mlat(a,i)=(h2_Reci_mlat(a,i)*(yc_Reci3_mlat-
yc_Reci1_mlat))+(h1_Reci_mlat(a,i)*(yc_Reci2_mlat-yc_Reci3_mlat));
      c_mlat(a,i)=(((h2_Reci_mlat(a,i))*L1) -
(h2_Reci_mlat(a,i))*((h1_Reci_mlat(a,i))^2)) - ((h1_Reci_mlat(a,i))*L2) +
((h1_Reci_mlat(a,i))*((h2_Reci_mlat(a,i))^2)))/2;

      e_mlat(a,i) = -((a_mlat(a,i))/(b_mlat(a,i)));
      f_mlat(a,i) = -((c_mlat(a,i))/(b_mlat(a,i)));

      P_mlat(a,i) = 4*((h1_Reci_mlat(a,i))^2) * (1+(e_mlat(a,i))^2);
      Q_mlat(a,i) = 8*((h1_Reci_mlat(a,i))^2)*(-xc_Reci3_mlat +
((e_mlat(a,i))*(f_mlat(a,i))) - (e_mlat(a,i))*(yc_Reci3_mlat));
      R_mlat(a,i) = 4*((h1_Reci_mlat(a,i))^2) * ((xc_Reci3_mlat)^2 + (f_mlat(a,i))^2 +
(yc_Reci3_mlat)^2 - (2*(f_mlat(a,i))*(yc_Reci3_mlat)));
      M_mlat(a,i) = xc_Reci3_mlat - xc_Reci1_mlat + ((e_mlat(a,i))*(yc_Reci3_mlat-
yc_Reci1_mlat));
      N_mlat(a,i) = (2*(f_mlat(a,i))*(yc_Reci3_mlat-yc_Reci1_mlat)) + L1 -
((h1_Reci_mlat(a,i))^2);

      A_mlat(a,i) = 4*((M_mlat(a,i))^2) - P_mlat(a,i);
      B_mlat(a,i) = (4*(M_mlat(a,i))*(N_mlat(a,i))) - Q_mlat(a,i);
      C_mlat(a,i) = ((N_mlat(a,i))^2) - R_mlat(a,i);
```

Řešení kvadratických rovnic, nalezení obou kořenů funkce a přidání šumu:

```
x1_mlat(a,i)=(-B_mlat(a,i)+(sqrt(((B_mlat(a,i))^2)-
4*(A_mlat(a,i))*(C_mlat(a,i)))))/(2*(A_mlat(a,i)));
x2_mlat(a,i)=(-B_mlat(a,i)-(sqrt(((B_mlat(a,i))^2)-
4*(A_mlat(a,i))*(C_mlat(a,i)))))/(2*(A_mlat(a,i)));

x1_mlat(a,i) = awgn(x1_mlat(a,i),SNR,'measured');
x2_mlat(a,i) = awgn(x2_mlat(a,i),SNR,'measured');

y1_mlat(a,i)=((e_mlat(a,i))*(x1_mlat(a,i))) + f_mlat(a,i);
y2_mlat(a,i)=((e_mlat(a,i))*(x2_mlat(a,i))) + f_mlat(a,i);

y1_mlat(a,i) = awgn(y1_mlat(a,i),SNR,'measured');
y2_mlat(a,i) = awgn(y2_mlat(a,i),SNR,'measured');
```

Porovnání výsledků se systémem AoA/SS:

```
%.....Data fusion AoA & TDoA hyperbolic method to filter incorrect co-ordinates.....
if abs(Delta_AoAx_TDoA_x2(a,i)) >= 100
    Aircraft_position_X(a,i) = x1_mlat(a,i);
else
    Aircraft_position_X(a,i) = x2_mlat(a,i);
```

```

end
if abs(Delta_AoAy_TDoA_y2(a,i)) >= 100
    Aircraft_position_Y(a,i) = y1_mlat(a,i);
else
    Aircraft_position_Y(a,i) = y2_mlat(a,i);
end

```

Odchylka mezi skutečnou polohou a polohou z metody TDoA hyperbolické

```

delta_position_error_Hyperx(a,i) = Aircraft_position(a,i,1) -
Aircraft_position_X(a,i);
delta_position_error_Hypery(a,i) = Aircraft_position(a,i,2) -
Aircraft_position_Y(a,i);

```

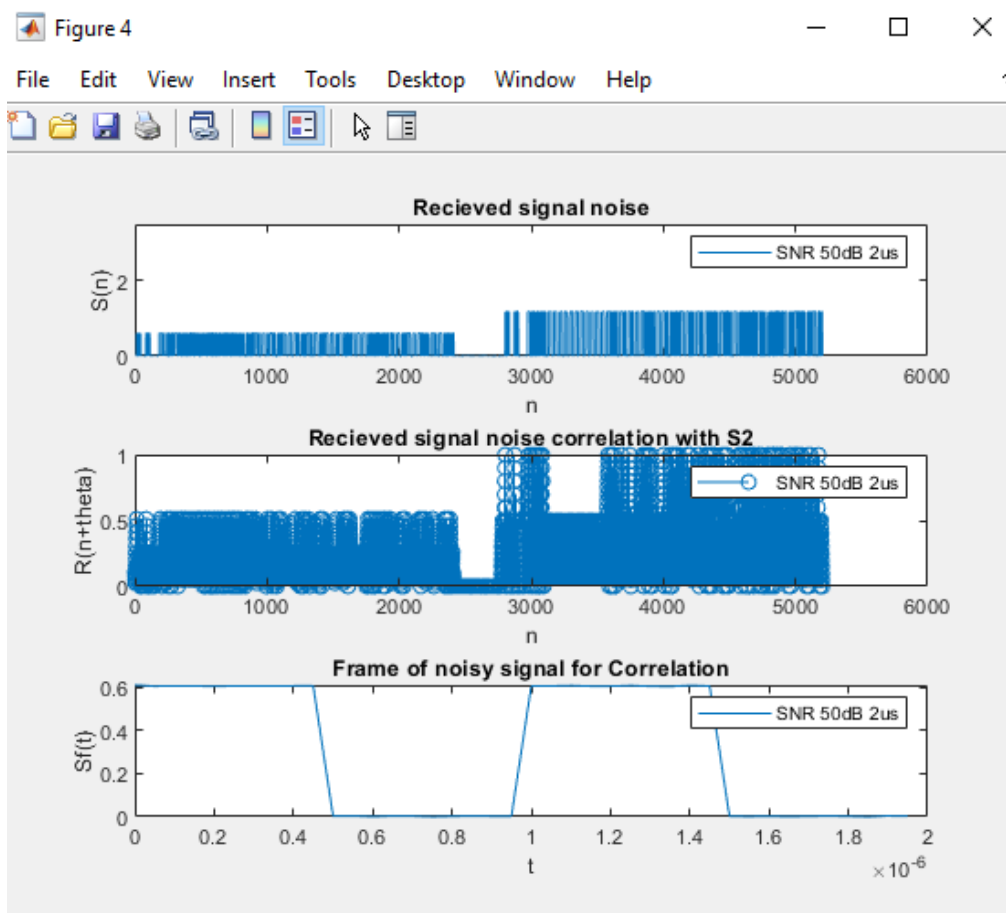
Pokud se výsledek shoduje s AoA/SS, je tak vybráno správné řešení kvadratické rovnice pro souřadnici x a y. V praxi by tedy mohl být použit hybridní systém AoA/SS/TDoA pro kontrolu výsledků hyperbolické 2-D metody, nebo by se správné řešení našlo dekodováním ADS-B, respektive jeho datové části, kde je polohová informace uložena. Tato kombinace s dekodováním zprávy by vedla ke zvýšení robustnosti systému, respektive k zajištění zdroje informací z více datových zdrojů.

Kapitola 6

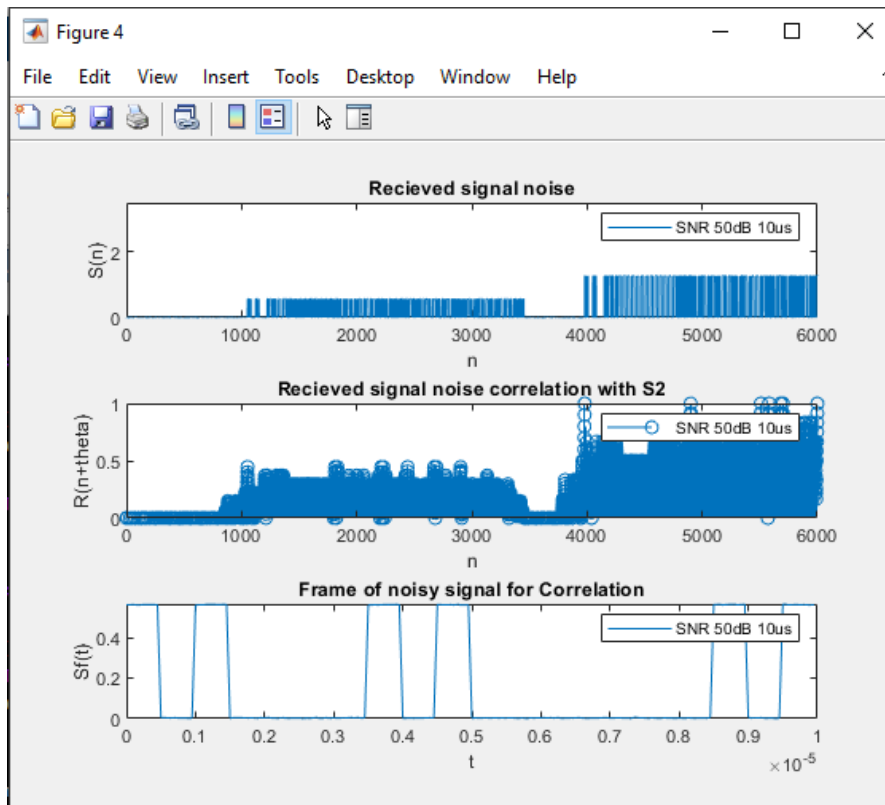
6) Výsledky simulace

V této kapitole jsou prezentovány výsledky simulací dílčích problémů spojených s MLAT.

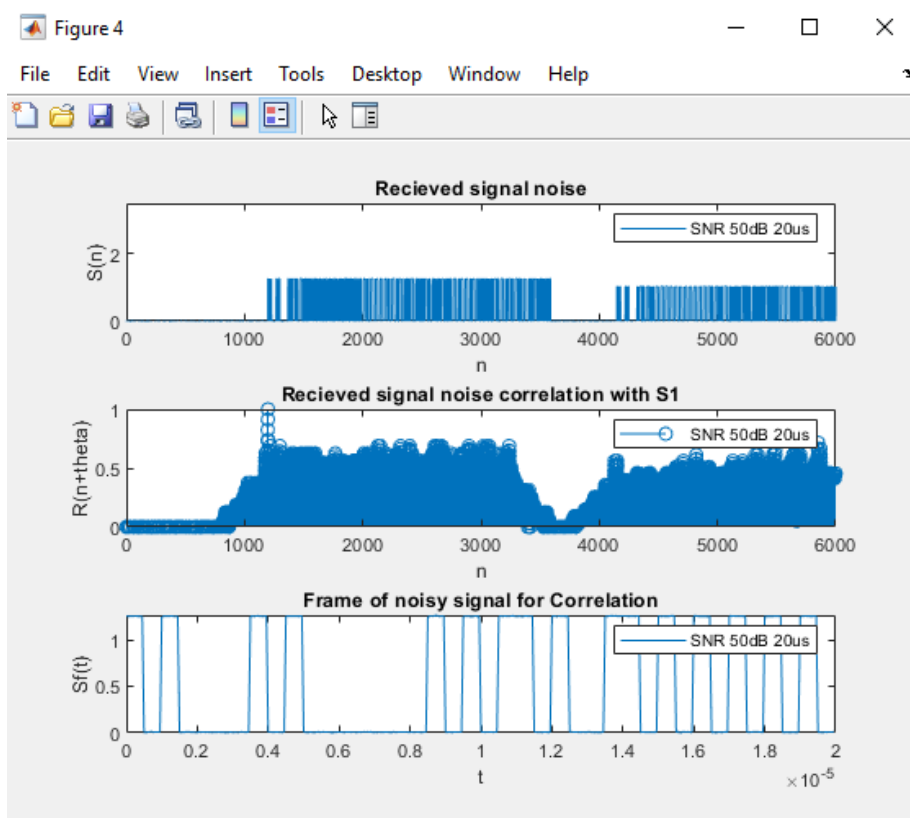
6.1) Rozlišení ADS-B pomocí korelací



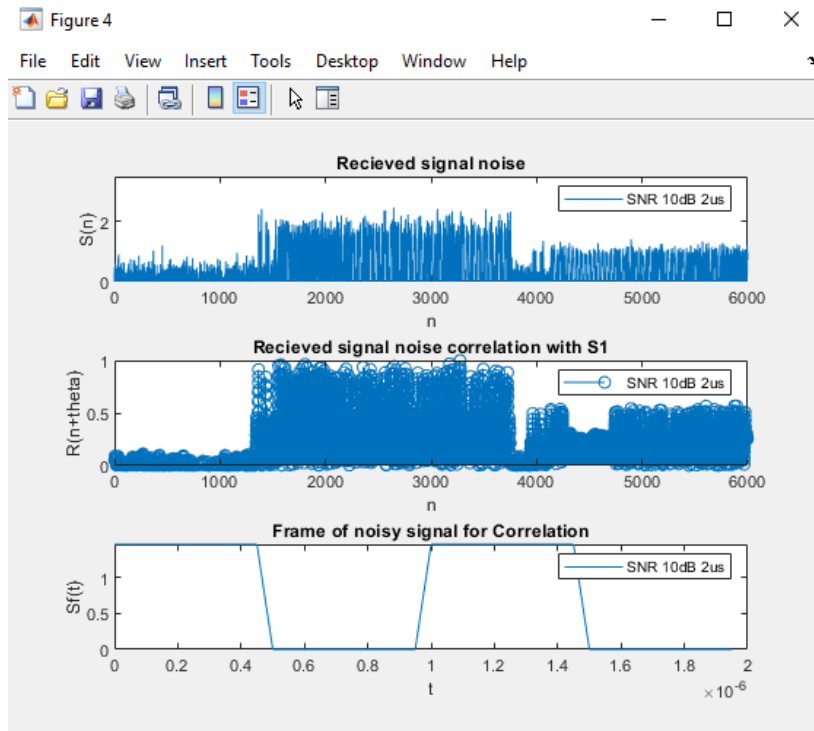
Obrázek 6.1: Korelace signálu SNR 50, 72 maxim



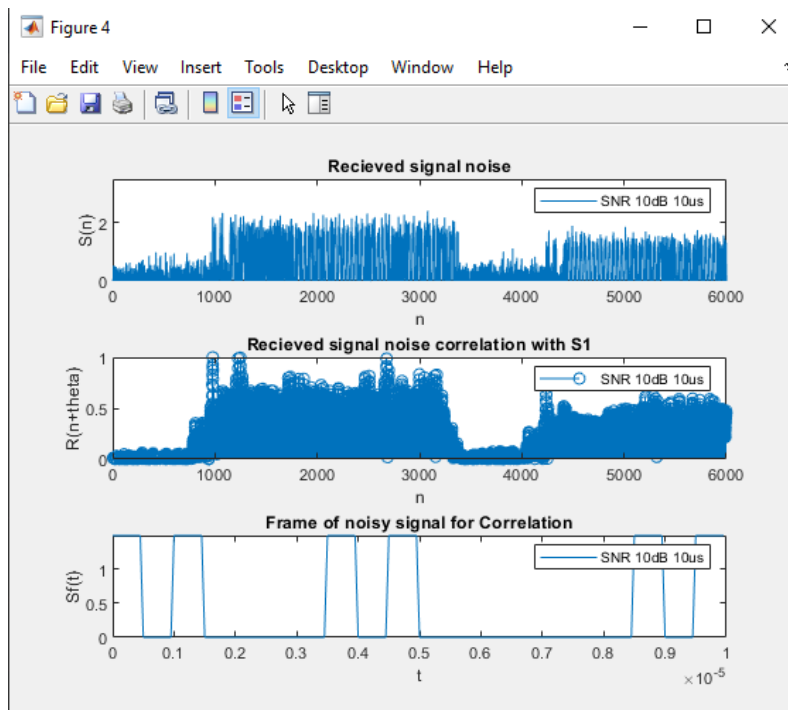
Obrázek 6.2: Korelace signálu SNR 50, 9 maxim



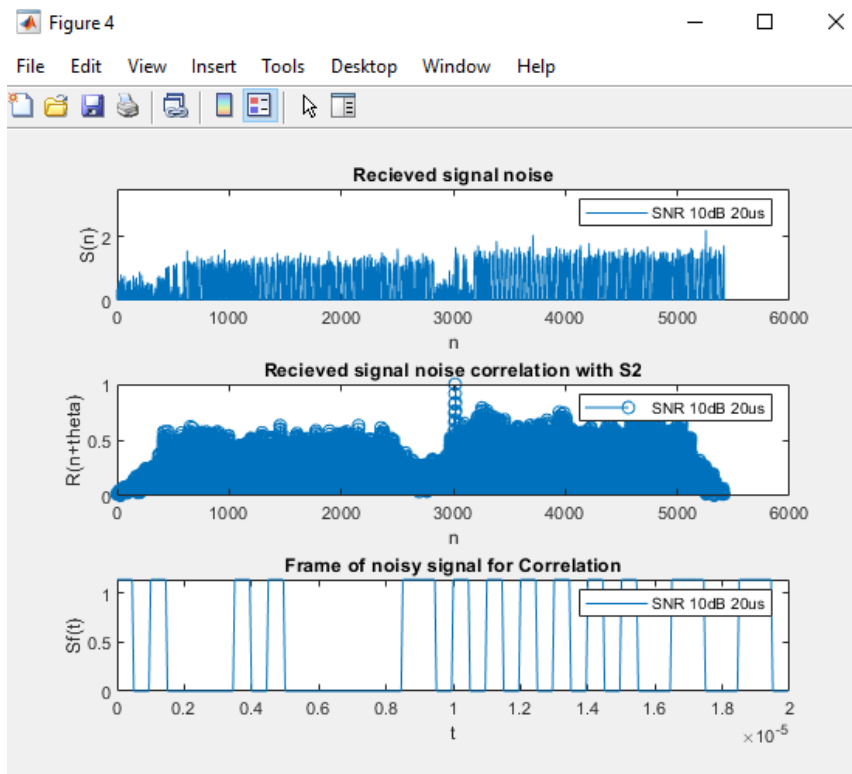
Obrázek 6.3: Korelace signálu SNR 50, 1 maxim



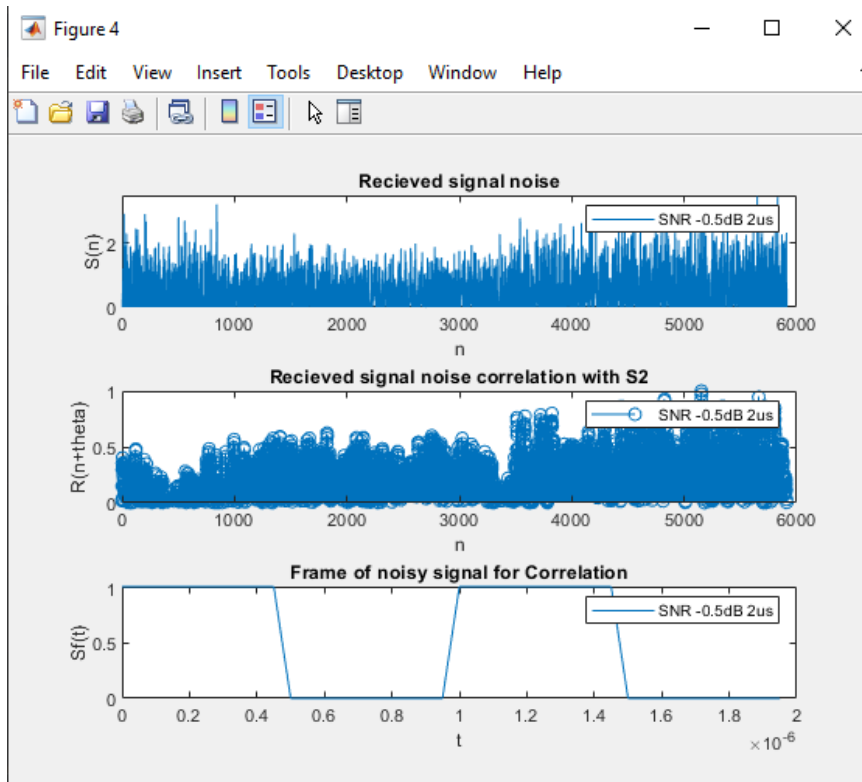
Obrázek 6.4: Korelace signálu SNR 10, 16 maxim



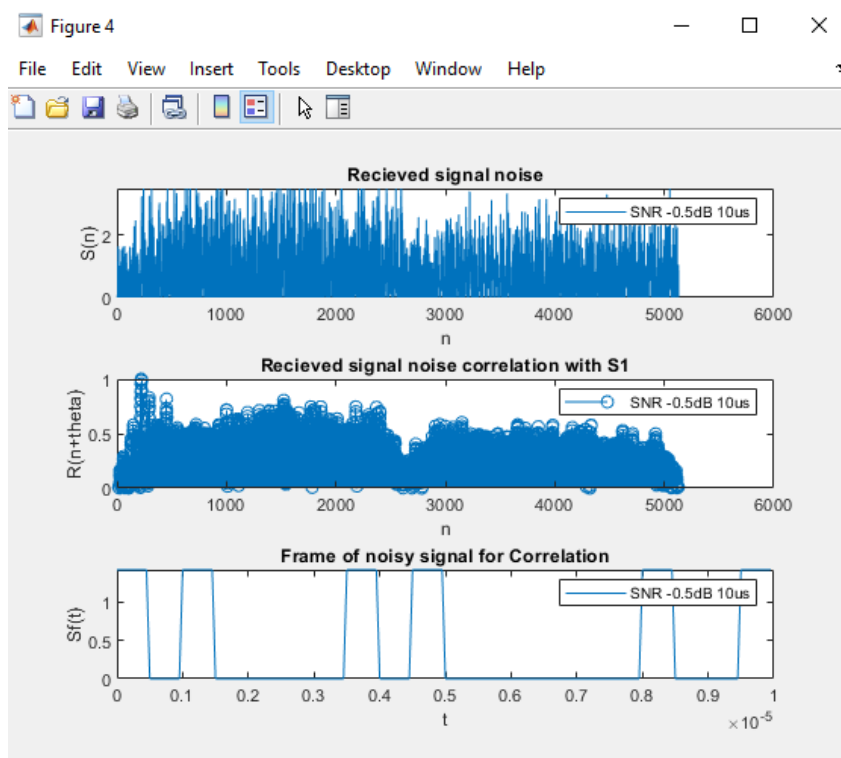
Obrázek 6.5: Korelace signálu SNR 10, 5 maxim



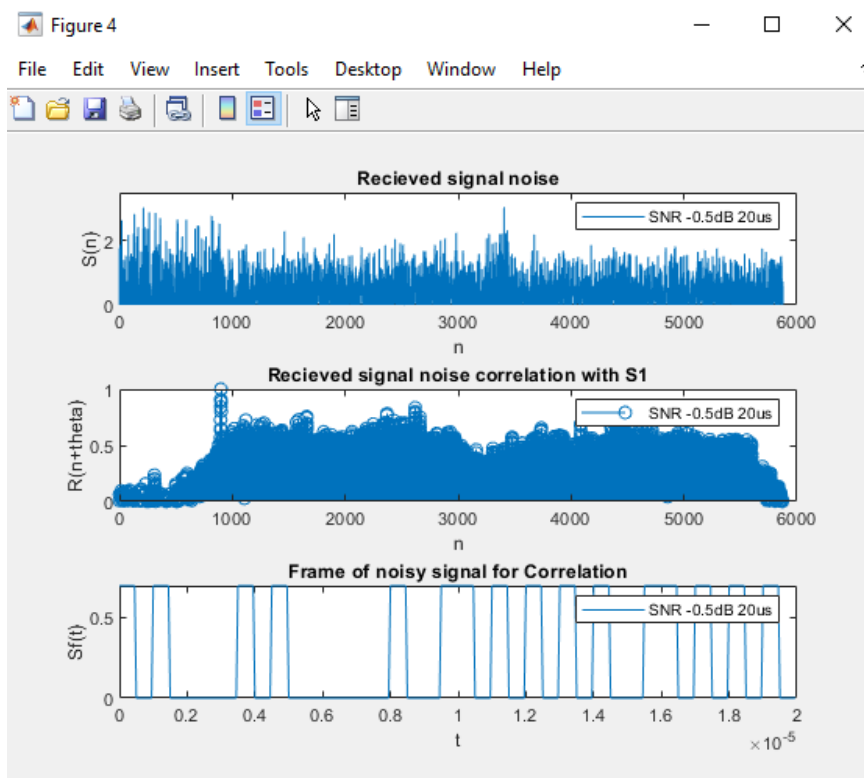
Obrázek 6.6: Korelace signálu SNR 10, 1 maxim



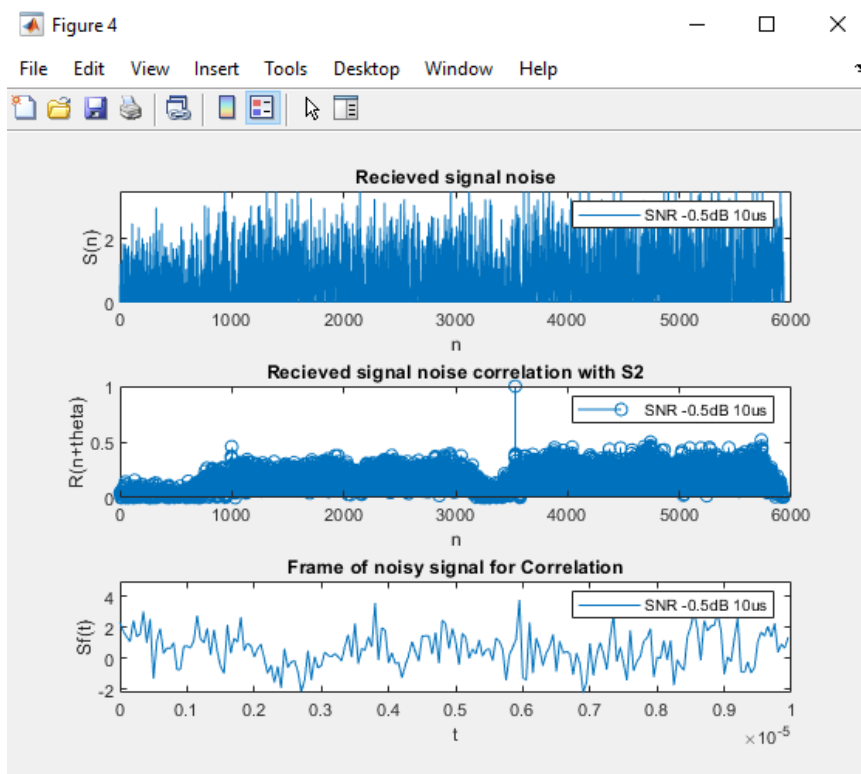
Obrázek 6.7: Korelace signálu SNR -0,5, 2 maxim



Obrázek 6.8: Korelace signálu SNR -0,5, 1 maxim



Obrázek 6.9: Korelace signálu SNR -0,5, 1 maxim

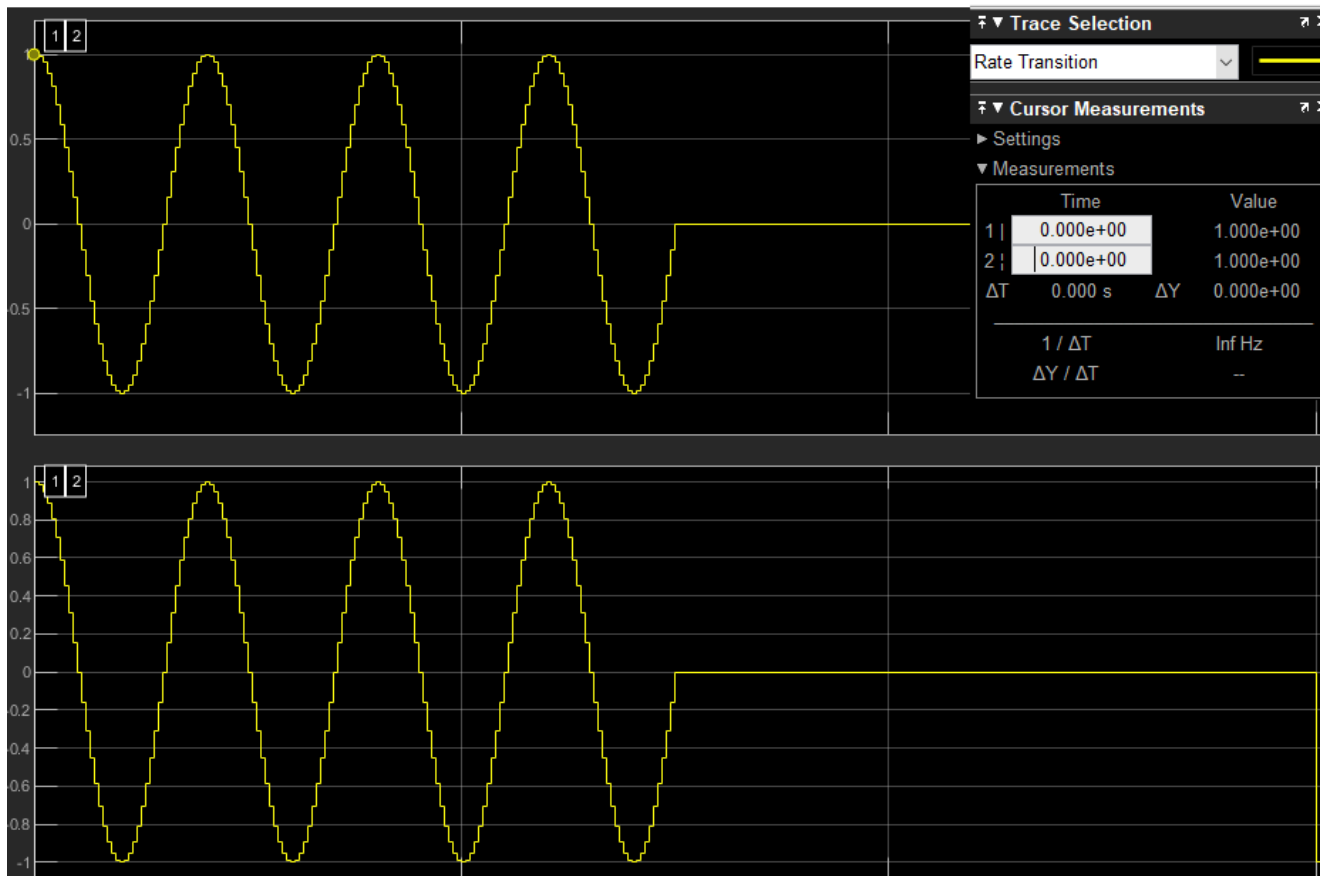


Obrázek 6.10: Korelace signálu SNR -0,5, 1 maxim, zašuměná replika ADS-B signálu

6.2) Měření úhlů a TDoA

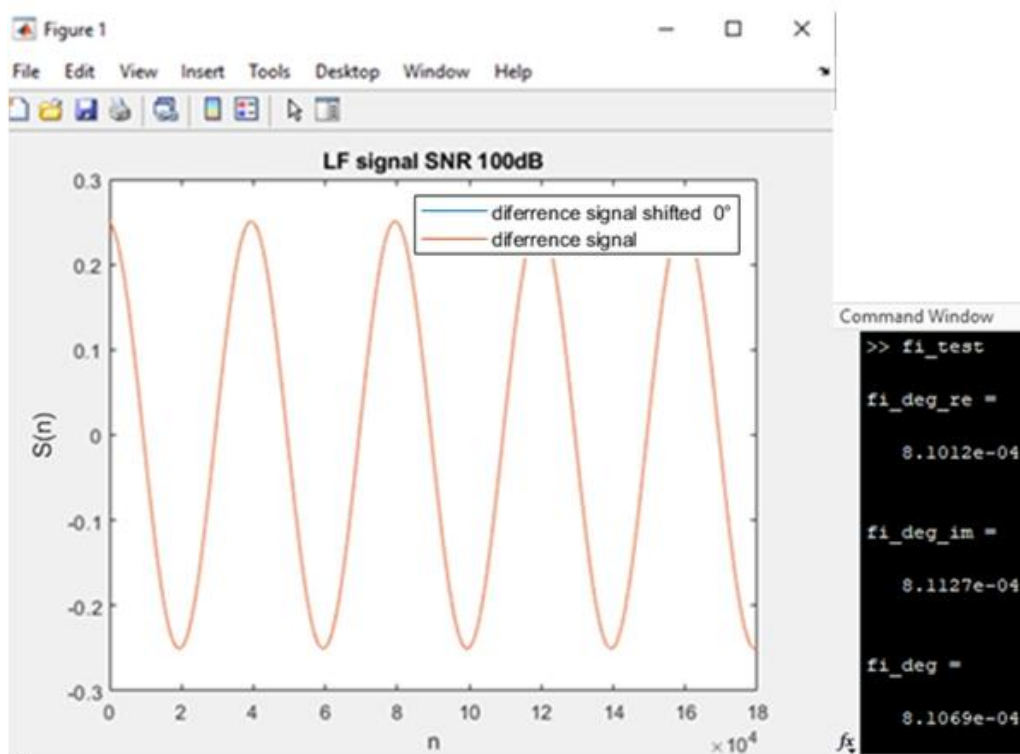
a) Ideální periodický obdélníkový signál

Posuv modulovaného signálu: úhel $\alpha_m 0^\circ \rightarrow$ TDoA 0ns

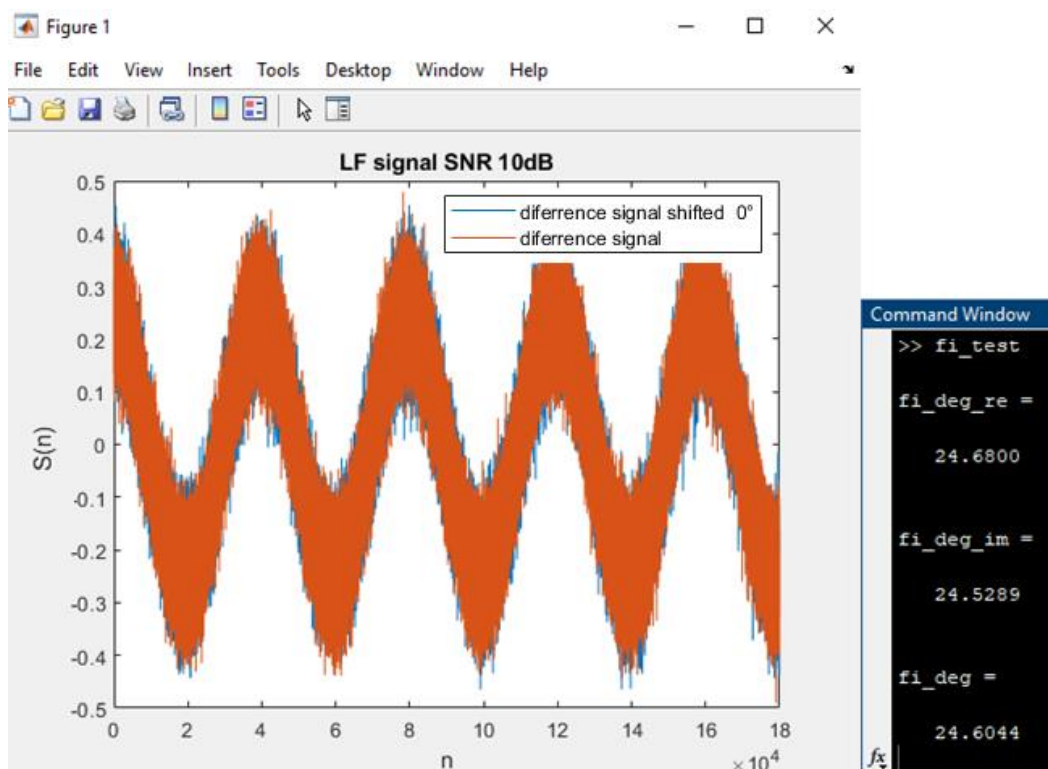


Obrázek 6.11: Modulovaný obdélníkový periodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B, posuv 0°

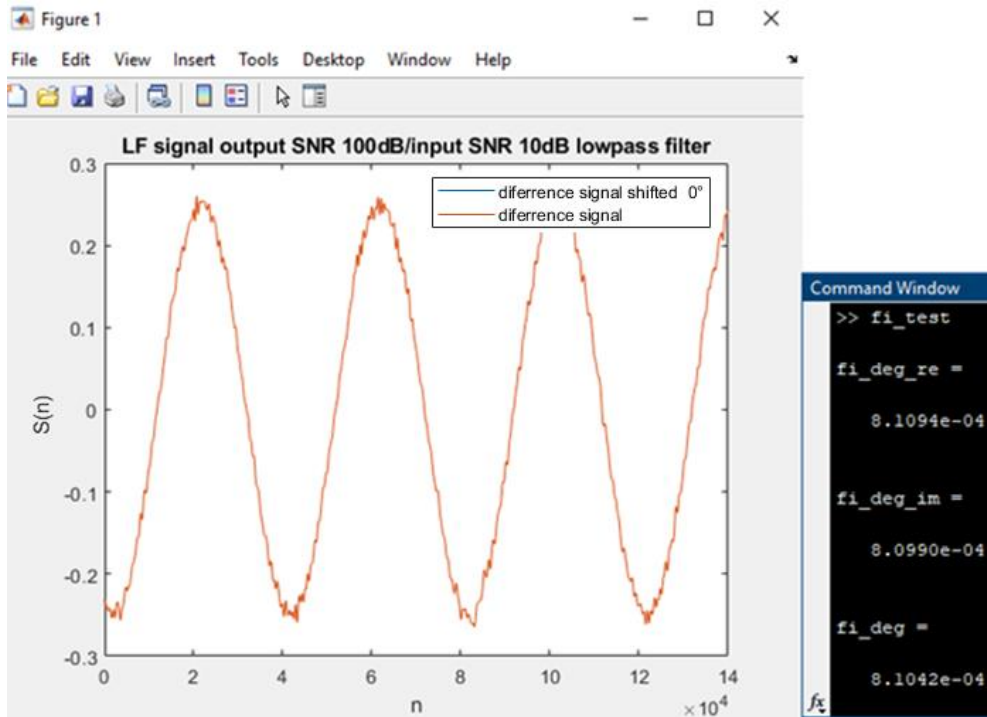
Posuv rozdílového signálu: úhel $\alpha_m 0^\circ \rightarrow \text{delta_t_lf} = 0$ us



Obrázek 6.12: Rozdílový signál po směšování 0°

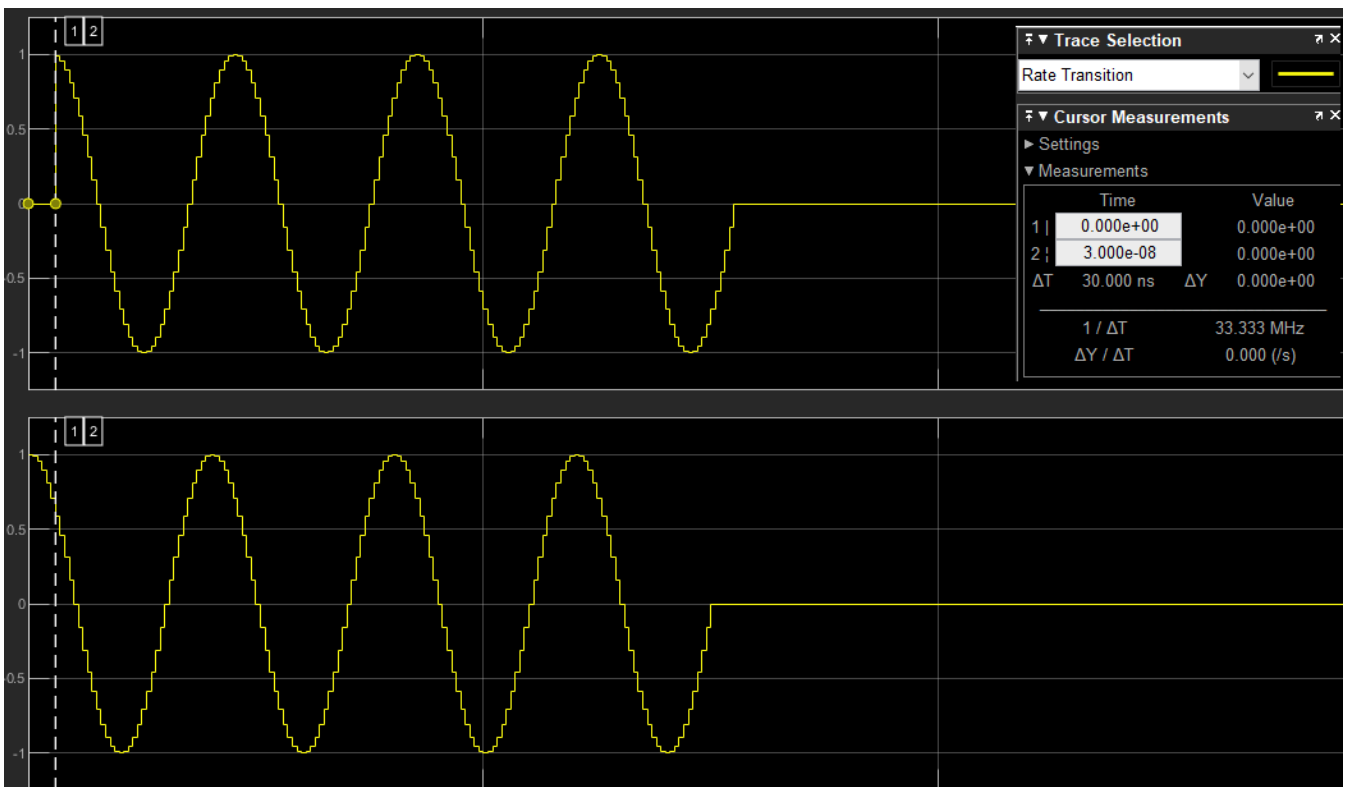


Obrázek 6.13: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 0°



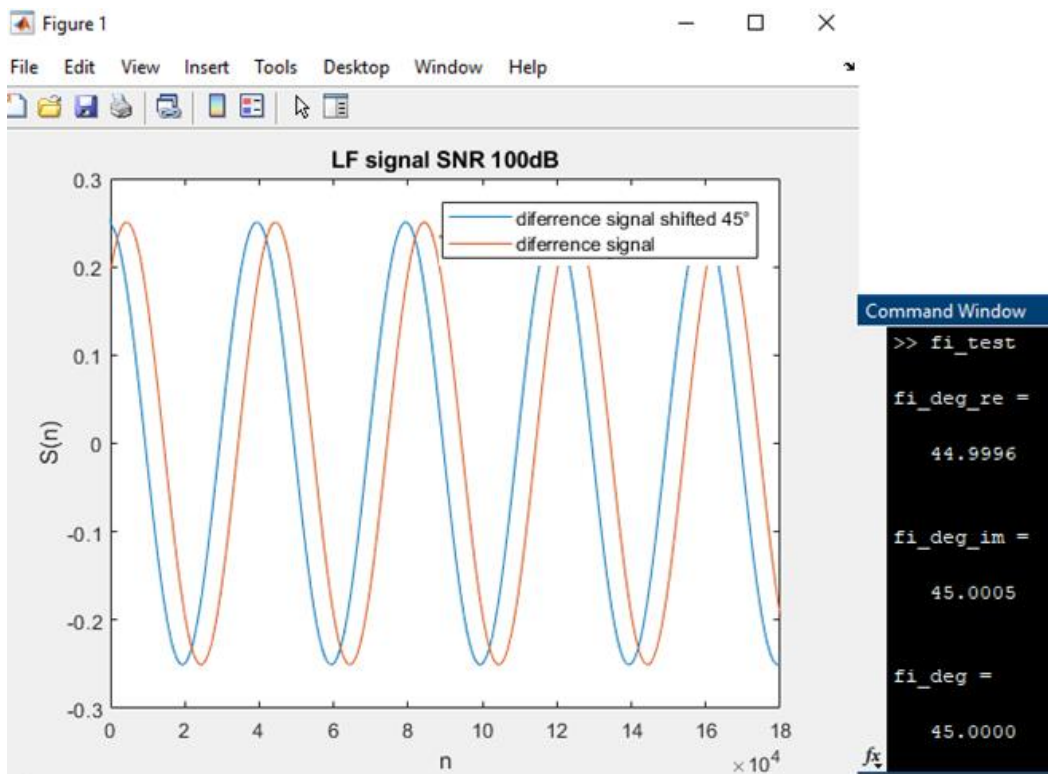
Obrázek 6.14: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 0°

Posuv modulovaného signálu: úhel $\alpha_m 45^\circ \rightarrow$ TDoA 25ns

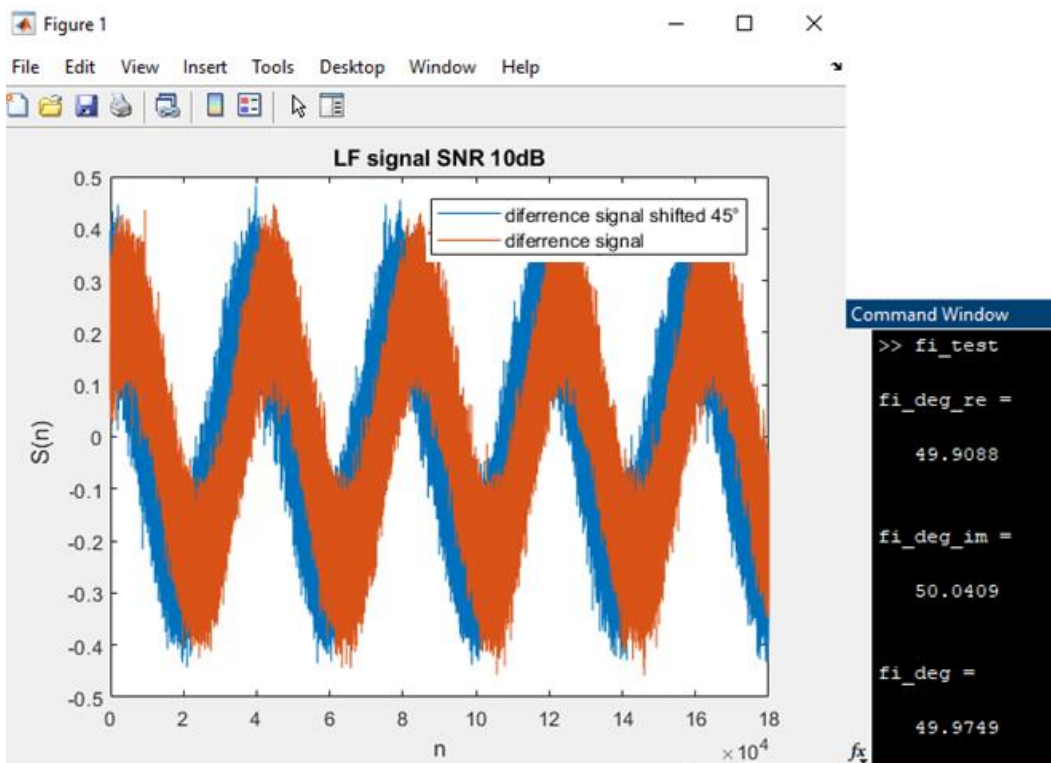


Obrázek 6.15: Modulovaný obdélníkový periodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B, posuv 45°

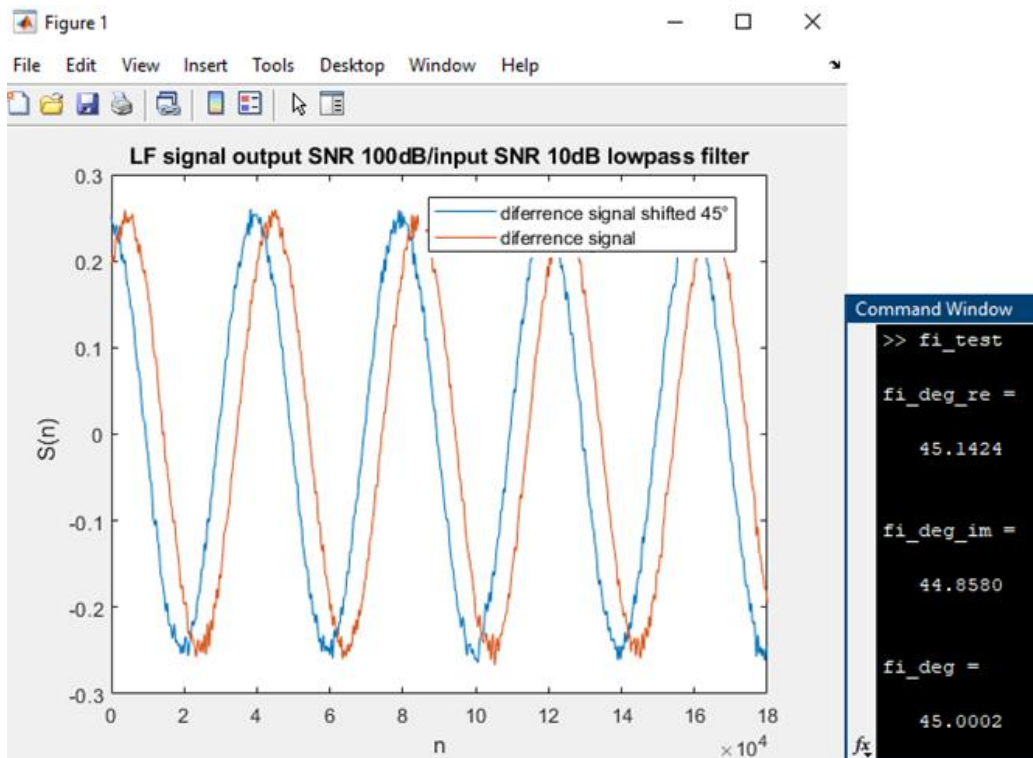
Posuv rozdílového signálu signálu: úhel α_m 45° -> delta_t_Lf = 25us



Obrázek 6.16: Rozdílový signál po směšování 45°

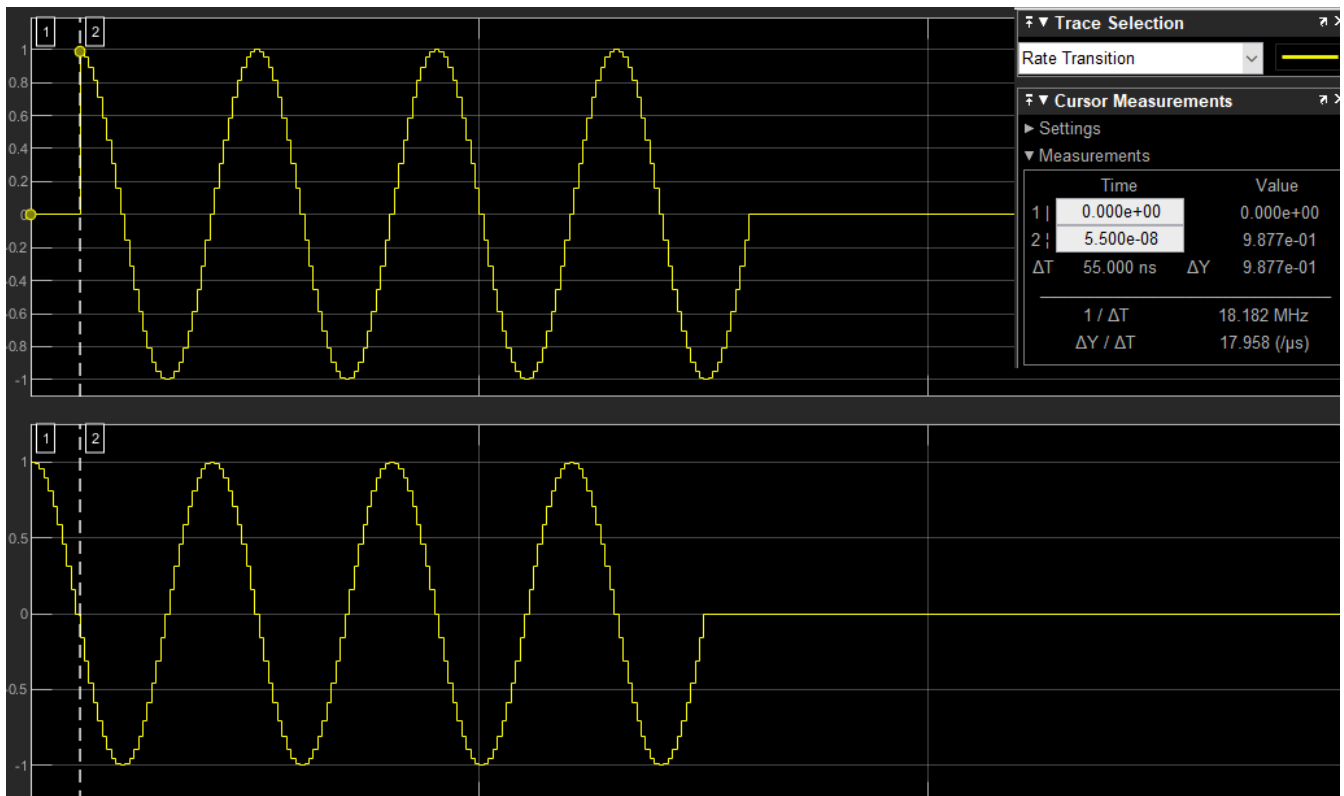


Obrázek 6.17: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 45°



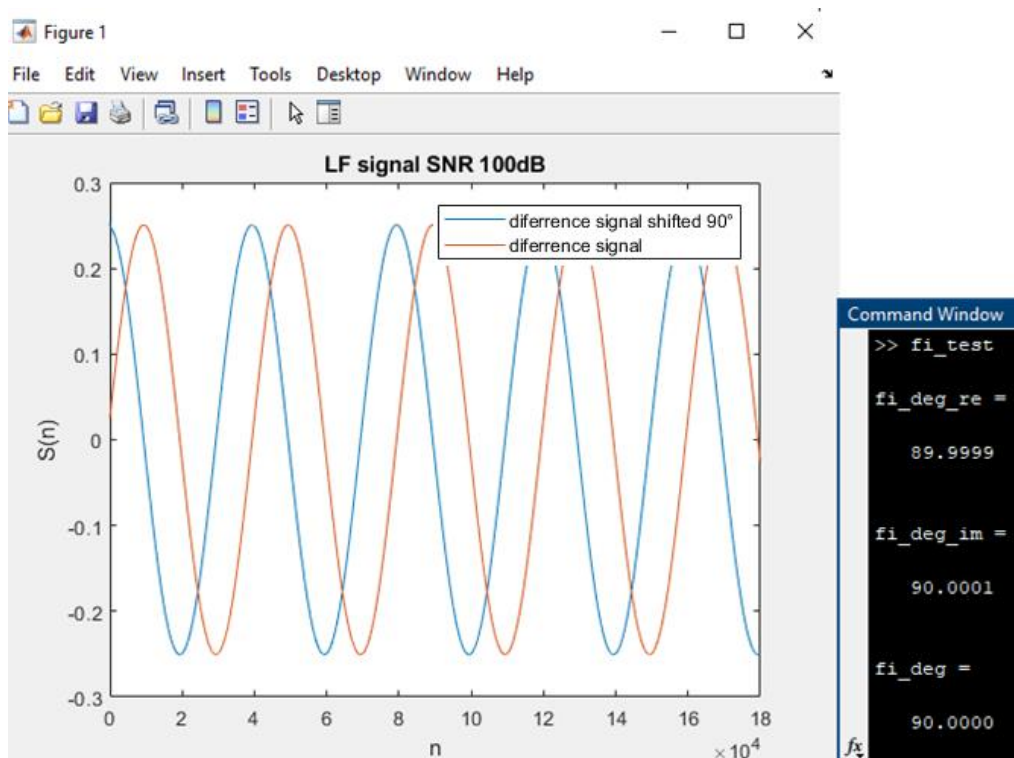
Obrázek 6.18: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 45°

Posuv modulovaného signálu: úhel α_m 90° -> TDoA 50ns

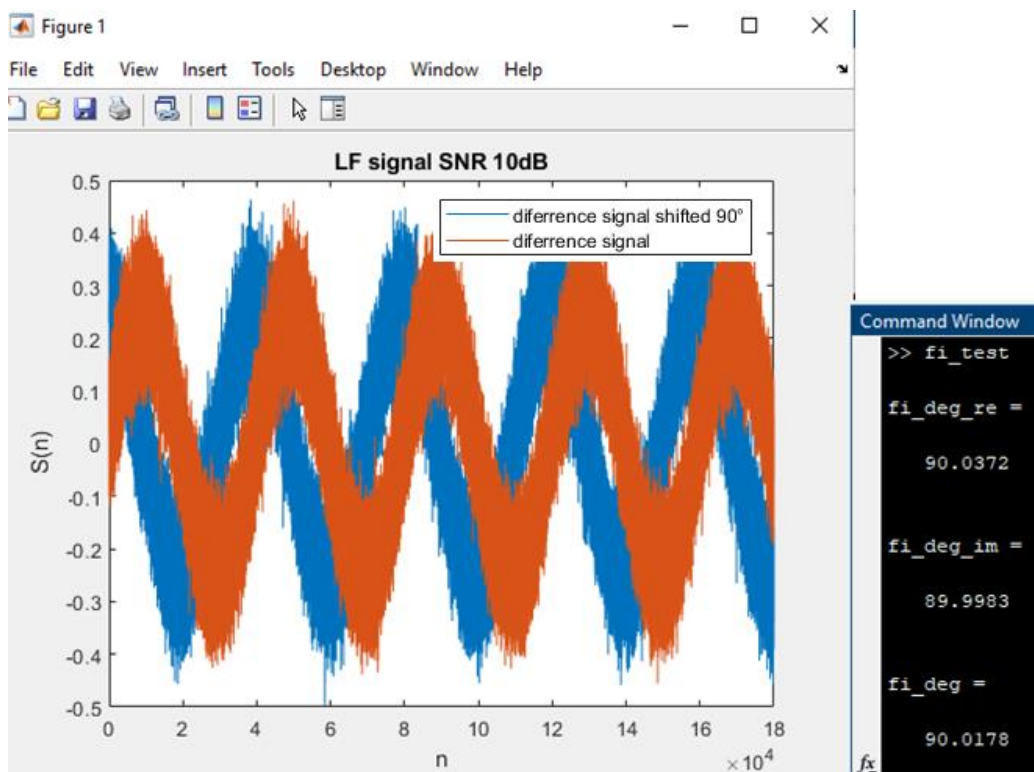


Obrázek 6.19 Modulovaný obdélníkový periodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B, posuv 90°

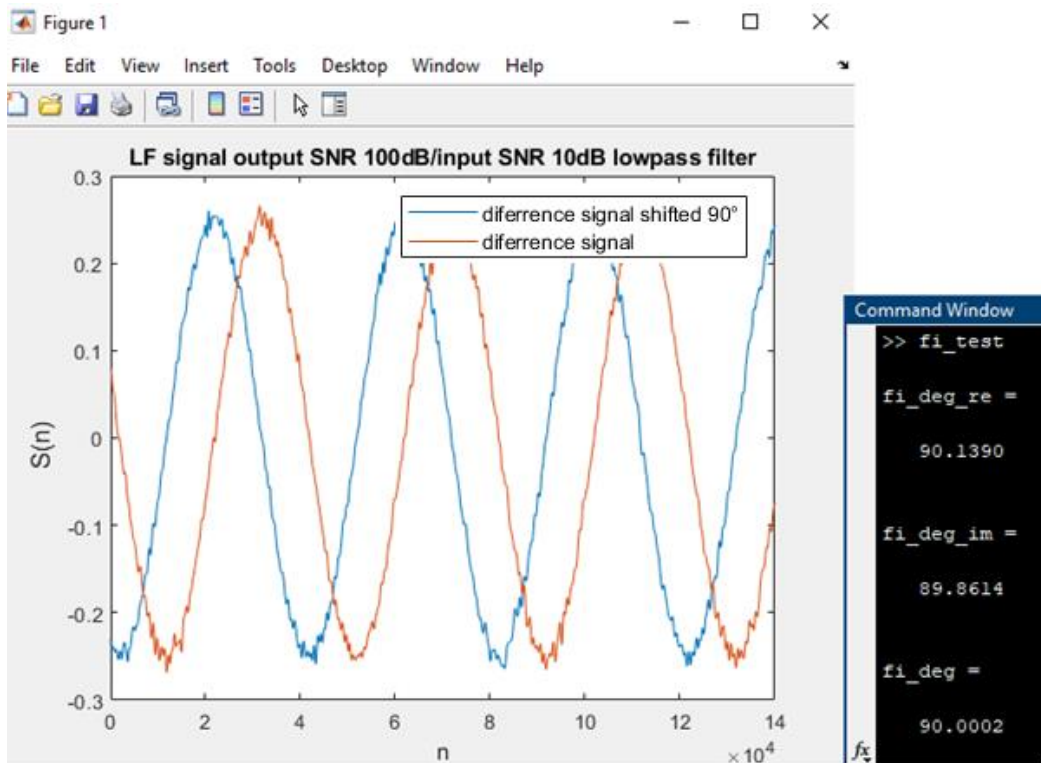
Posuv rozdílového signálu: úhel α_m 90°



Obrázek 6.20: Rozdílový signál po směšování 90°

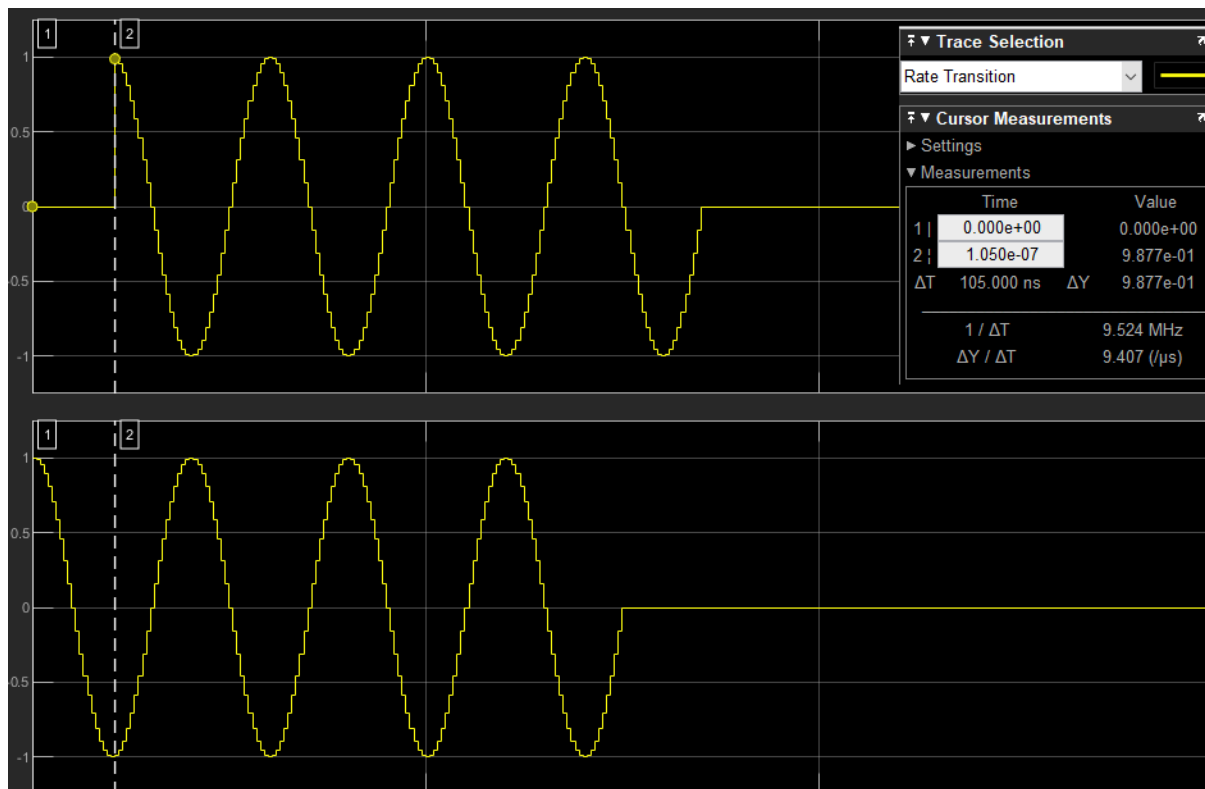


Obrázek 6.21: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 90°



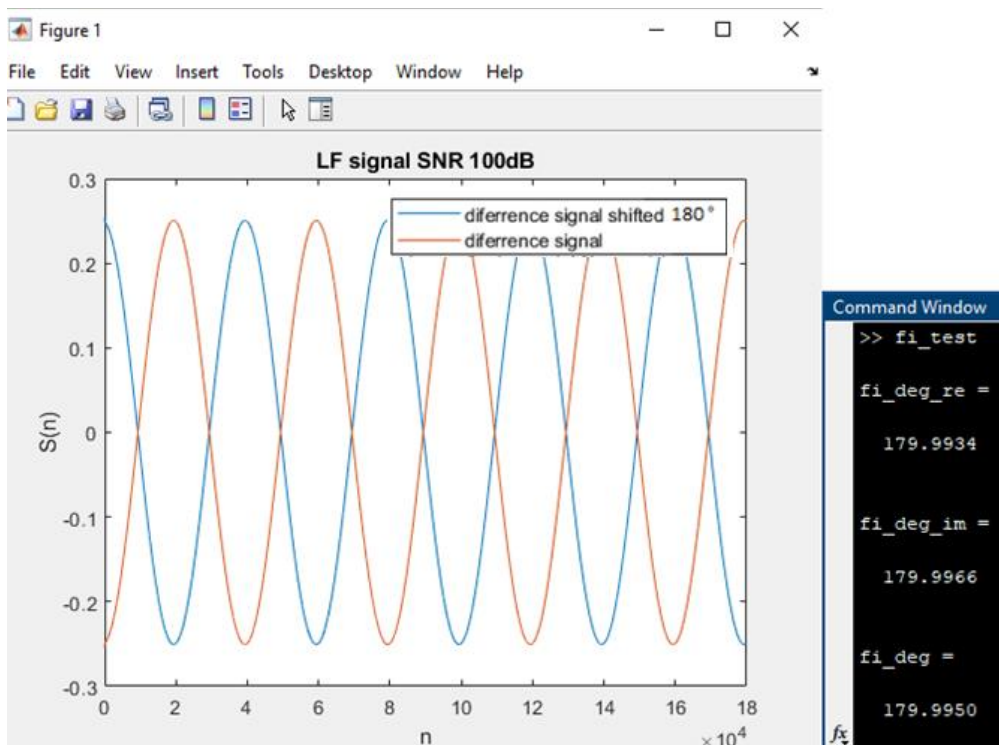
Obrázek 6.22: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 90°

Posuv modulovaného signálu: úhel α_m 180° -> TDoA 100ns

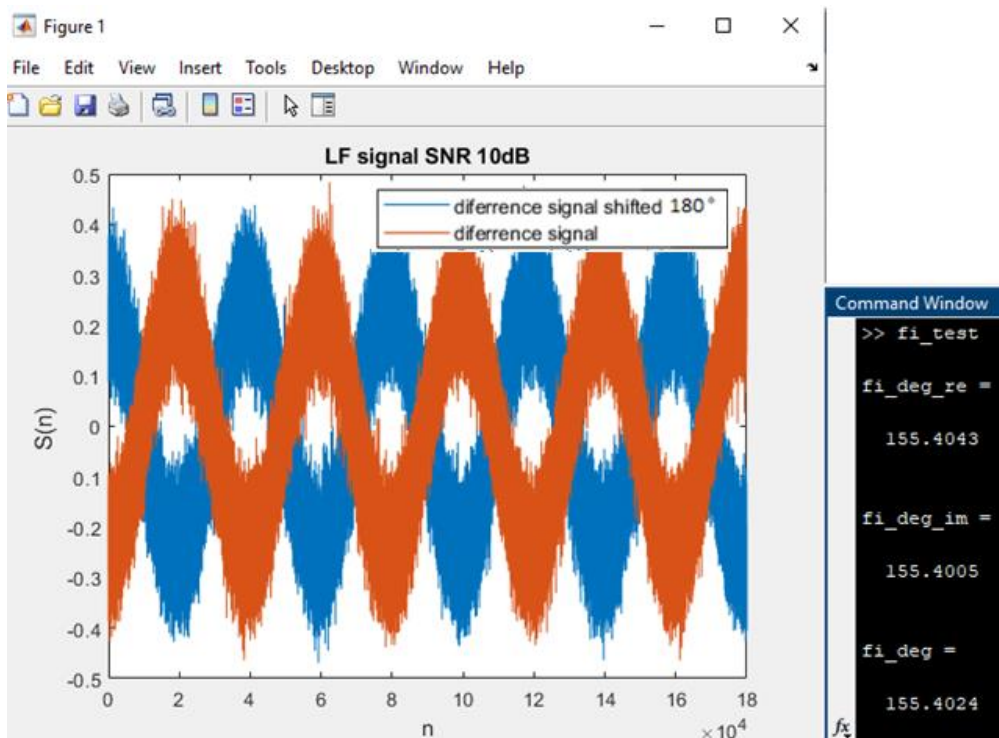


Obrázek 6.23 Modulovaný obdélníkový periodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B, posuv 180°

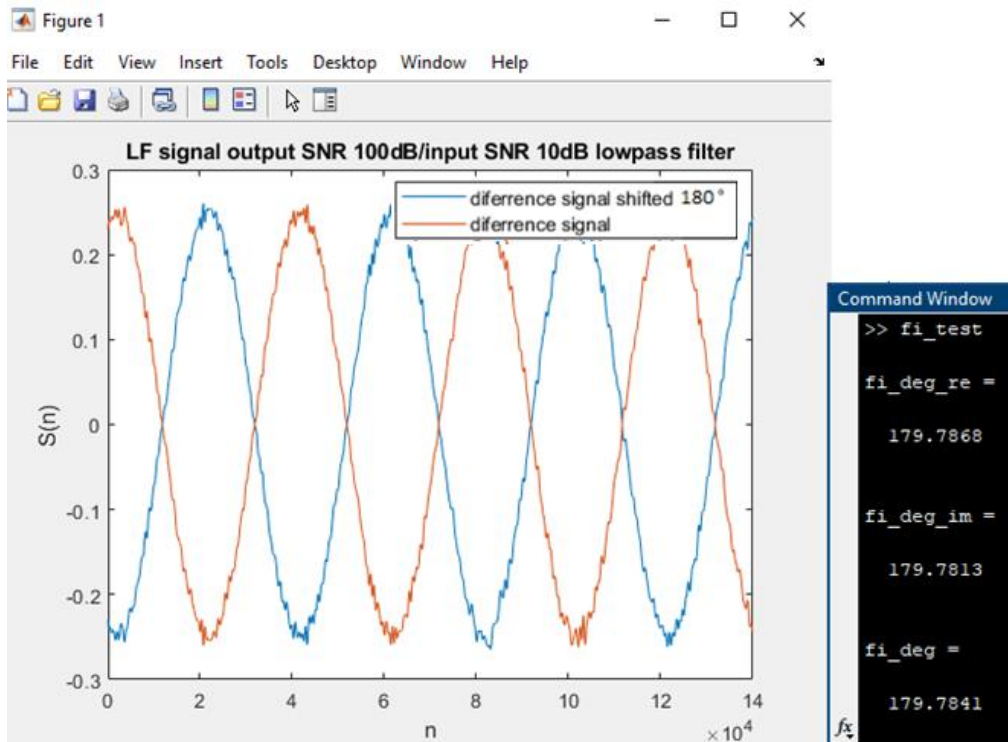
Posuv rozdílového signálu: úhel α_m $180^\circ \rightarrow 100\mu\text{s}$



Obrázek 6.24: Rozdílový signál po směšování 180°



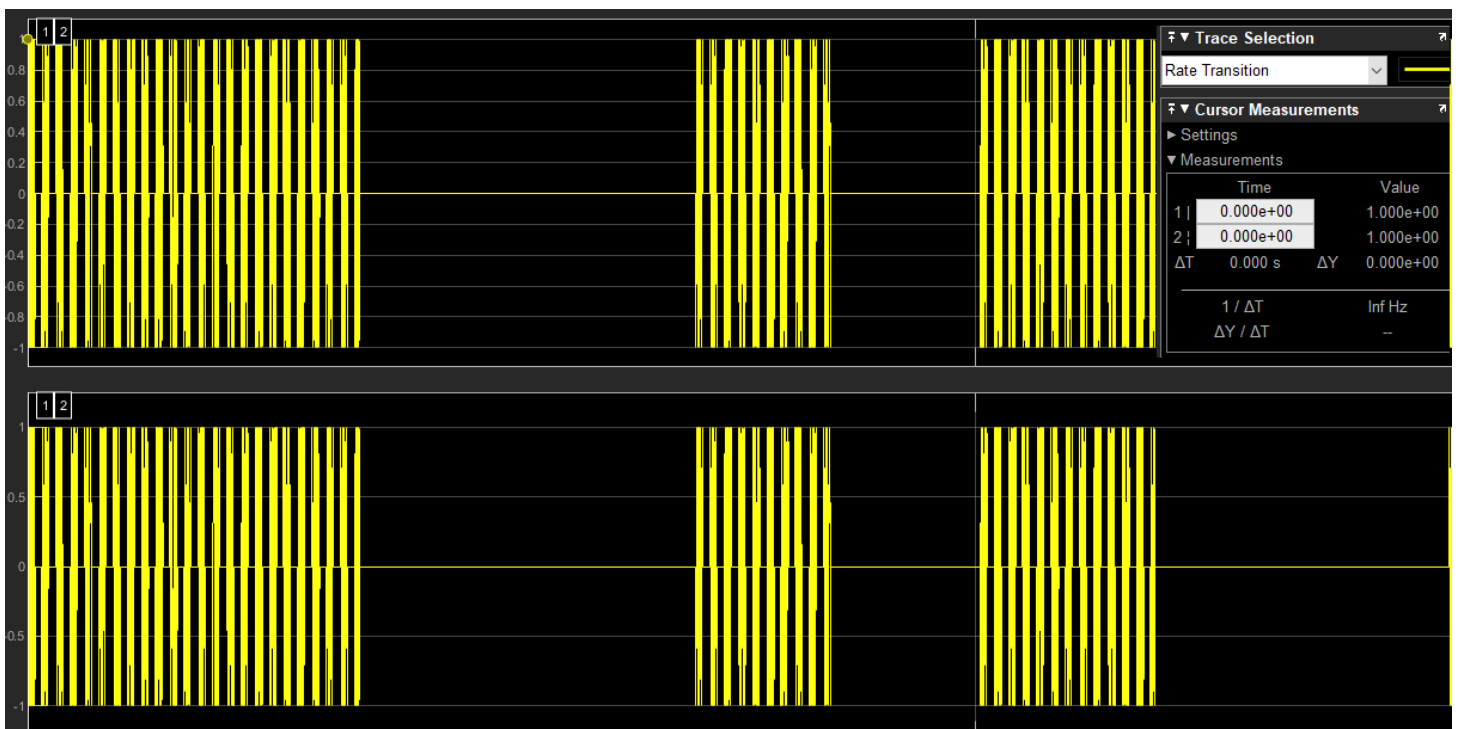
Obrázek 6.25: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 180°



Obrázek 6.26: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 180°

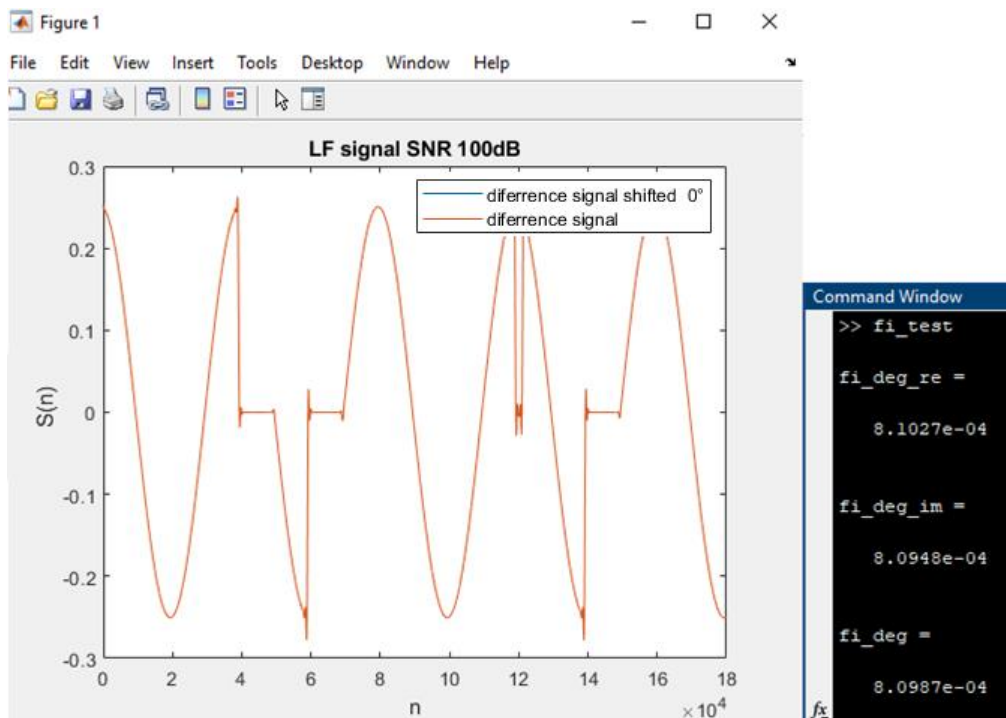
b) Neideální obdélníkový signálu, vliv symbolu 0:

Posuv modulovaného signálu: úhel $\alpha_m 0^\circ \rightarrow$ TDoA 0ns

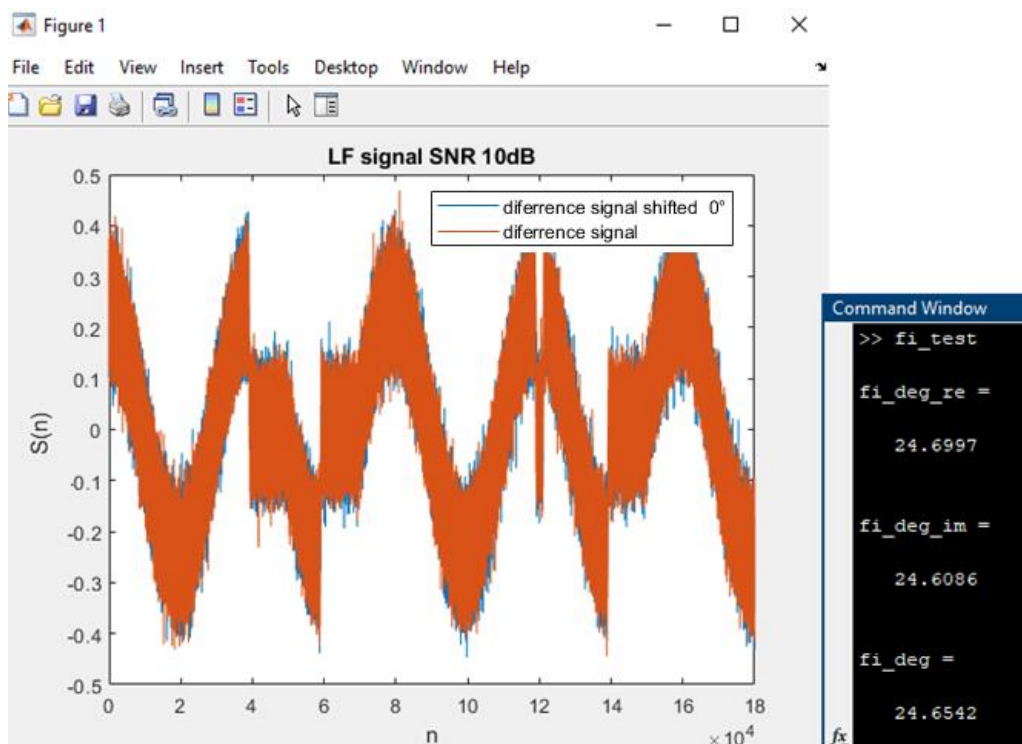


Obrázek 6.27: Modulovaný obdélníkový neperiodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B, posuv 0°

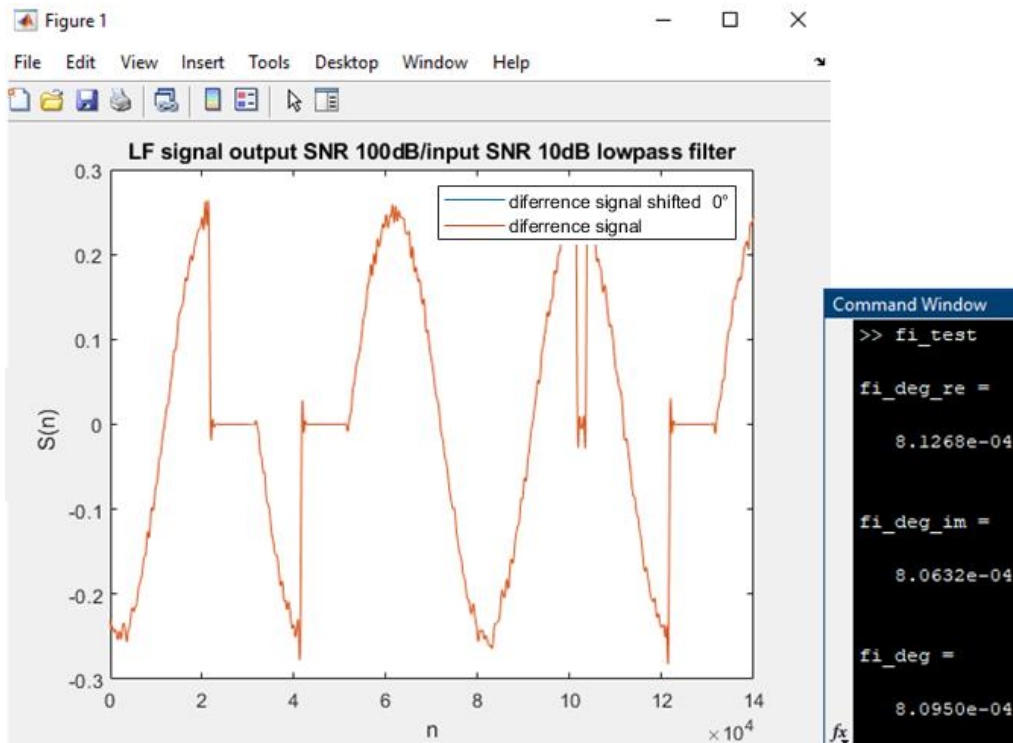
Posuv rozdílového signálu: úhel $\alpha_m 0^\circ \rightarrow 0$ us



Obrázek 6.28: Rozdílový signál po směšování 0° symbol 0

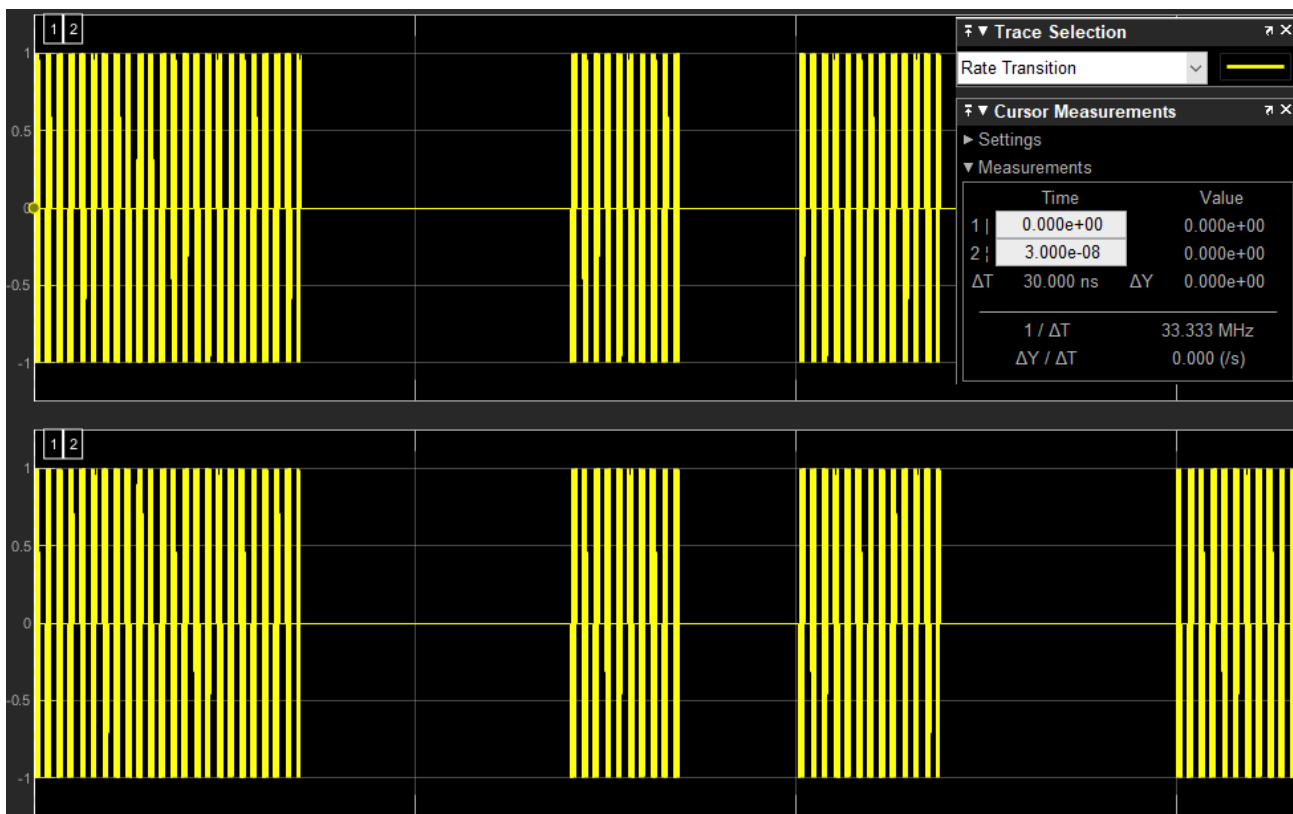


Obrázek 6.29: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 0° symbol 0



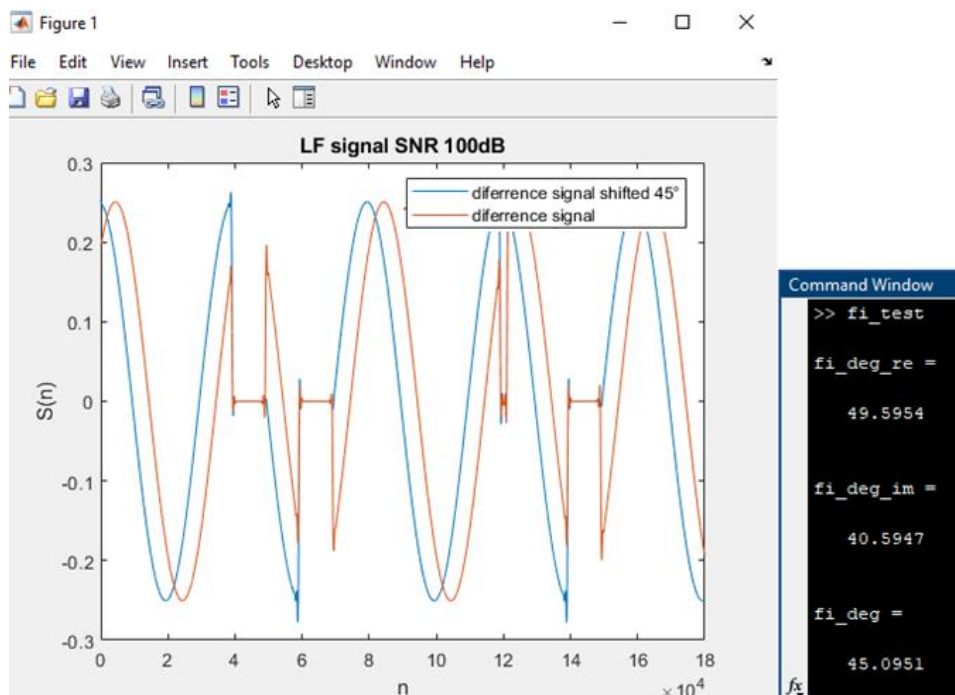
Obrázek 6.30: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 0° symbol 0

Posuv modulovaného signálu: úhel $\alpha_m 45^\circ \rightarrow$ TDoA 25ns

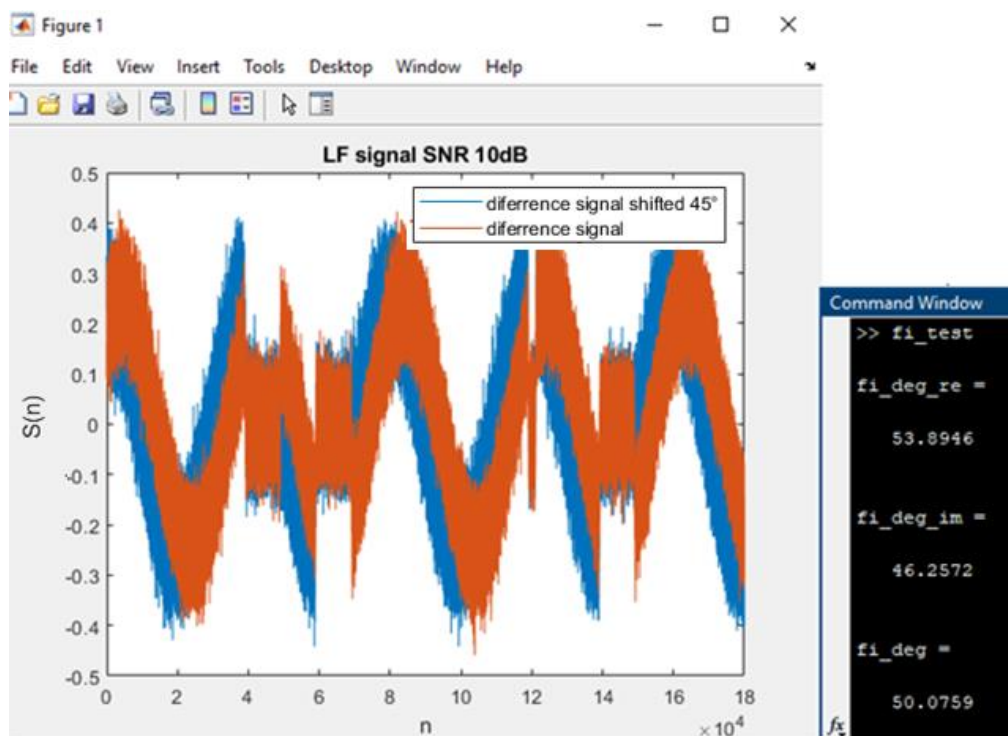


Obrázek 6.31: Modulovaný obdélkový neperiodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B, posuv 45°

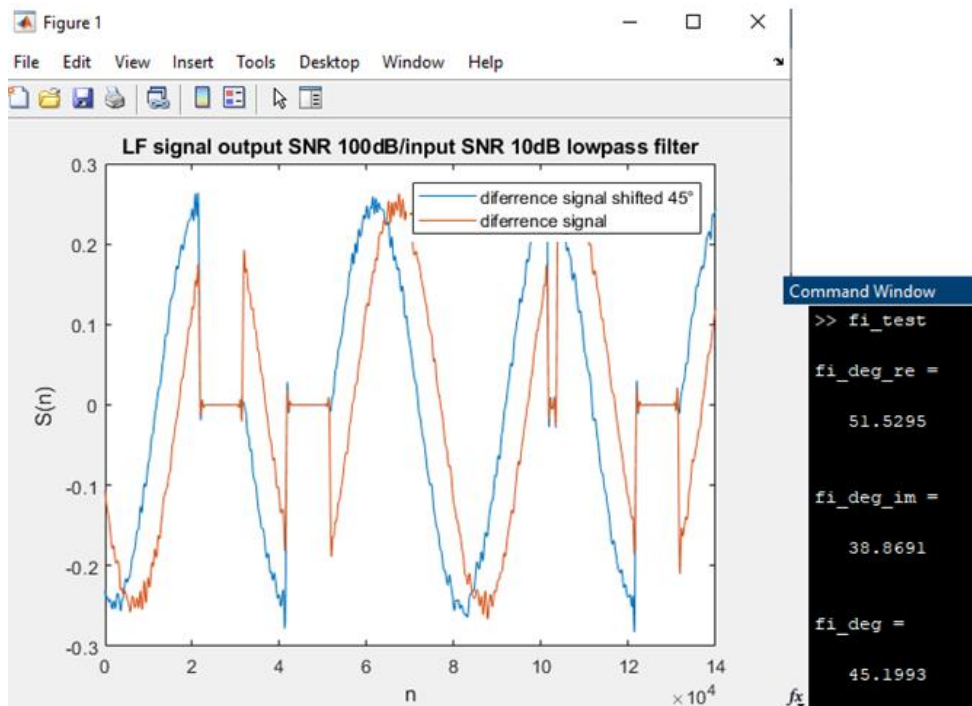
Posuv rozdílového signálu: úhel α_m $45^\circ \rightarrow 25\mu s$



Obrázek 6.32: Rozdílový signál po směšování 45° symbol 0

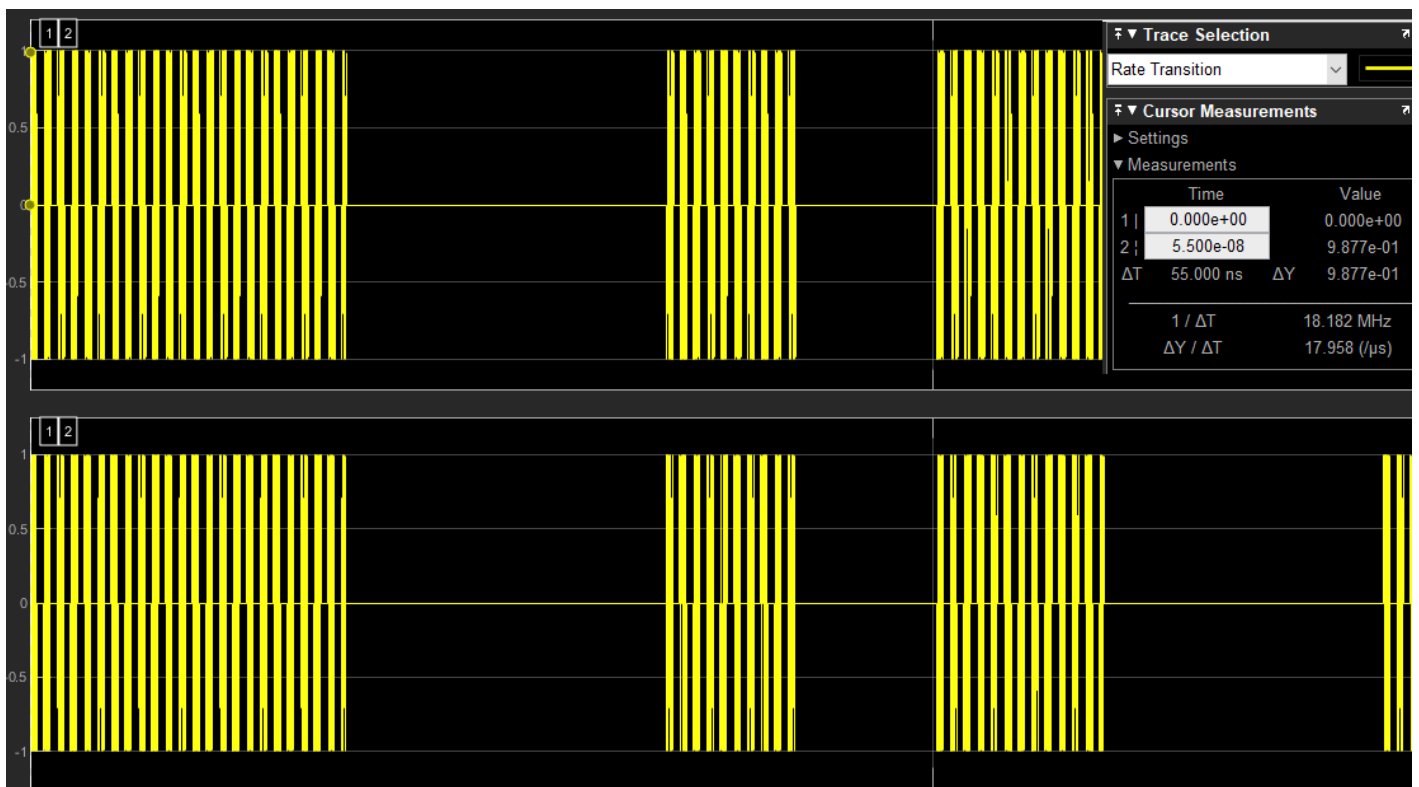


Obrázek 6.33: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 45° symbol 0



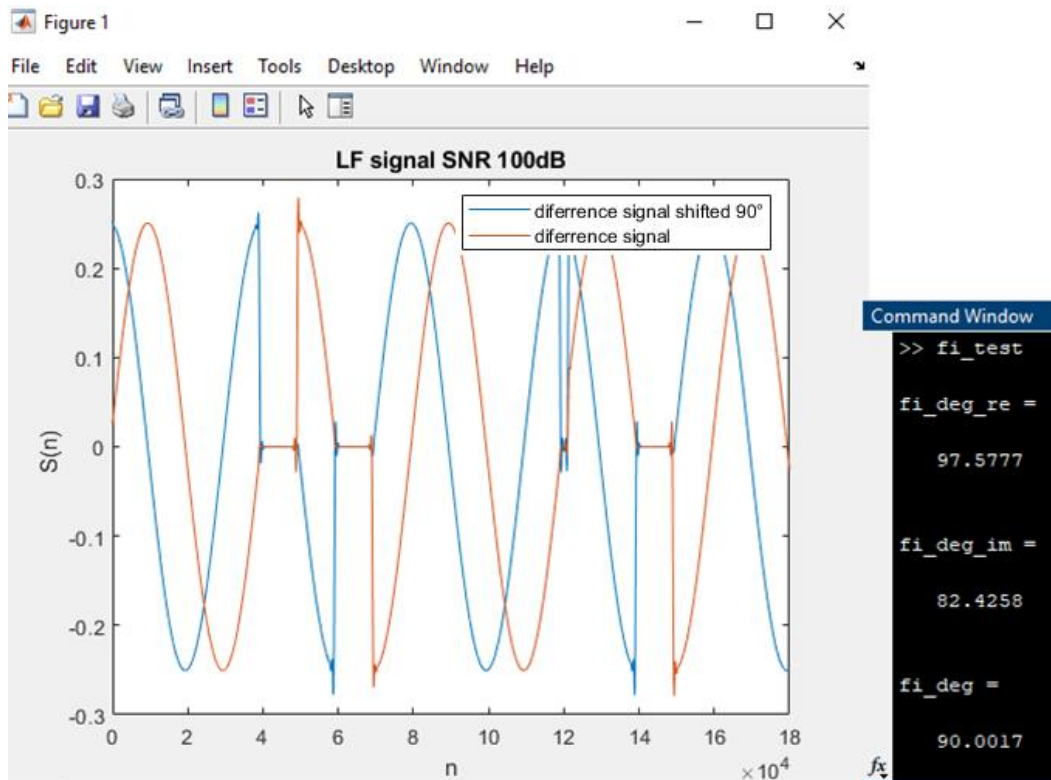
Obrázek 6.34: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 45° symbol 0

Posuv modulovaného signálu: úhel α_m 90° -> TDoA 50ns

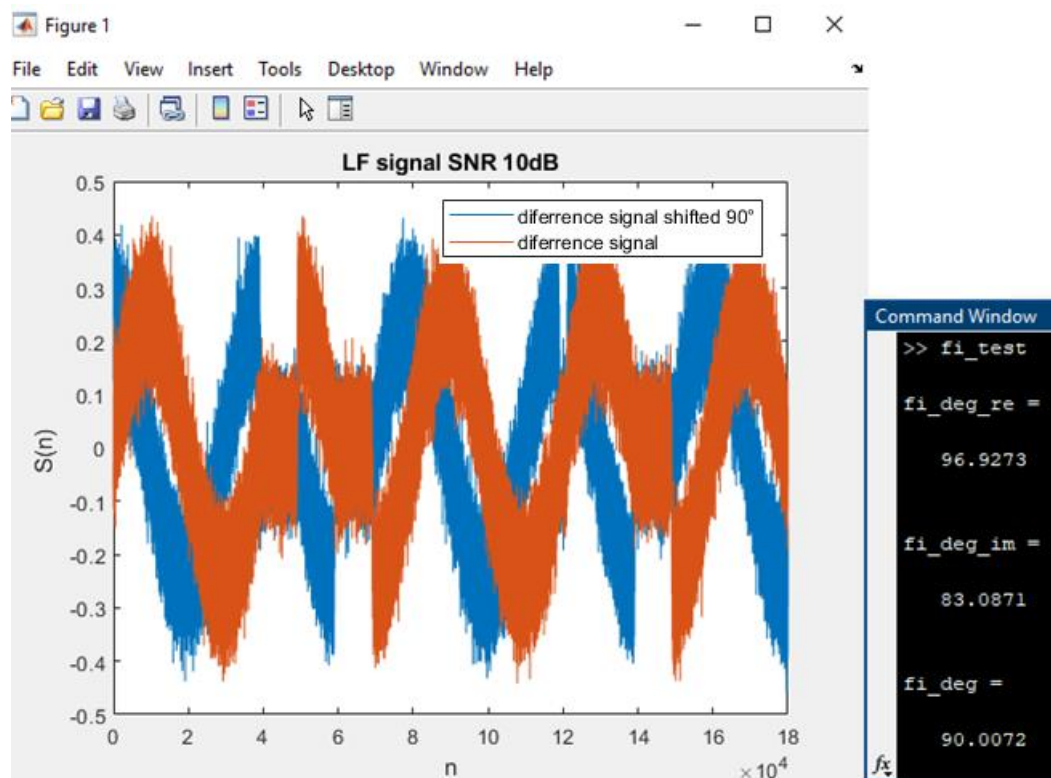


Obrázek 6.35: Modulovaný obdélkový neperiodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B, posuv 90°

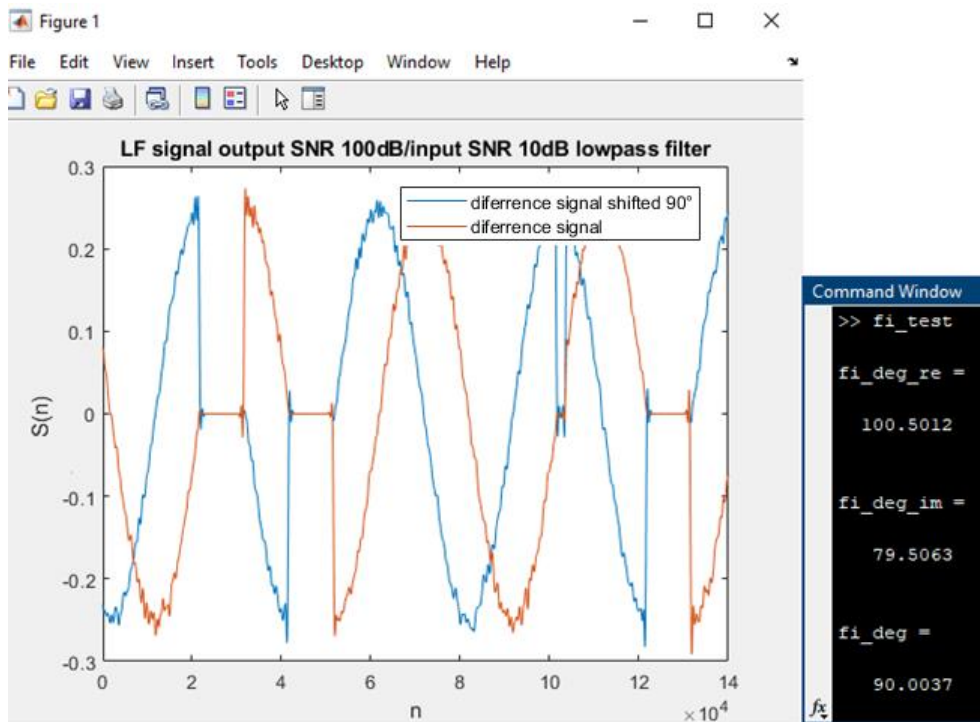
Posuv rozdílového signálu: úhel α_m $90^\circ \rightarrow 50\mu s$



Obrázek 6.36: Rozdílový signál po směšování 90° symbol 0

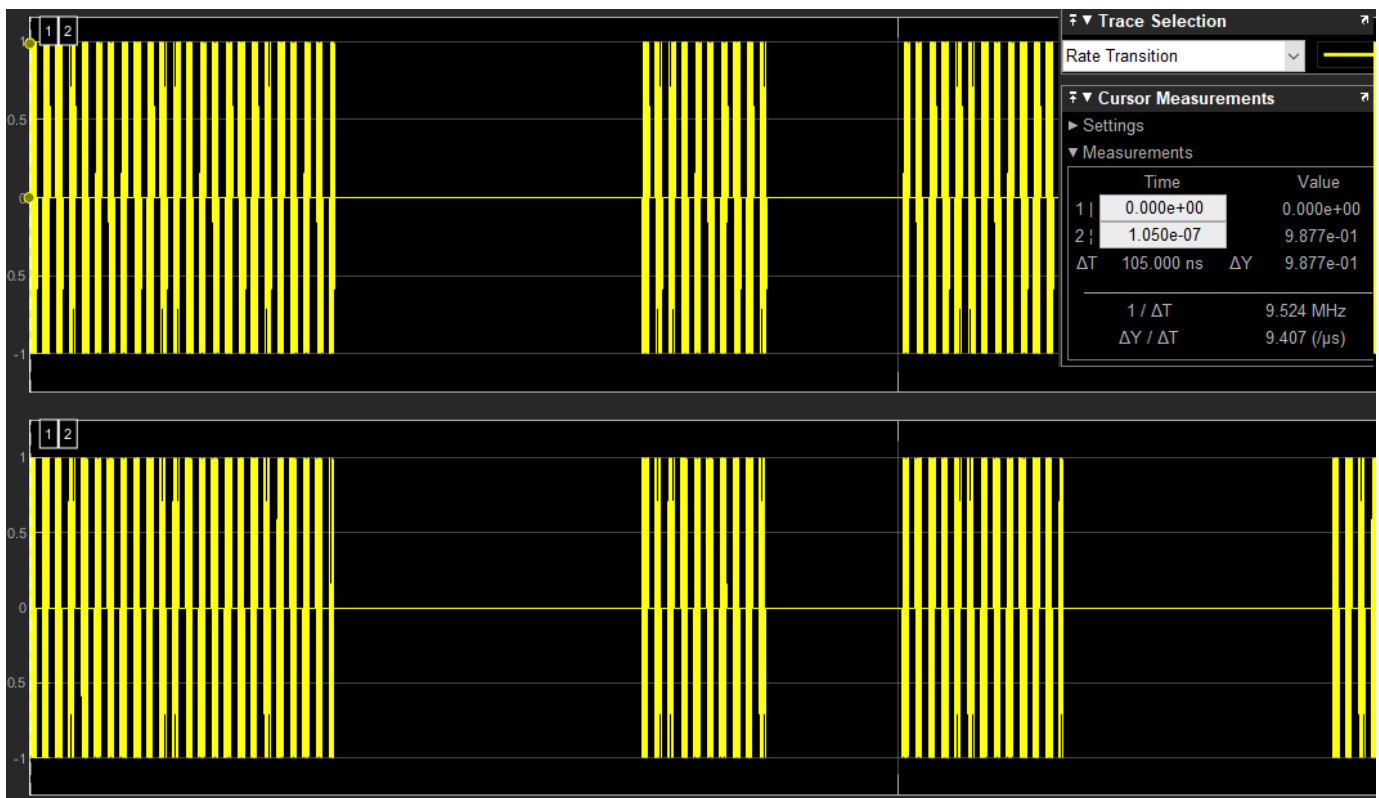


Obrázek 6.37: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 90° symbol 0



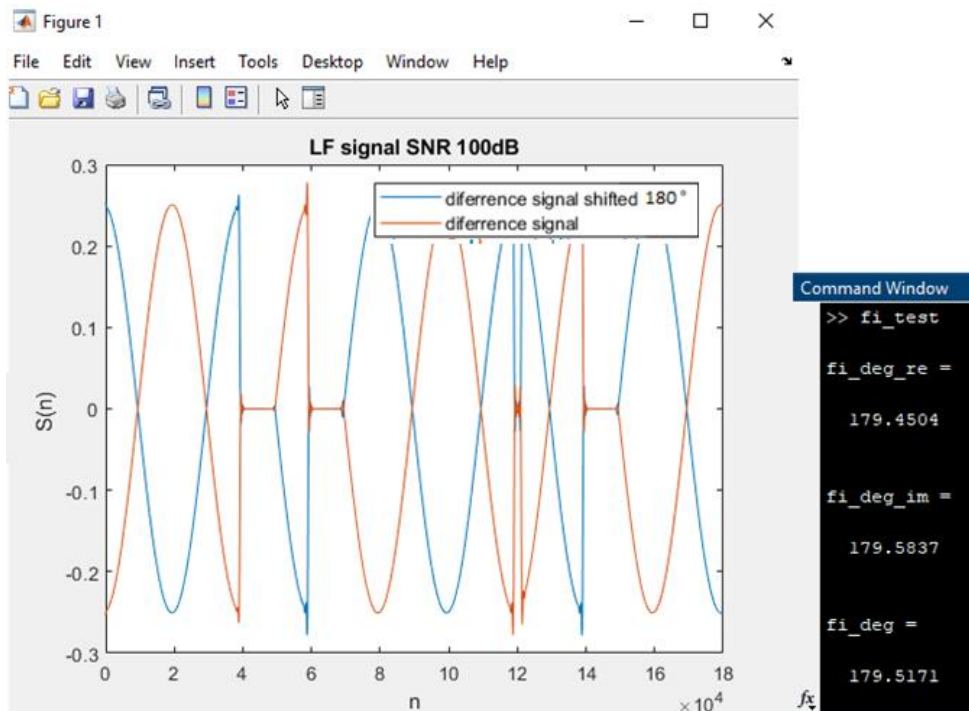
Obrázek 6.38: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 90° symbol 0

Posuv modulovaného signálu: úhel α_m 180° -> TDoA 100ns

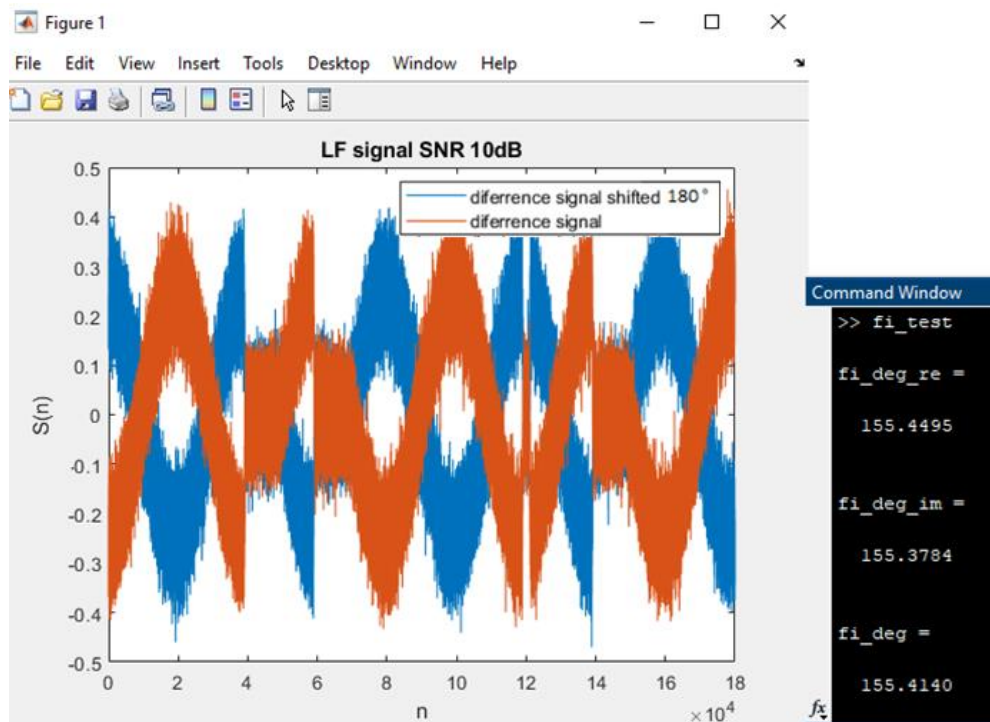


Obrázek 6.39: Modulovaný obdélíkový neperiodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B, posuv 180°

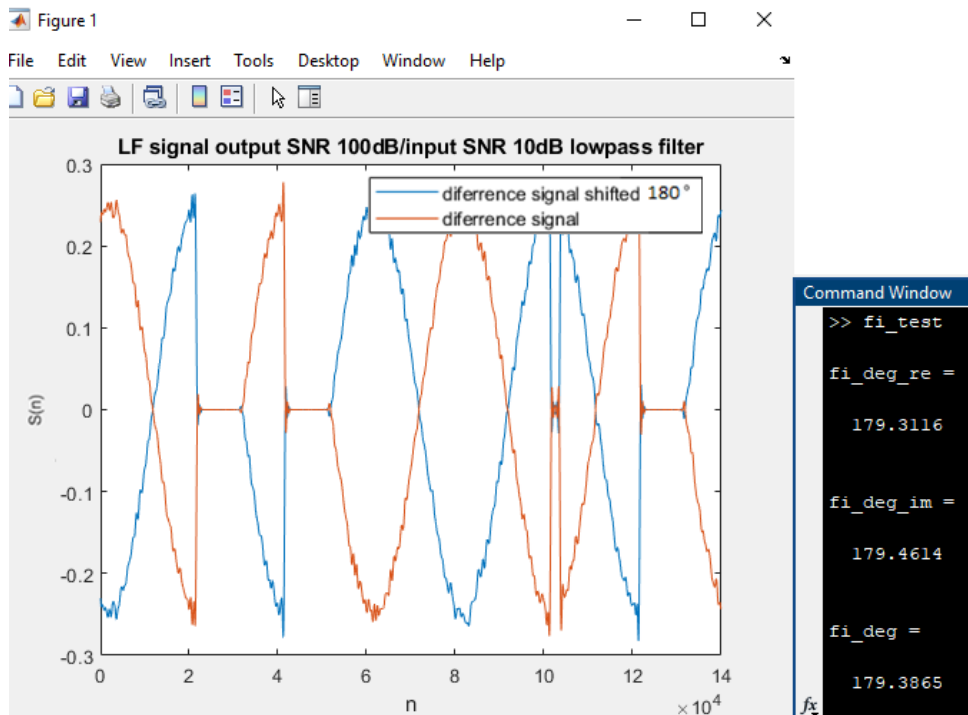
Posuv rozdílového signálu: úhel α_m $180^\circ \rightarrow 100\mu\text{s}$



Obrázek 6.40: Rozdílový signál po směšování 180° symbol 0



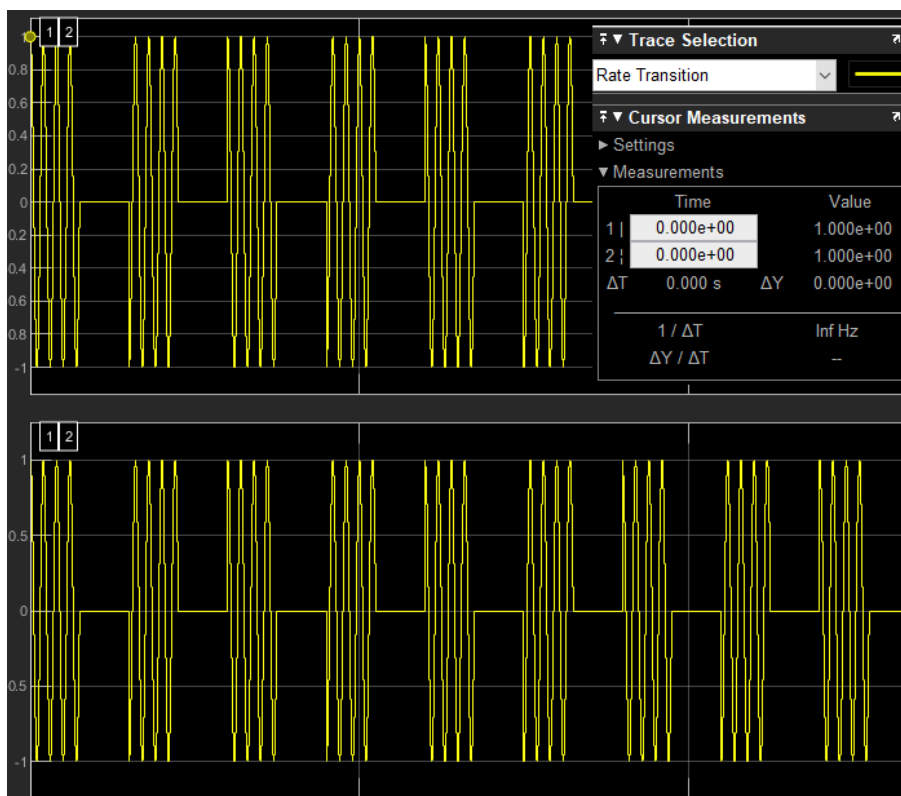
Obrázek 6.41: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 180° symbol 0



Obrázek 6.42: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 180° symbol 0

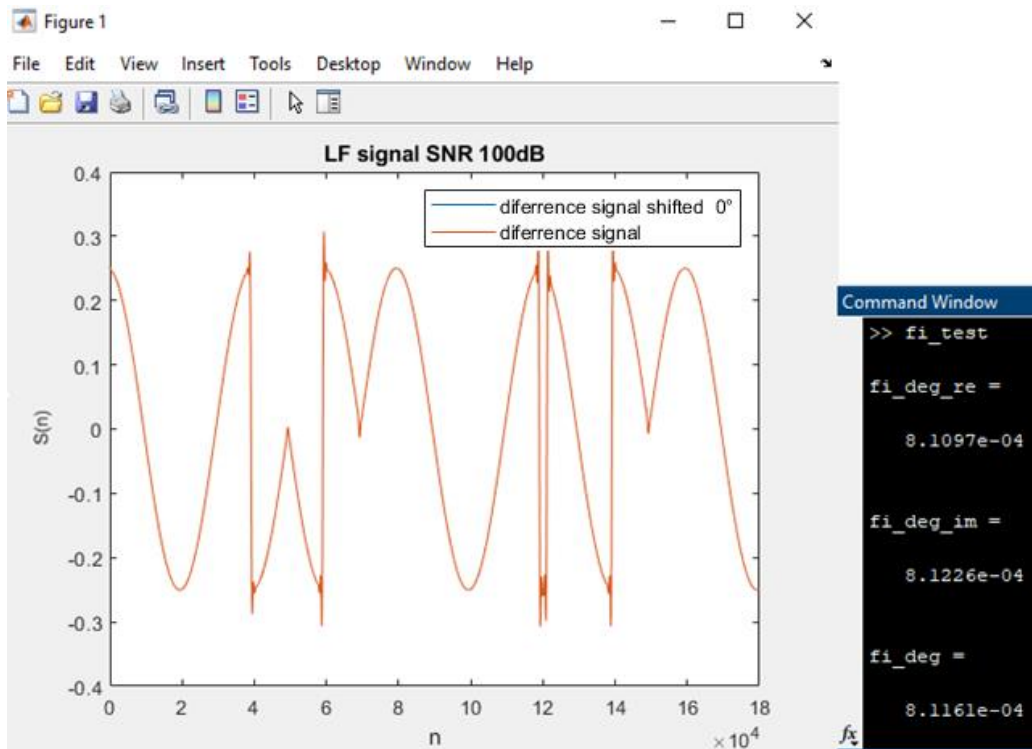
c) Neideální obdélníkový signálu, vliv symbolu -1:

Posuv modulovaného signálu: úhel $\alpha_m 0^\circ \rightarrow$ TDoA 0ns

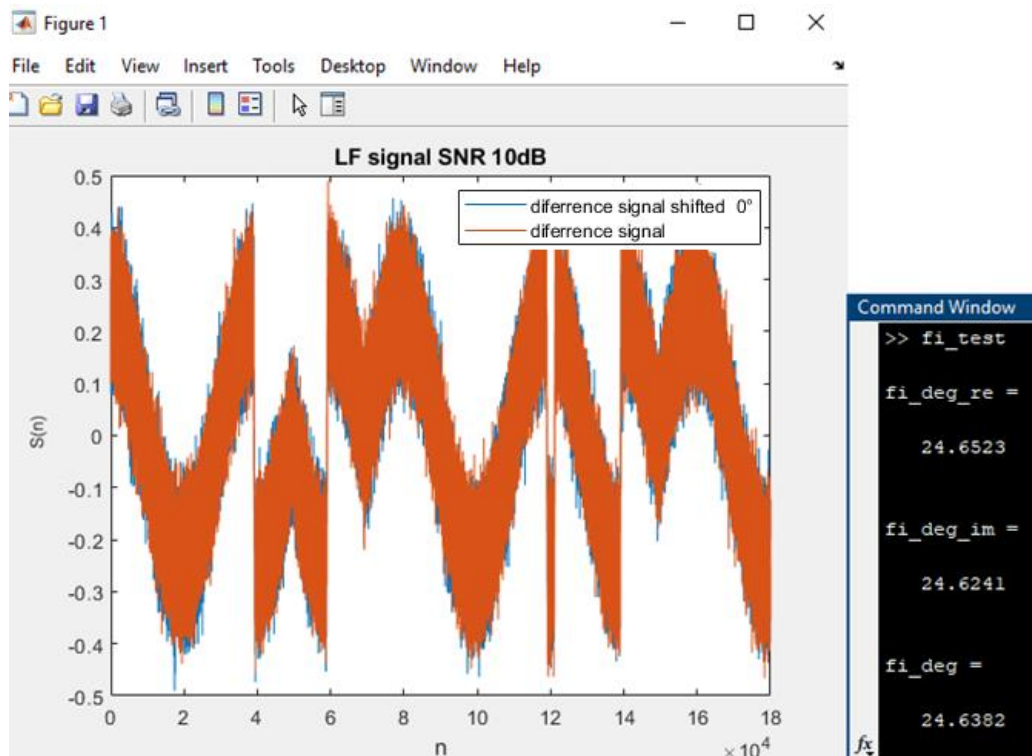


Obrázek 6.43: Modulovaný obdélníkový periodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B se symbolem „-1“, posuv 0°

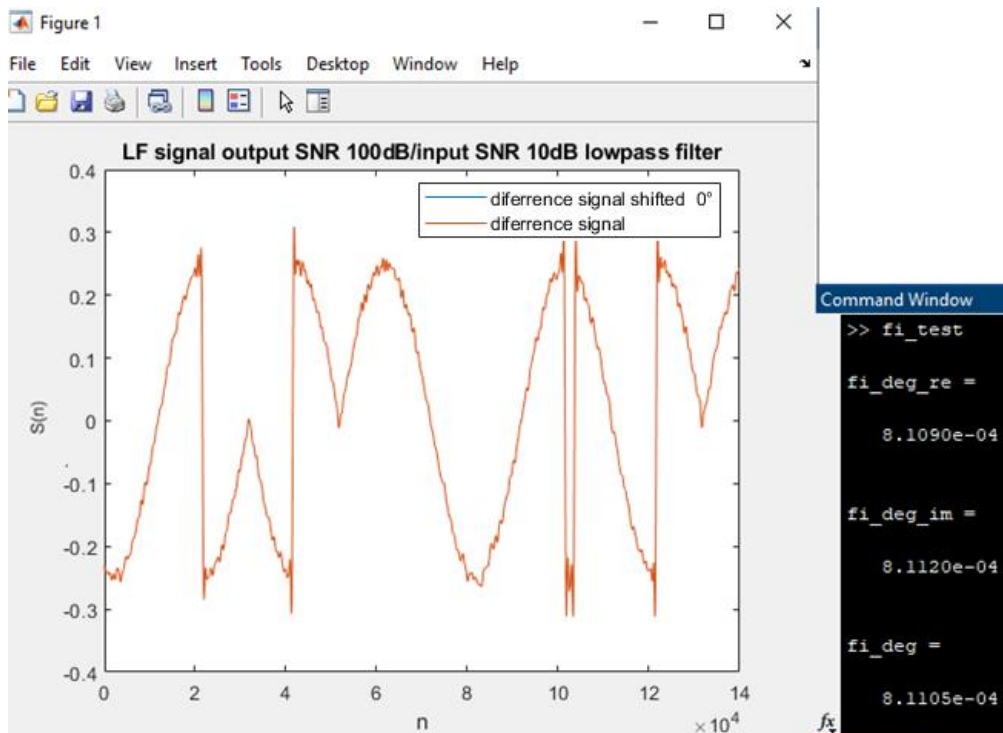
Posuv rozdílového signálu: úhel $\alpha_m 0^\circ \rightarrow 0$ us



Obrázek 6.44: Rozdílový signál po směšování 0° symbol -1

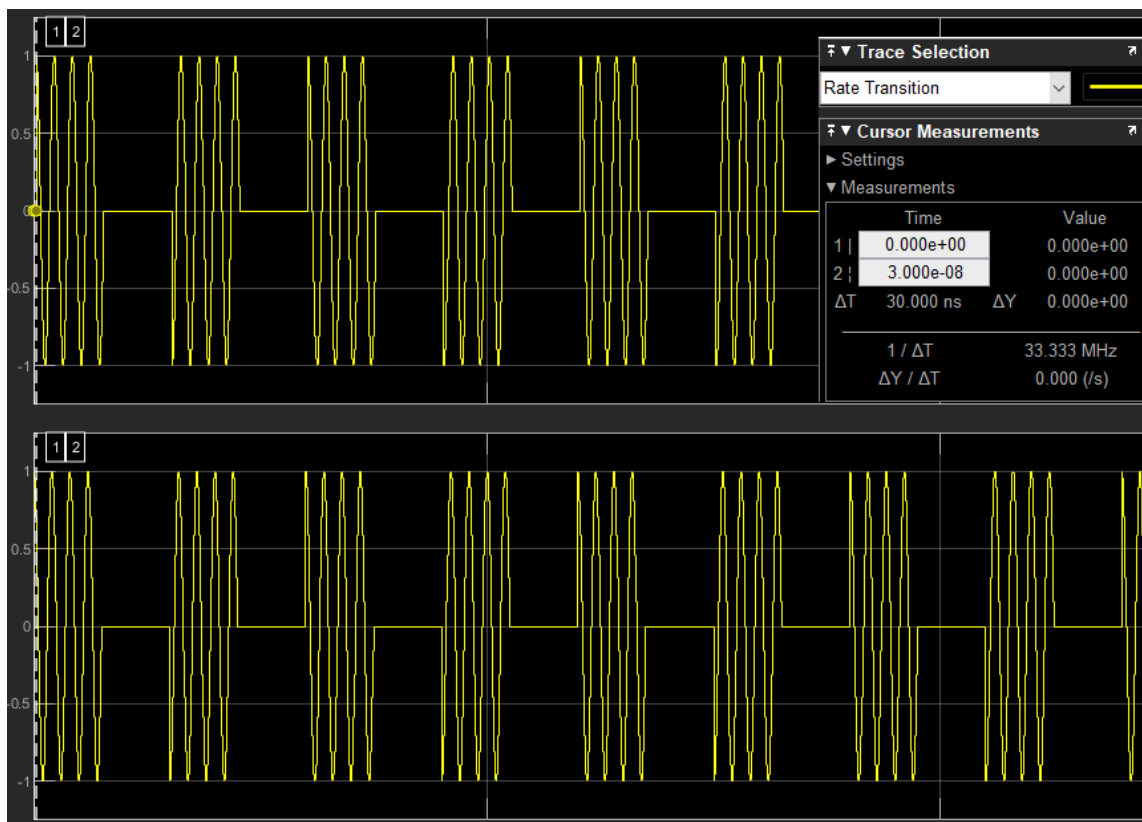


Obrázek 6.45: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 0° symbol -1



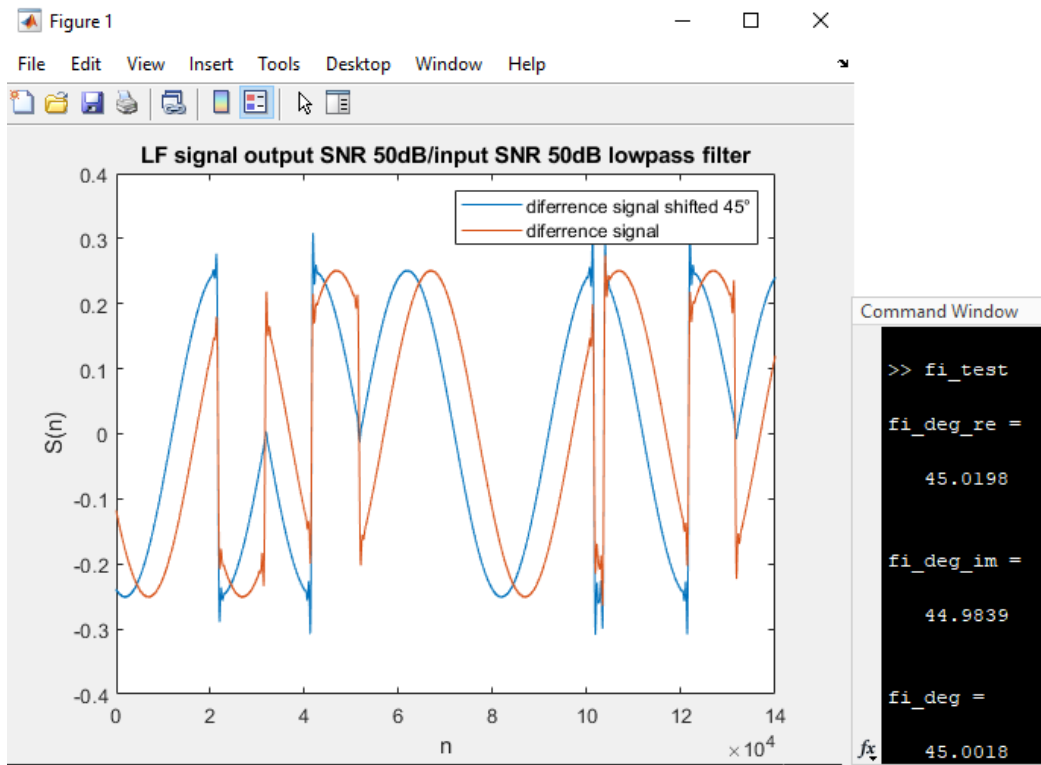
Obrázek 6.46: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 0° symbol -1

Posuv modulovaného signálu: úhel $\alpha_m 45^\circ \rightarrow$ TDoA 25ns

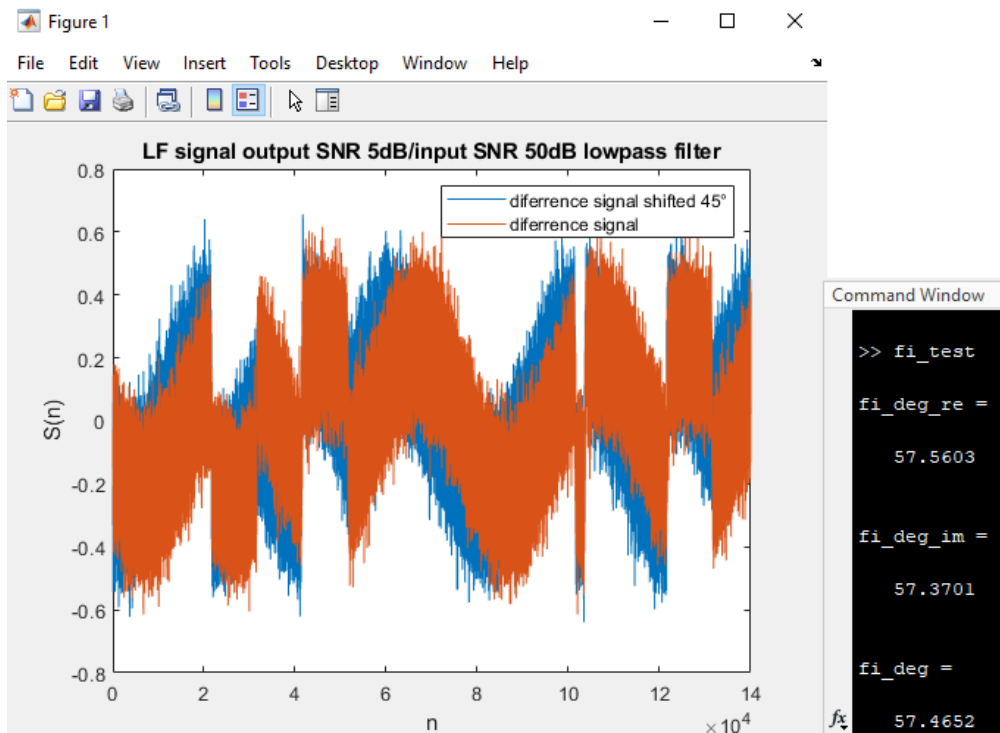


Obrázek 6.47: Modulovaný obdélníkový periodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B se symbolem „-1“, posuv 45°

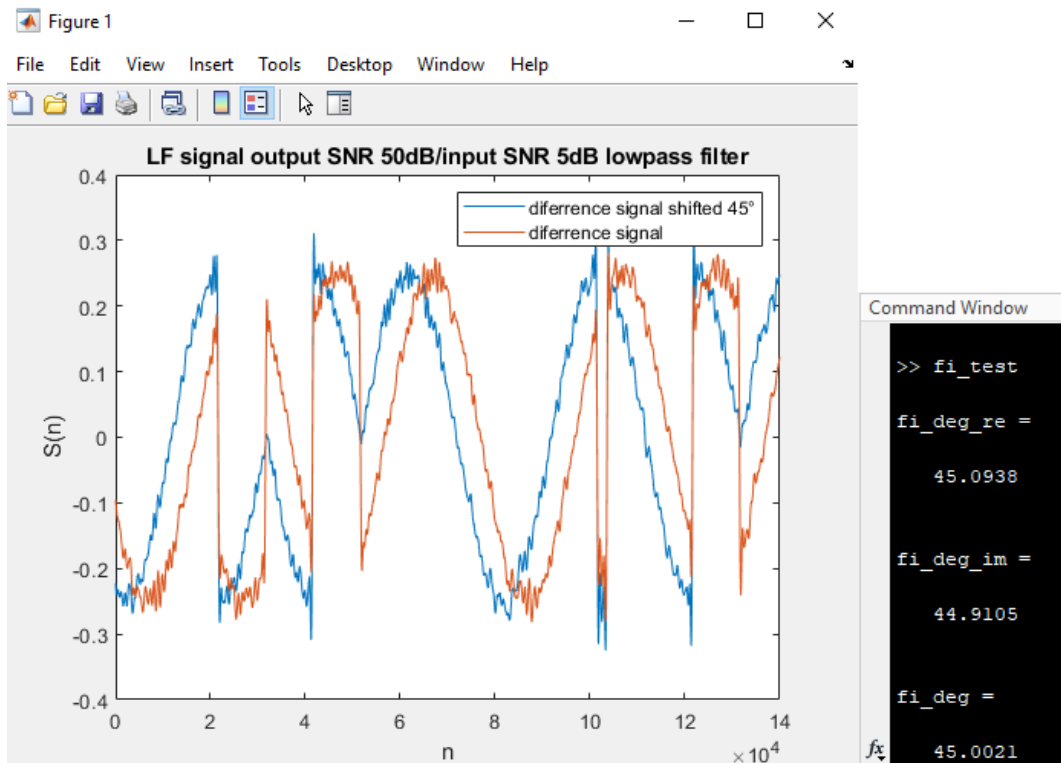
Posuv rozdílového signálu: úhel α_m 45° -> 25us



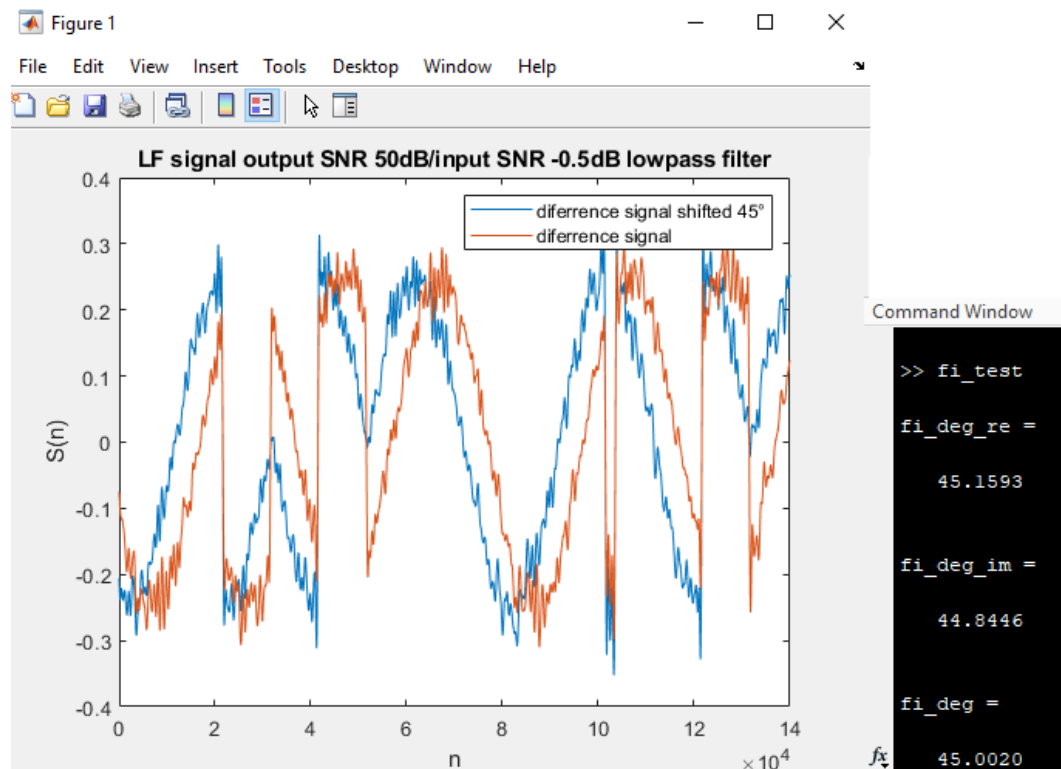
Obrázek 6.48: Rozdílový signál po směšování 45° symbol -1 (SNR out/in 50dB/50dB)



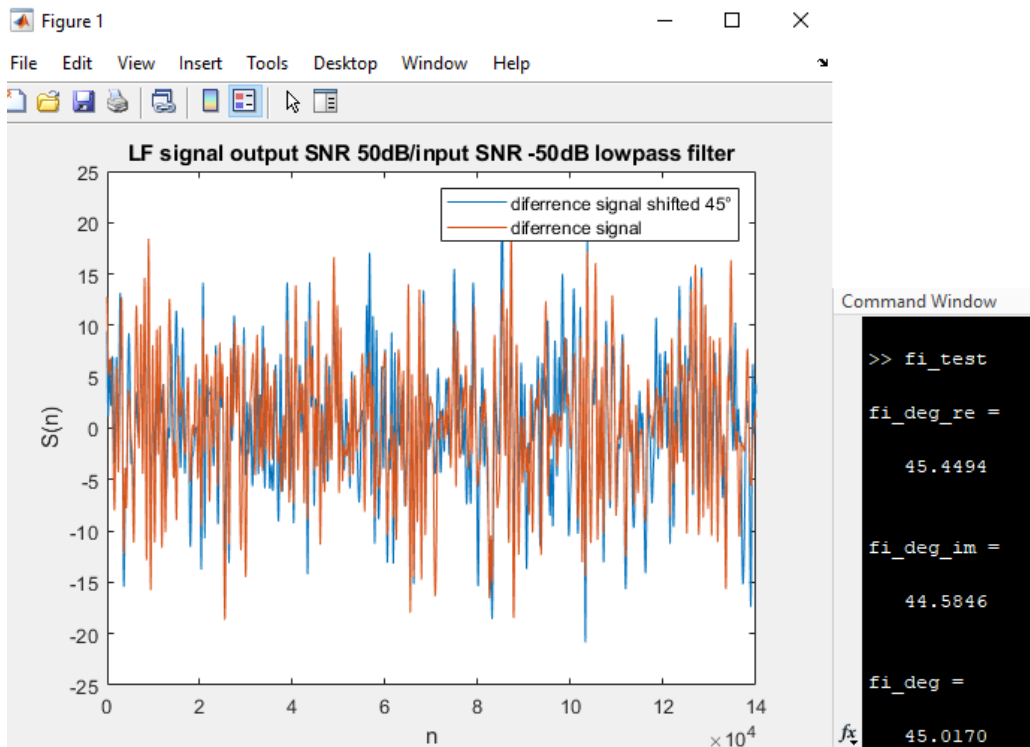
Obrázek 6.49: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 45° symbol -1 (SNR out/in 5dB/50dB)



Obrázek 6.50: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 45° symbol -1 (SNR out/in 50dB/5dB)

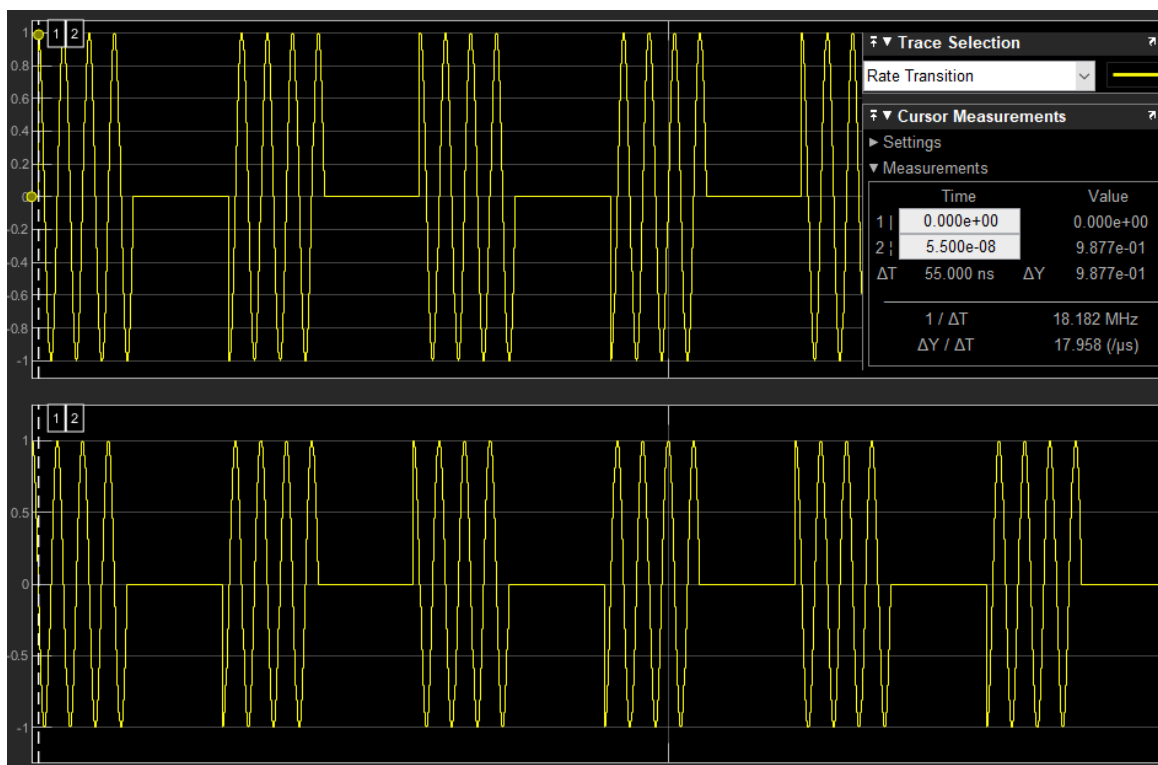


Obrázek 6.51: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 45° symbol -1 (SNR out/in 50dB/-0,5dB)



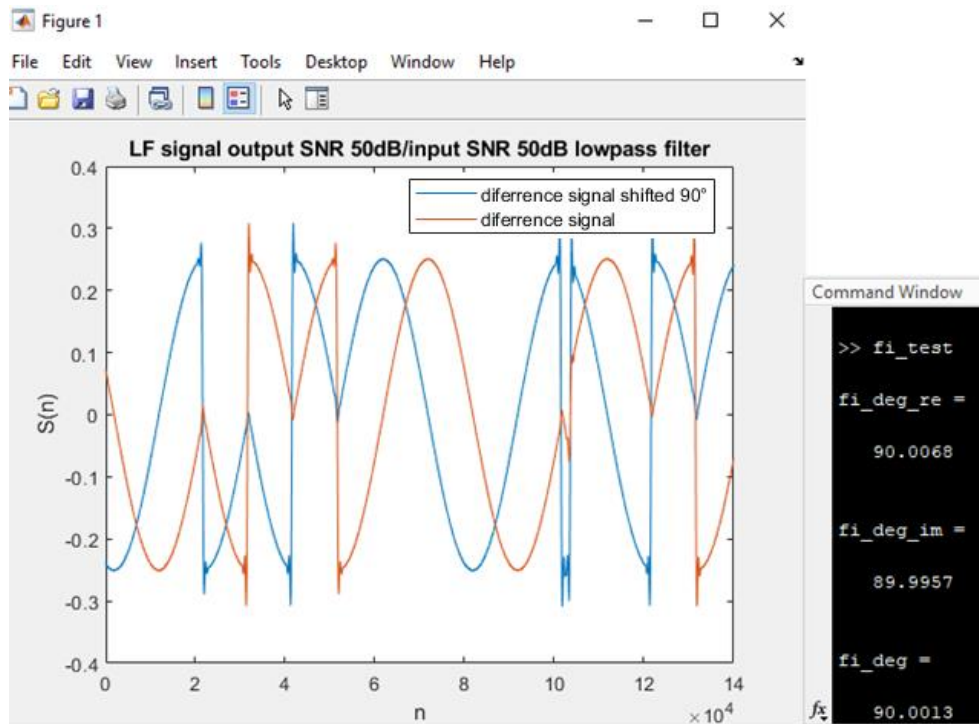
Obrázek 6.52: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 45° symbol -1 (SNR out/in 50dB/-50dB)

Posuv modulovaného signálu: úhel α_m 90° -> TDoA 50ns

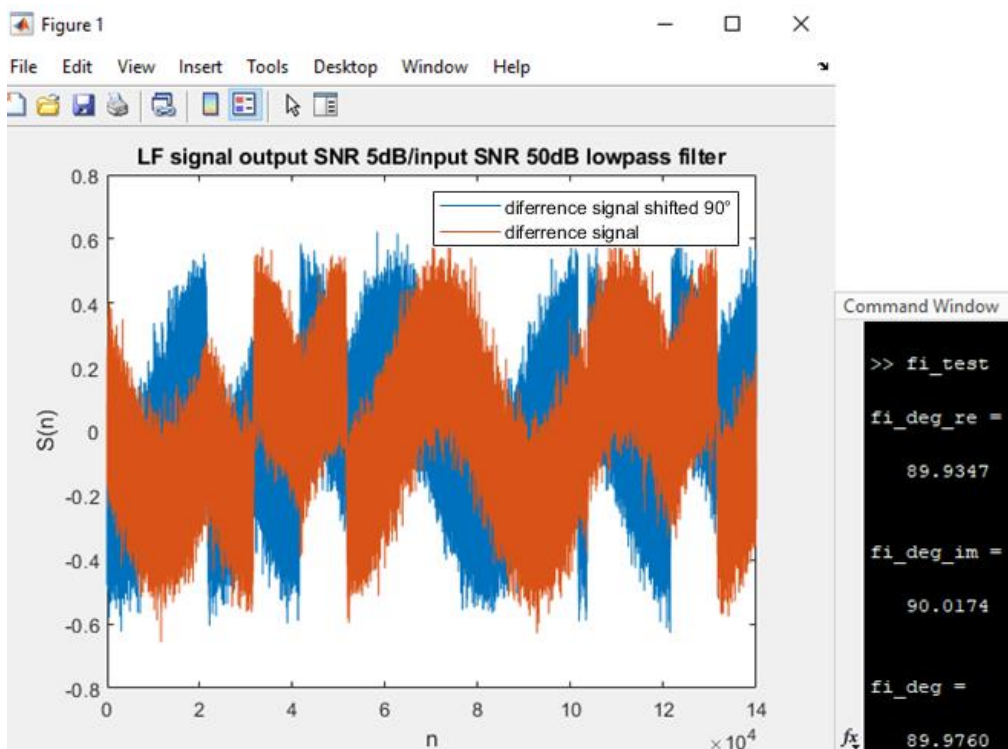


Obrázek 6.53: Modulovaný obdélníkový periodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B se symbolem „-1“, posuv 90°

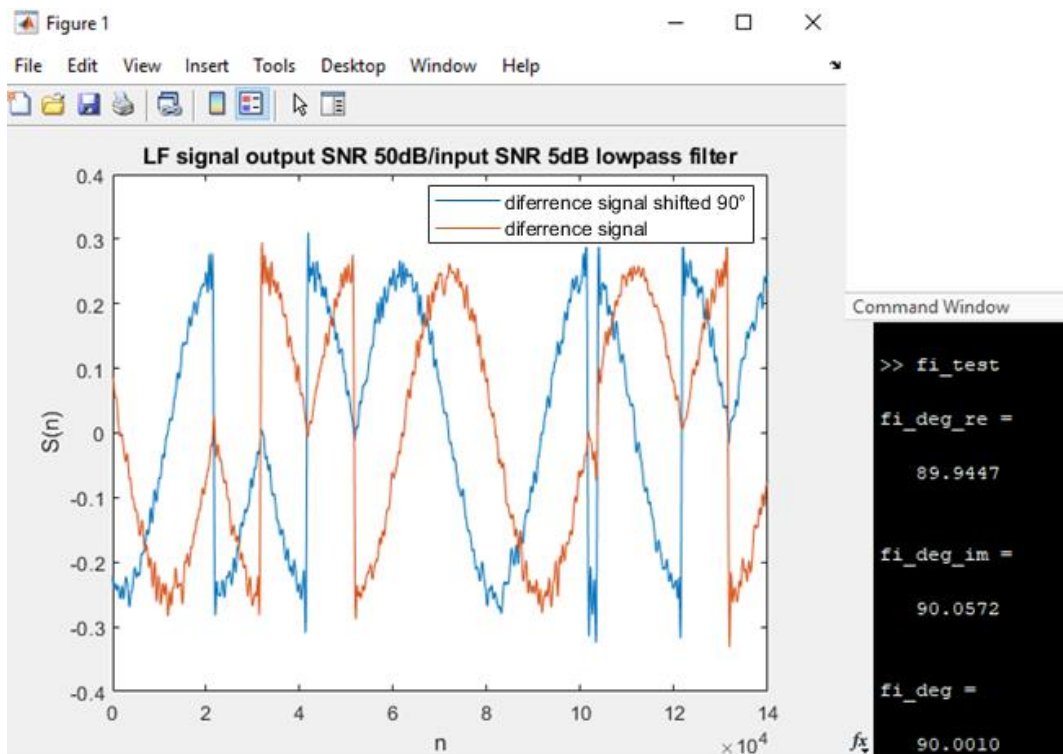
Posuv rozdílového signálu: úhel α_m $90^\circ \rightarrow 50\mu s$



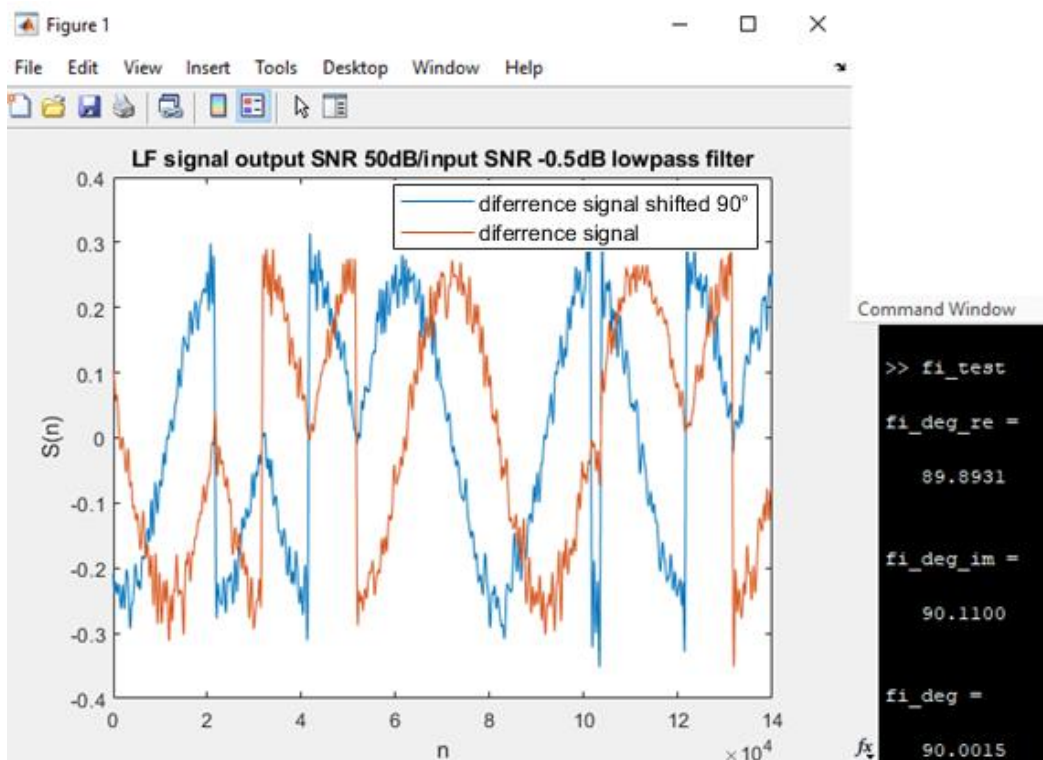
Obrázek 6.54: Rozdílový signál po směřování 90° symbol -1 (SNR out/in 50dB/50dB)



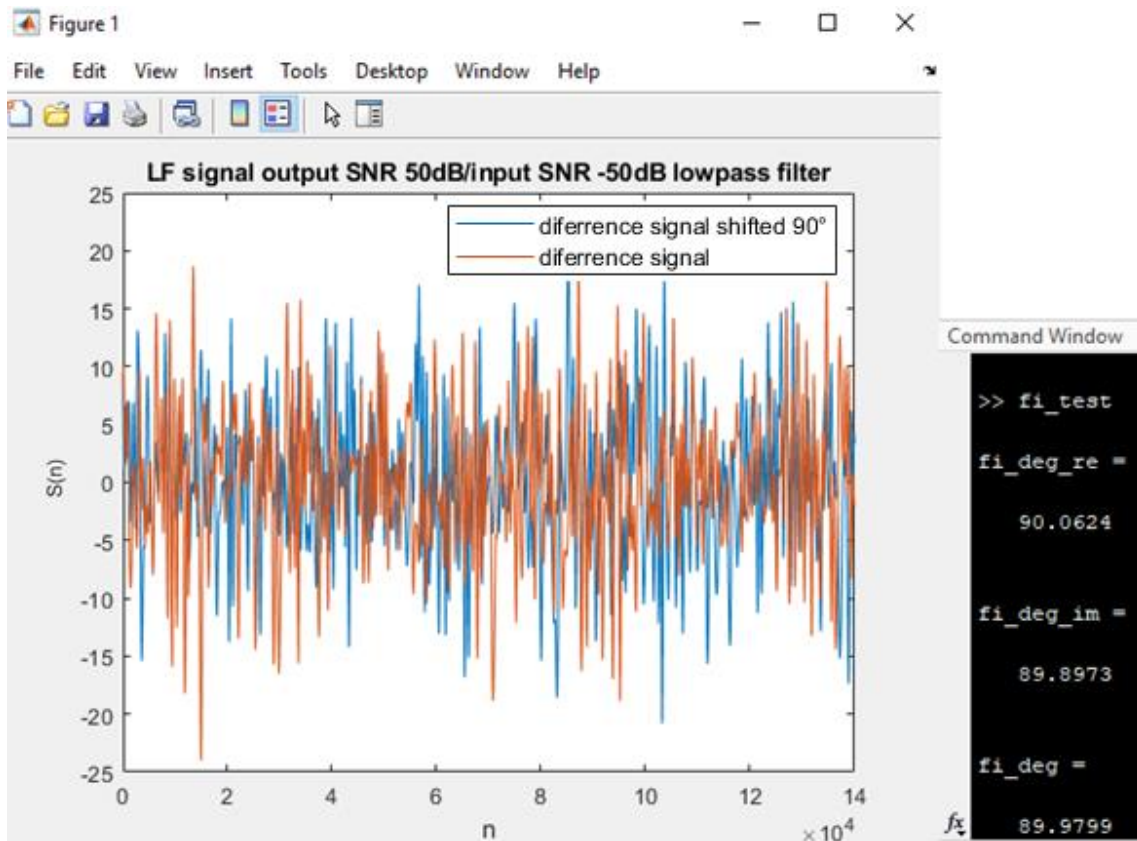
Obrázek 6.55: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 90° symbol -1 (SNR out/in 5dB/50dB)



Obrázek 6.56: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 90° symbol -1 (SNR out/in 50dB/5dB)



Obrázek 6.57: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 90° symbol -1 (SNR out/in 50dB/-0,5dB)



Obrázek 6.58: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 90° symbol -1 (SNR out/in 50dB/-50dB)

Output noise										
alpha 45°	45,002	45,55	46,73	49,95	57,465	70,32	79,9	86,23	89,49	89,7
noise [dB]	50	20	15	10	5	-0,5	-5	-10	-20	-50

Tabulka 6.1: Vliv výstupního šumu na určení úhlu 45°

Output noise										
alpha 90°	90,0013	89,97	90	90,03	89,976	89,97	90	89,98	90,02	90,01
noise [dB]	50	20	15	10	5	-0,5	-5	-10	-20	-50

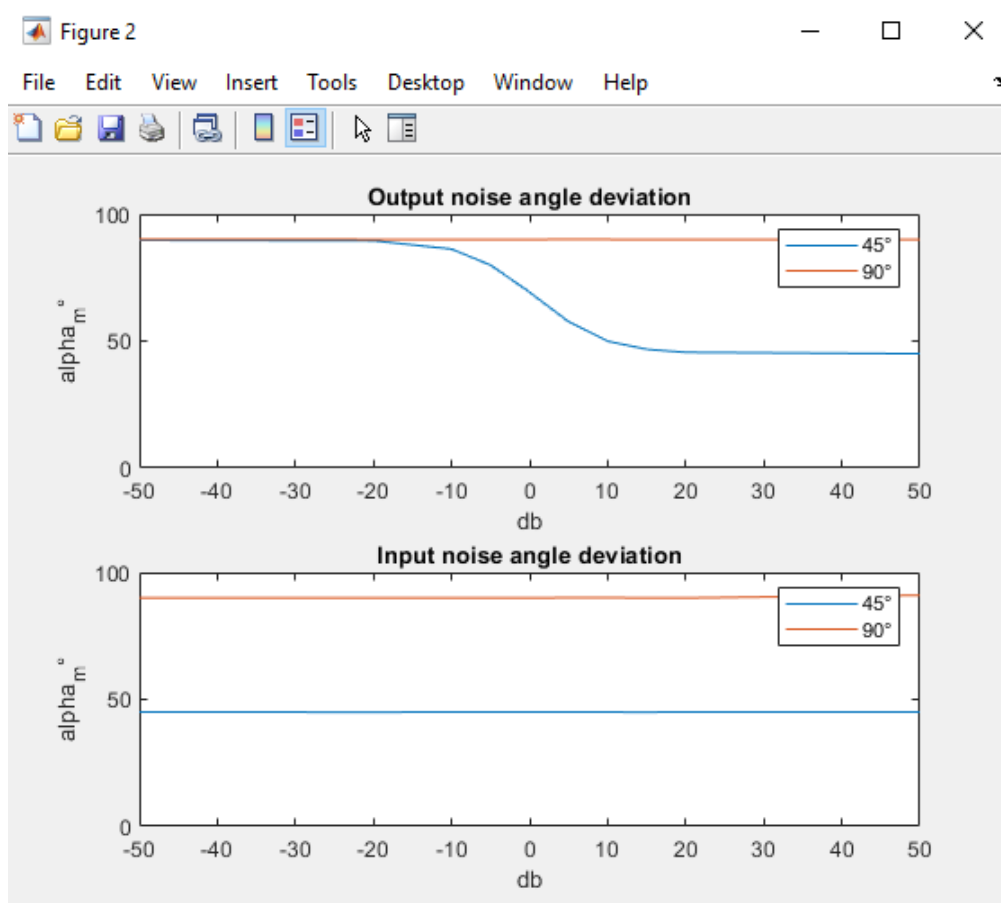
Tabulka 6.2: Vliv výstupního šumu na určení úhlu 90°

Input noise										
alpha 45°	45,002	45,02	44,98	45	45,0021	45,002	44,99	45,01	44,98	45,017
noise [dB]	50	20	15	10	5	-0,5	-5	-10	-20	-50

Tabulka 6.3: Vliv vstupního šumu na určení úhlu 45°

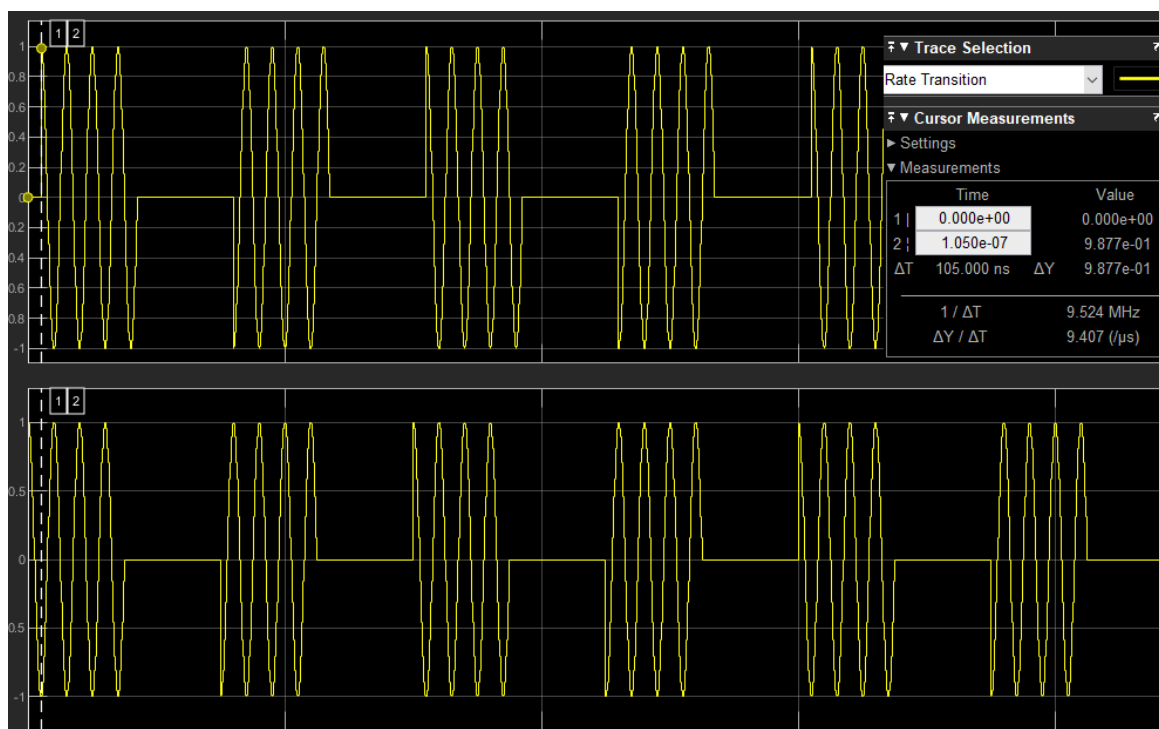
Input noise										
alpha 90°	90,0013	89,97	90,01	90,004	90,001	90,0015	89,002	89,0015	90,001	89,9799
noise [dB]	50	20	15	10	5	-0,5	-5	-10	-20	-50

Tabulka 6.4: Vliv vstupního šumu na určení úhlu 90°



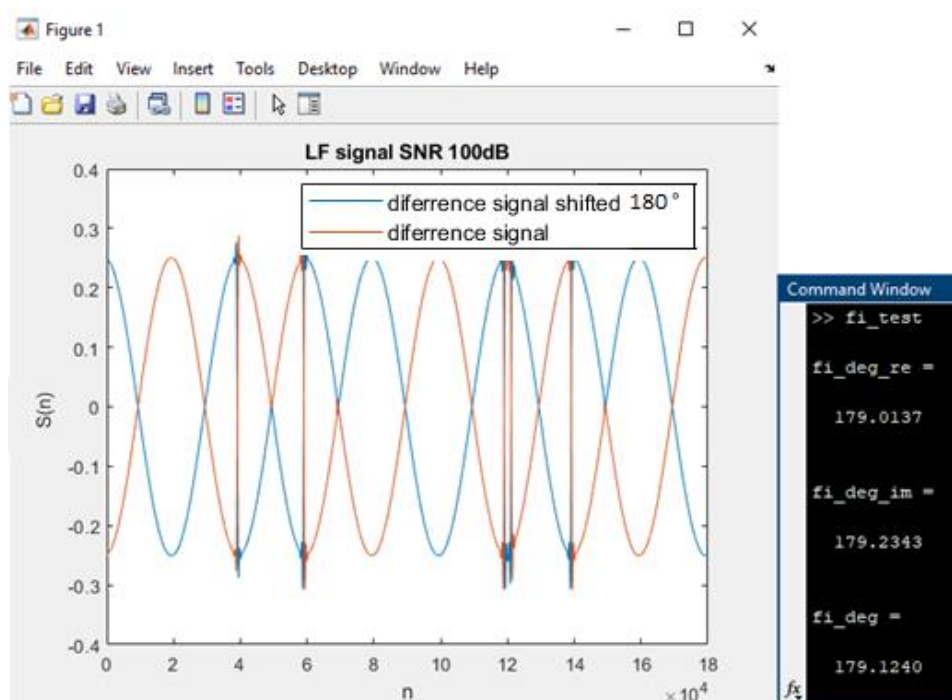
Obrázek 6.59: Vliv odchylky určení úhlu na SNR (vstupním a výstupním šumu)

Posuv modulovaného signálu: úhel α_m 180° -> TDoA 100ns

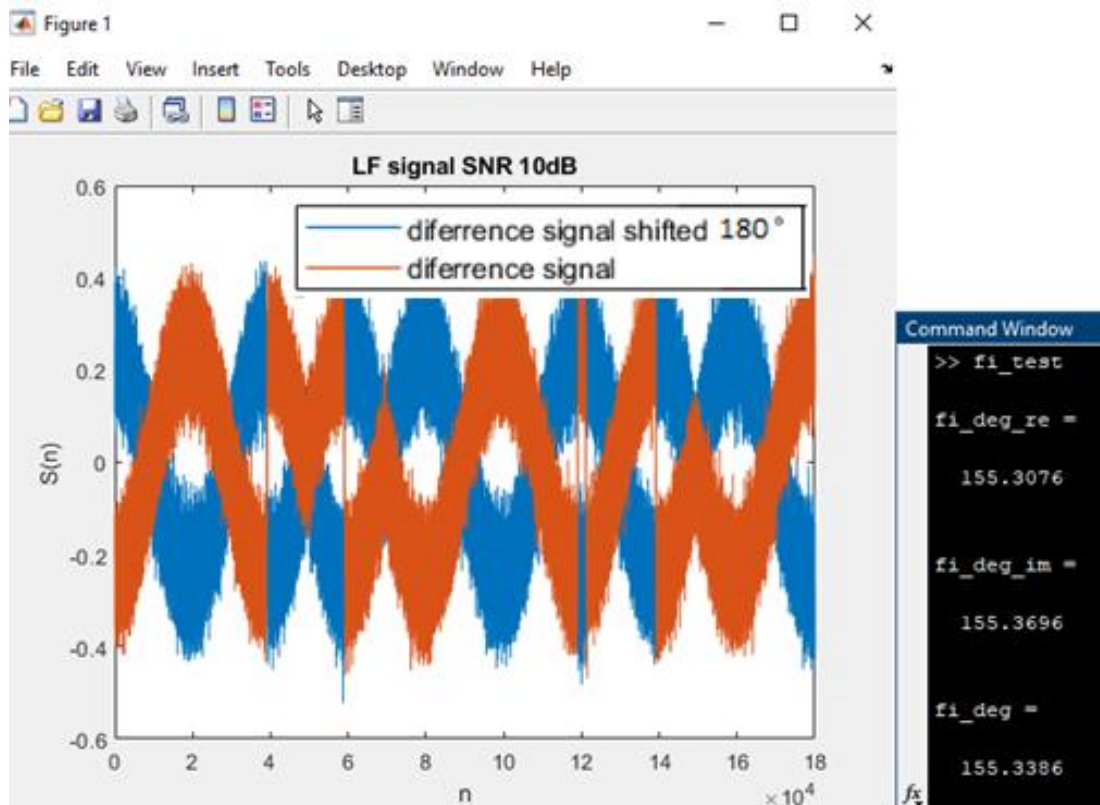


Obrázek 6.60: Modulovaný obdélníkový periodický signál simulující sekvenci symbolů ADS-B se symbolem „-1“, posuv 180°

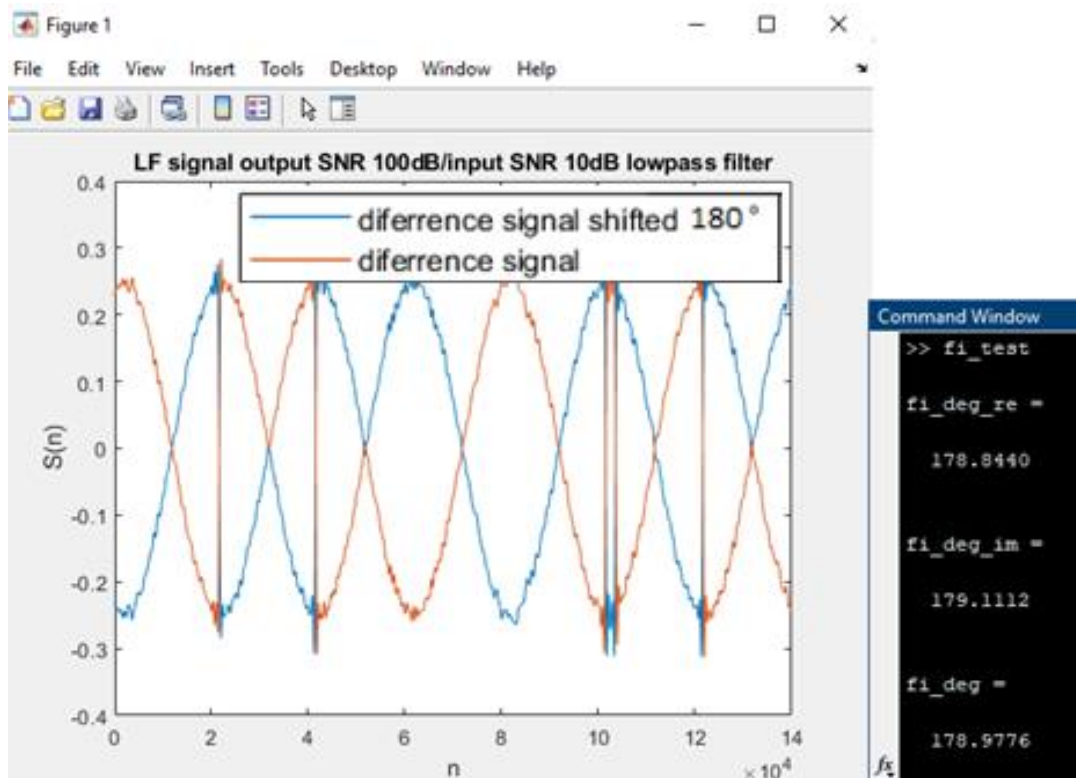
Posuv rozdílového signálu: úhel α_m 180° -> 100us



Obrázek 6.61: Rozdílový signál po směšování 180° symbol -1

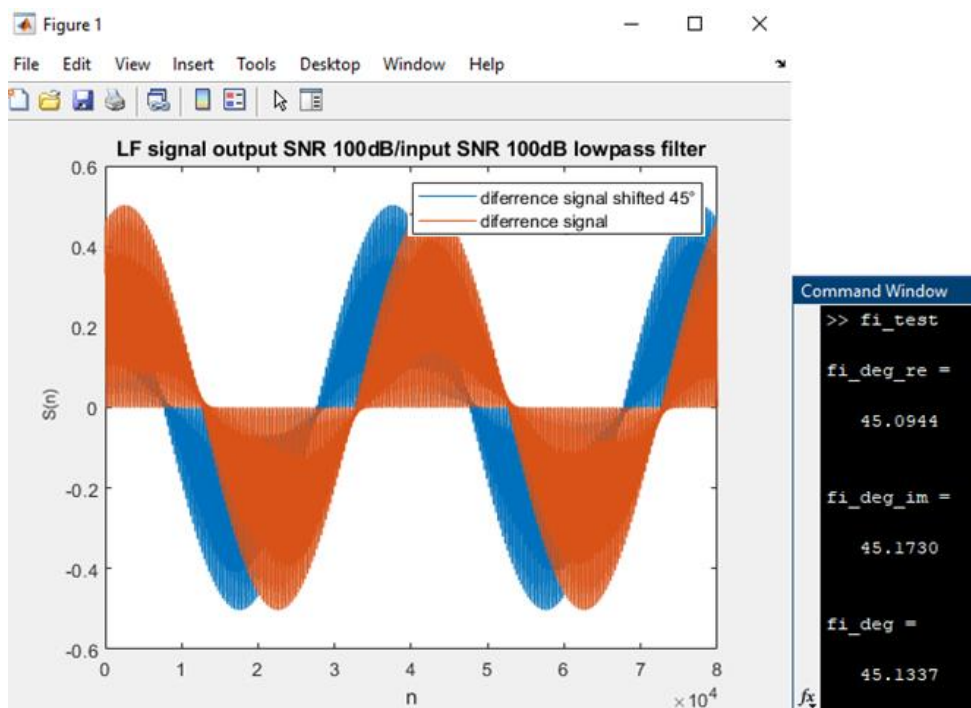


Obrázek 6.62: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu za DP, posuv 180° symbol -1



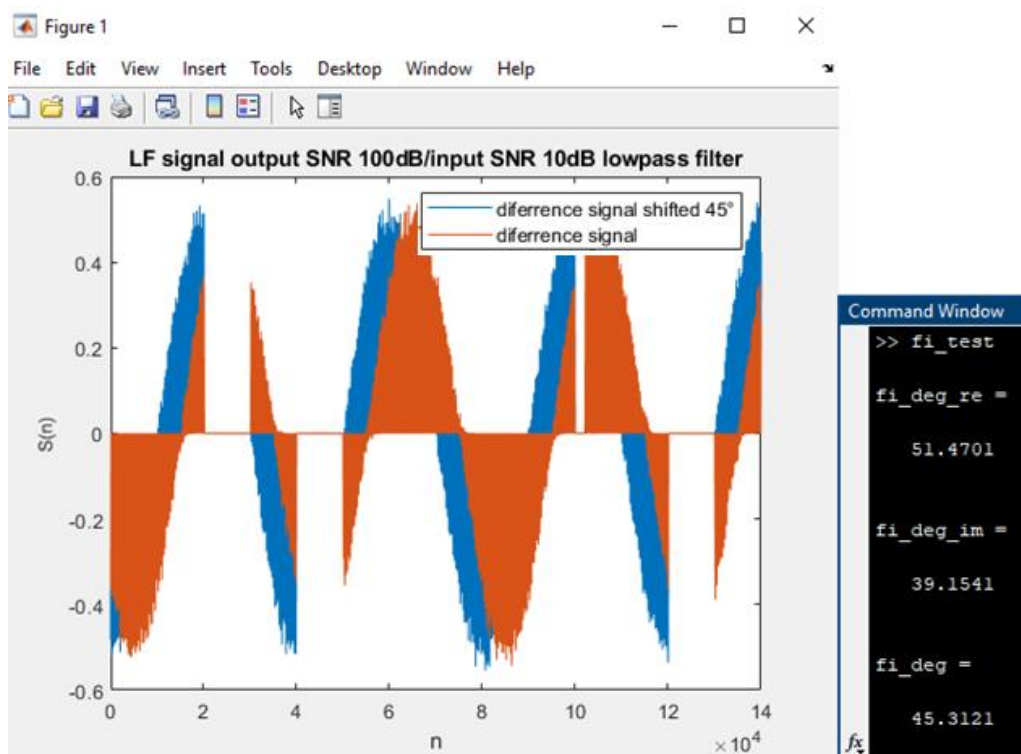
Obrázek 6.63: Vliv šumu přidaným k rozdílovému signálu před DP, posuv 180° symbol -1

Nevhodně zvolené parametry filtru dolní propust pro úhel 45° , nedochází k filtraci datových symbolů:

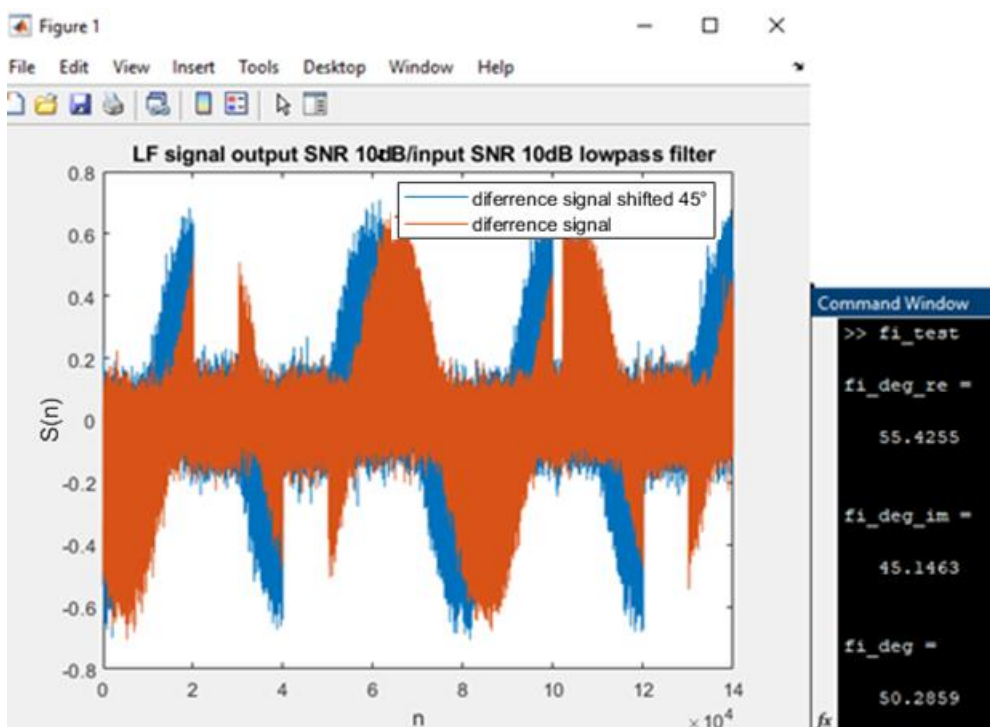


Obrázek 6.64: Nevhodné parametry filtru typu DP pro úhel 45° (SNR out/in 100dB/100dB)

Úhel 45° , vliv symbolu 0:

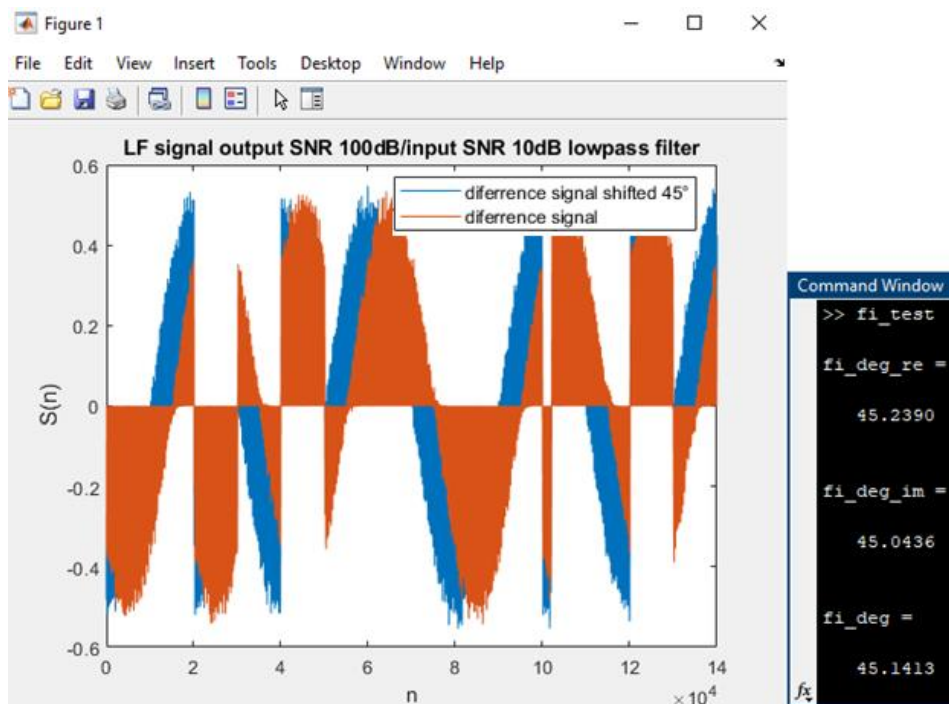


Obrázek 6.65: Nevhodné parametry filtru typu DP pro úhel 45° symbol 0 (SNR out/in 100dB/10dB)

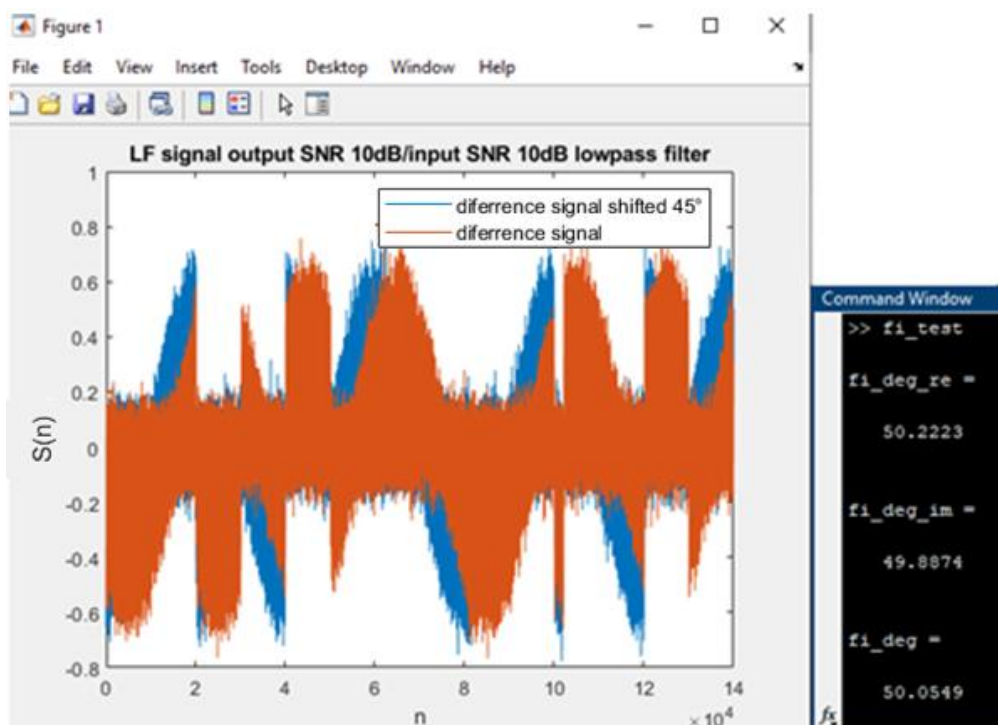


Obrázek 6.66: Nevhodné parametry filtru typu DP pro úhel 45° symbol 0
(SNR out/in 10dB/10dB)

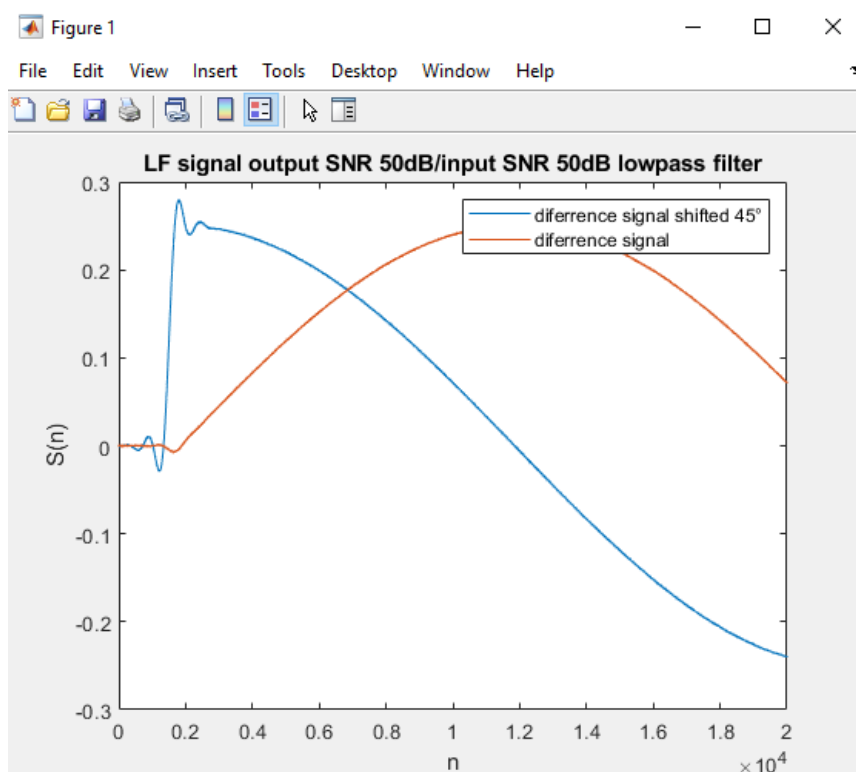
Úhel 45° , vliv symbolu -1:



Obrázek 6.67: Nevhodné parametry filtru typu DP pro úhel 45° symbol -1
(SNR out/in 100dB/10dB)



Obrázek 6.68: Nevhodné parametry filtru typu DP pro úhel 45° symbol -1 (SNR out/in 10dB/10dB)



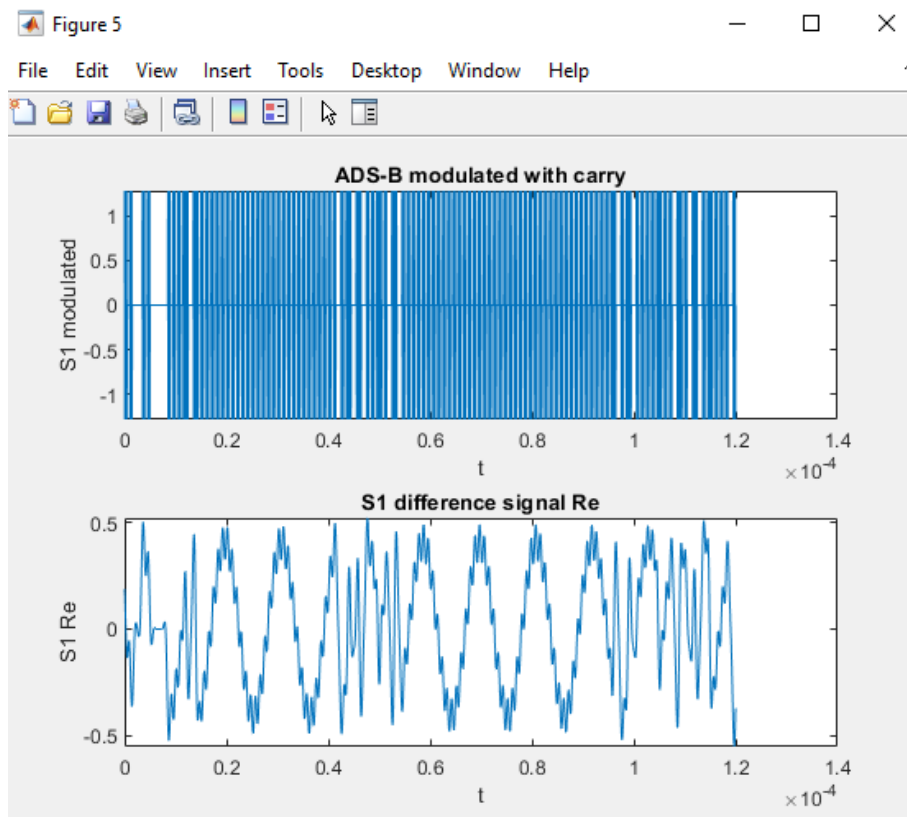
Obrázek 6.69: Vliv filtru typu DP na zpoždění rozdílových signálů

Výpočty TDoA pro úhly pro SNR vstupního ideální periodický průběh signálu 10dB:

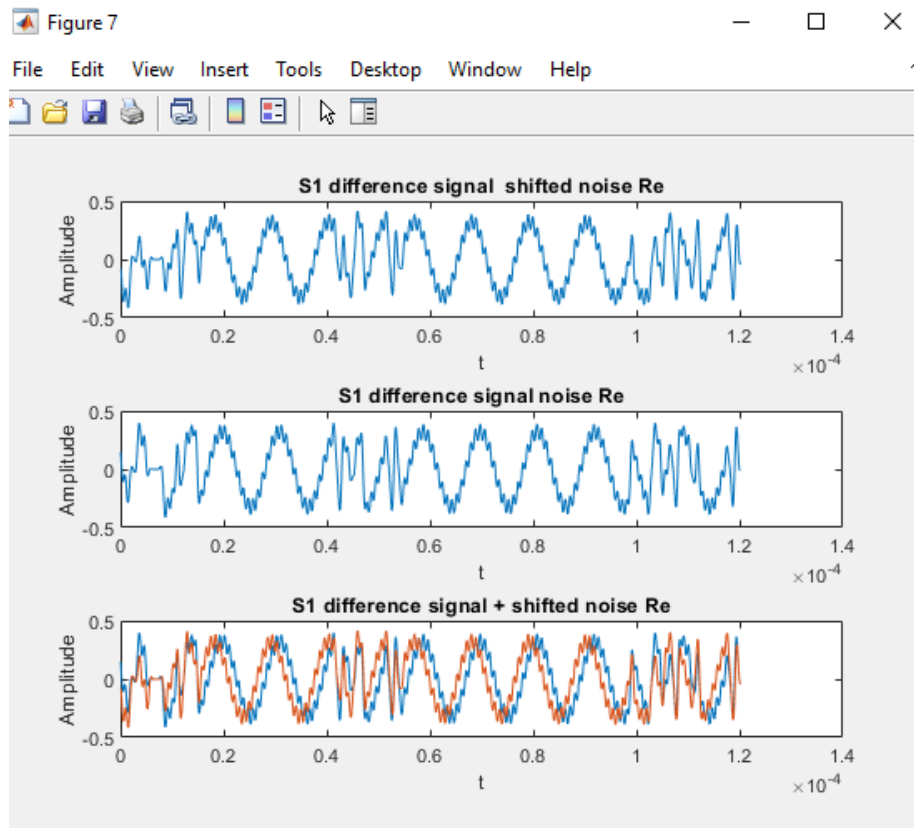
fi_deg[°]	0,00081042	45,0002	90,0002	179,7841
TdoA[ns]	0	25,8502	50,4556	99,8874

Tabulka 6.5: Výpočet TDoA na základě úhlu

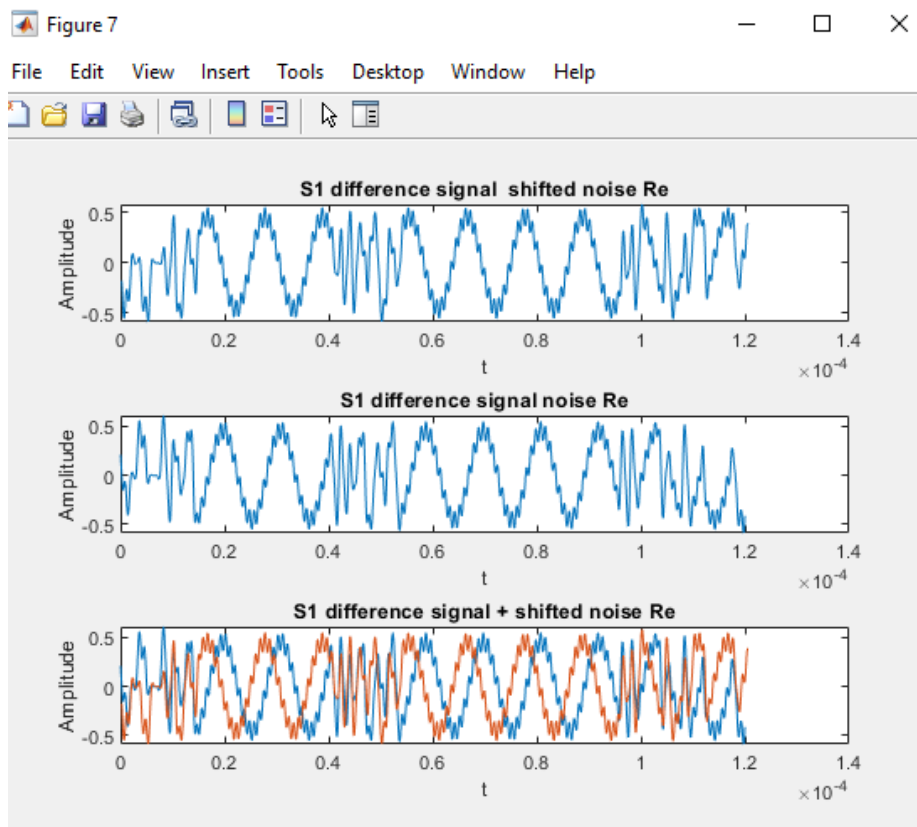
Simulovaný signál ADS-B a rozdílová reálná složka:



Obrázek 6.70: Vytvoření rozdílového signálu ze signálu ADS-B



Obrázek 6.71: Úhel mezi signály ADS-B 45°



Obrázek 6.72: Úhel mezi signály ADS-B 90°

6.3) Simulace AoA/SS a TDoA 2-D

Aircraft_position_AoA_x				x1_mlat				x2_mlat			
200x1 double				200x1 double				200x1 double			
	1	2	3		1	2	3		1	2	3
85	7.1717e+03			85	7.1717e+03			85	1.0065e+04		
86	7.1499e+03			86	7.1499e+03			86	8.9644e+03		
87	7.1281e+03			87	7.1281e+03			87	8.2337e+03		
88	7.1062e+03			88	7.1062e+03			88	7.7144e+03		
89	7.0844e+03			89	7.0844e+03			89	7.3275e+03		
90	7.0626e+03			90	7.0297e+03			90	7.0626e+03		
91	7.0408e+03			91	6.7947e+03			91	7.0408e+03		
92	7.0190e+03			92	6.6062e+03			92	7.0190e+03		
93	6.9971e+03			93	6.4534e+03			93	6.9971e+03		
94	6.9753e+03			94	6.3286e+03			94	6.9753e+03		
95	6.9535e+03			95	6.2267e+03			95	6.9535e+03		
96	6.9317e+03			96	6.1440e+03			96	6.9317e+03		
97	6.9098e+03			97	6.0775e+03			97	6.9098e+03		
98	6.8880e+03			98	6.0253e+03			98	6.8880e+03		
99	6.8662e+03			99	5.9858e+03			99	6.8662e+03		
100	6.8444e+03			100	5.9579e+03			100	6.8444e+03		
101	6.8225e+03			101	5.9408e+03			101	6.8225e+03		
102	6.8007e+03			102	5.9339e+03			102	6.8007e+03		
103	6.7789e+03			103	5.9369e+03			103	6.7789e+03		
104	6.7571e+03			104	5.9497e+03			104	6.7571e+03		
105	6.7352e+03			105	5.9725e+03			105	6.7352e+03		

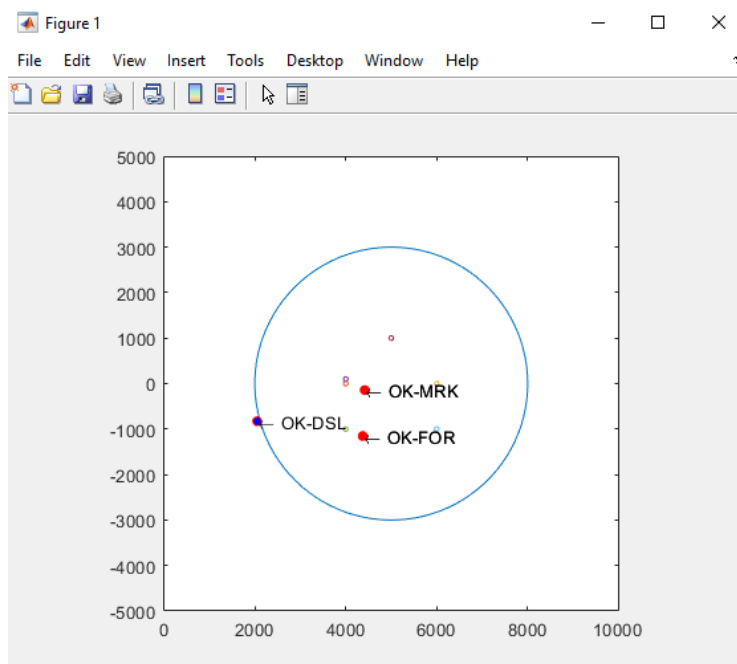
Obrázek 6.73: Porovnání dat z hyperbolického TDoA a AoA/SS pro x souřadnici

Aircraft_position_AoA_y				y1_mlat			y2_mlat				
200x1 double				200x1 double			200x1 double				
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	
73	1.7625e+03			2.4710e+03			1.7625e+03				
74	1.8400e+03			2.2626e+03			1.8400e+03				
75	1.9175e+03			2.1015e+03			1.9175e+03				
76	1.9950e+03			1.9950e+03			1.9735e+03				
77	2.0725e+03			2.0725e+03			1.8694e+03				
78	2.1500e+03			2.1500e+03			1.7832e+03				
79	2.2275e+03			2.2275e+03			1.7107e+03				
80	2.3050e+03			2.3050e+03			1.6489e+03				
81	2.3824e+03			2.3824e+03			1.5956e+03				
82	2.4599e+03			2.4599e+03			1.5492e+03				
83	2.5374e+03			2.5374e+03			1.5085e+03				
84	2.6149e+03			2.6149e+03			1.4725e+03				
85	2.6924e+03			2.6924e+03			1.4404e+03				
86	2.7699e+03			2.7699e+03			1.4116e+03				
87	2.8474e+03			2.8474e+03			1.3857e+03				
88	2.9249e+03			2.9249e+03			1.3622e+03				
89	3.0024e+03			3.0024e+03			1.3408e+03				
90	3.0799e+03			3.0799e+03			1.3213e+03				
91	3.1573e+03			3.1573e+03			1.3034e+03				
92	3.2348e+03			3.2348e+03			1.2870e+03				
93	3.3123e+03			3.3123e+03			1.2718e+03				

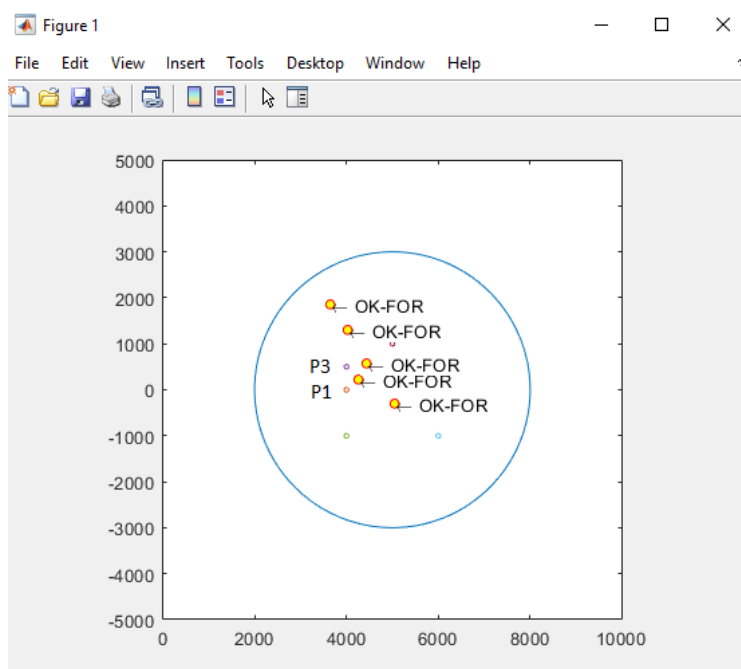
Obrázek 6.74: Porovnání dat z hyperbolického TDoA a AoA/SS pro y souřadnici

Simulátor polohy letounů:

Modrý kruh je letištní zóna, letouny jsou mimo zónu zbarveny každý jinou barvou. Uvnitř zóny jsou všechny letouny zbarveny žlutě, a v případě hrozby kolize jsou dané letouny, kterých se hrozba týká zbarveny do červena.



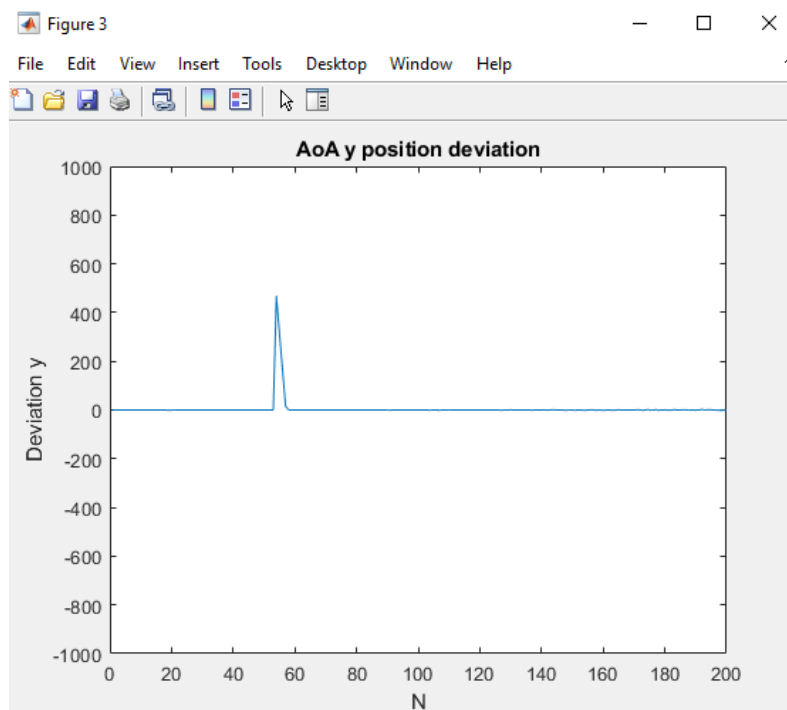
Obrázek 6.75: Anti-kolizní poplach (OK-MRK OK-FOR)



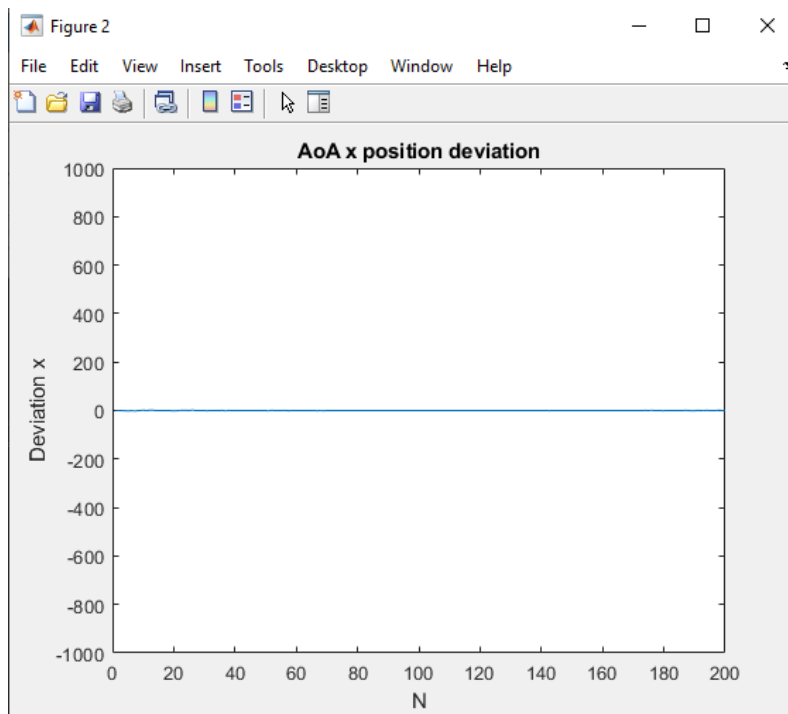
Obrázek 6.76: Neurčitost y-ové polohy mezi P1(AoA₁) a P3(SS)

Odchylka mezi generovanou souřadnicí a AoA:

- a) Vzdálenost mezi P1 a P3 500m, SNR 80dB:

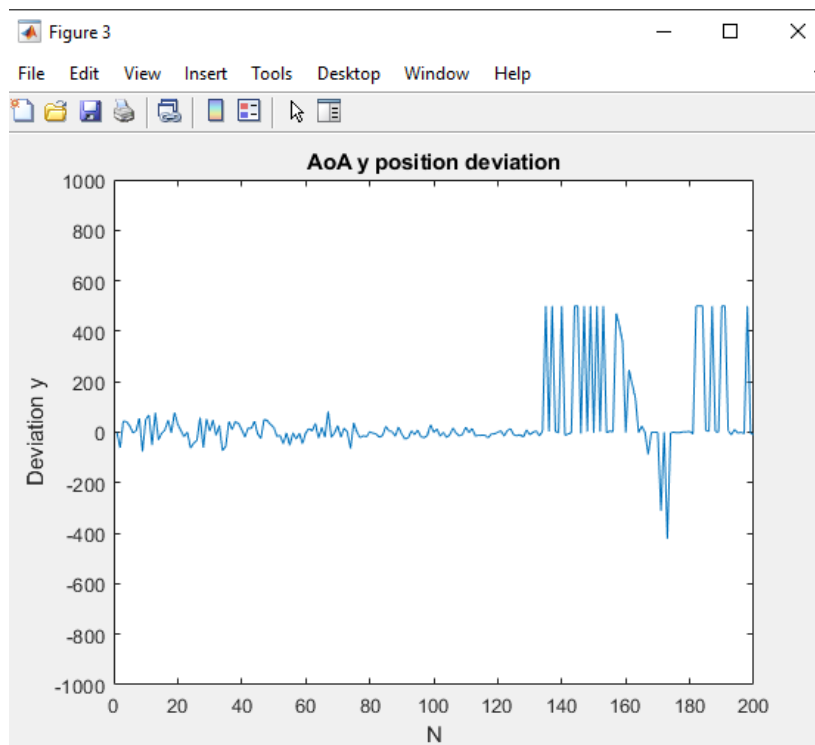


Obrázek 6.77: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 80dB |P1P3|=500m

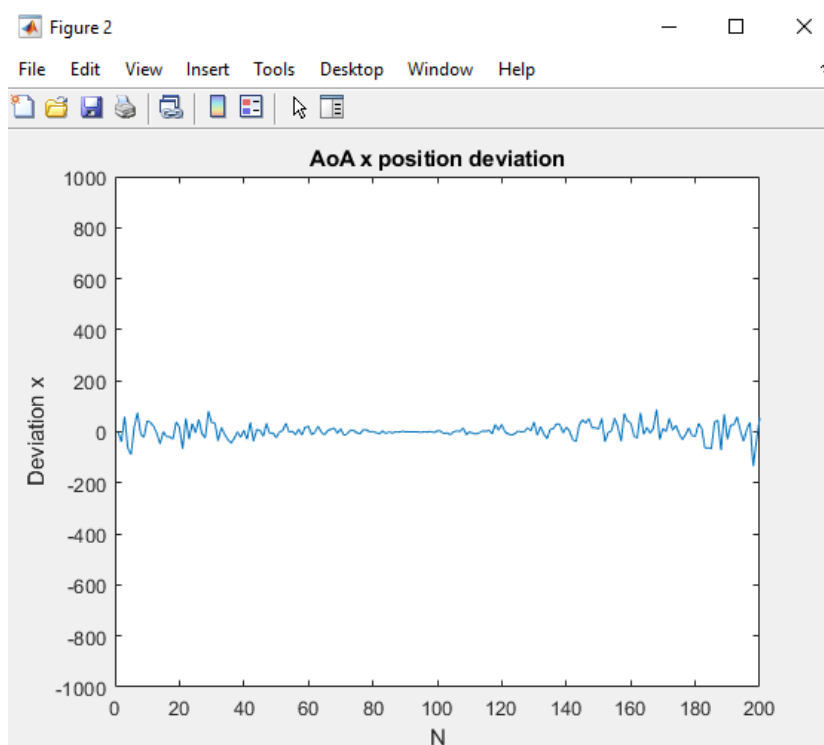


Obrázek 6.78: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 80dB |P1P3|=500m

b) Vzdálenost mezi P1 a P3 500m, SNR 40dB:

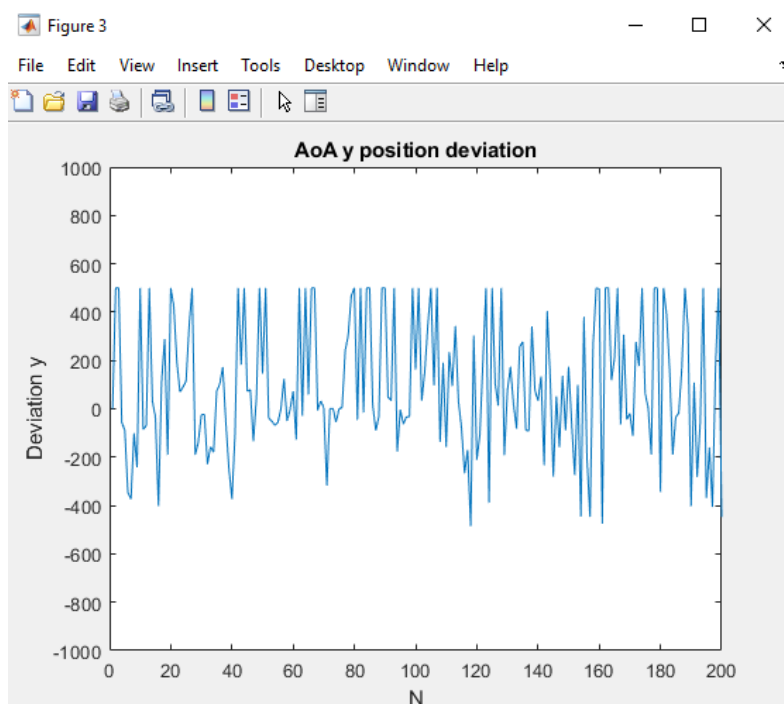


Obrázek 6.79: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 40dB |P1P3|=500m

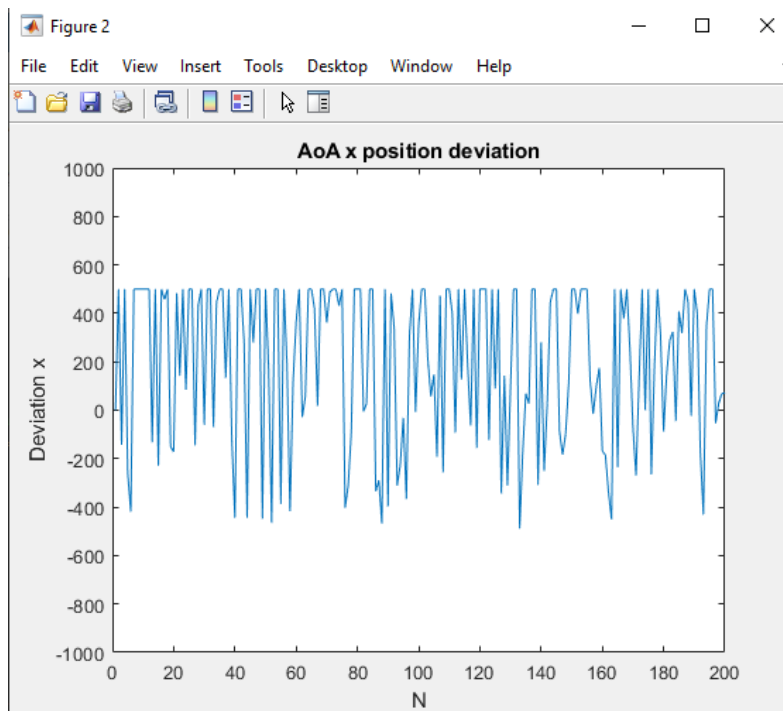


Obrázek 6.80: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 40dB |P1P3|=500m

c) Vzdálenost mezi P1 a P3 500m, SNR 20dB:

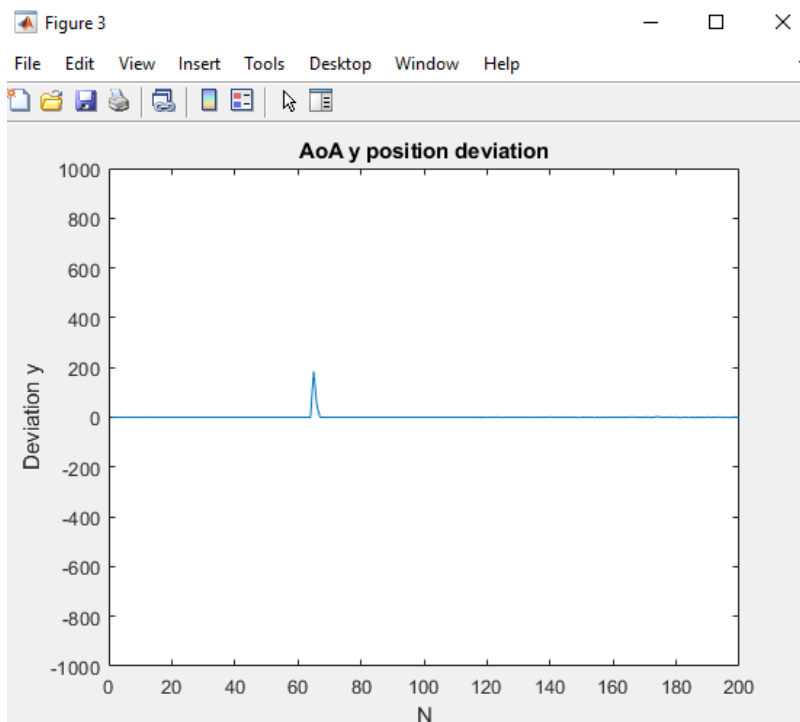


Obrázek 6.81: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 20dB |P1P3|=500m

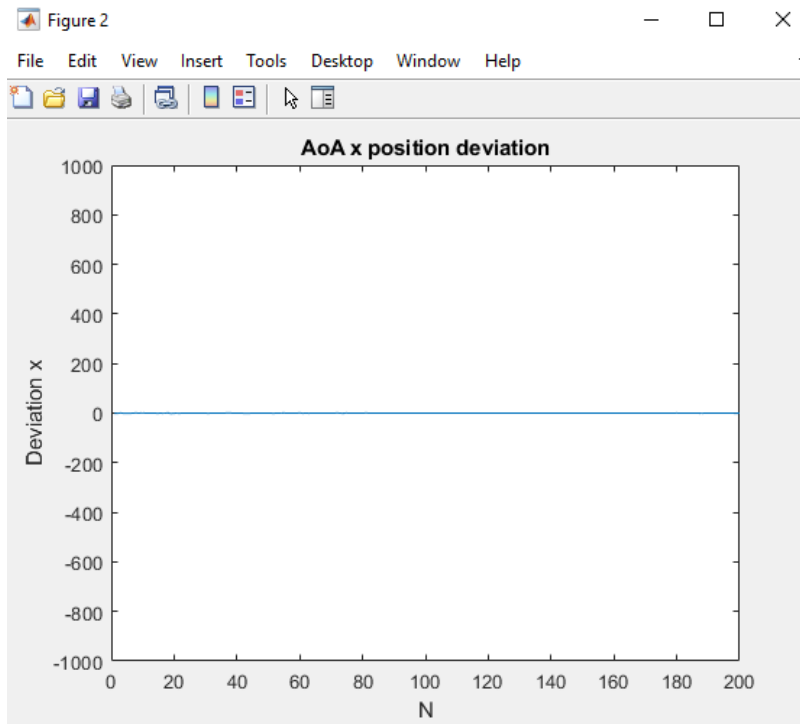


Obrázek 6.82: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 20dB $|P1P3|=500\text{m}$

d) Vzdálenost mezi P1 a P3 200m, SNR 80dB:

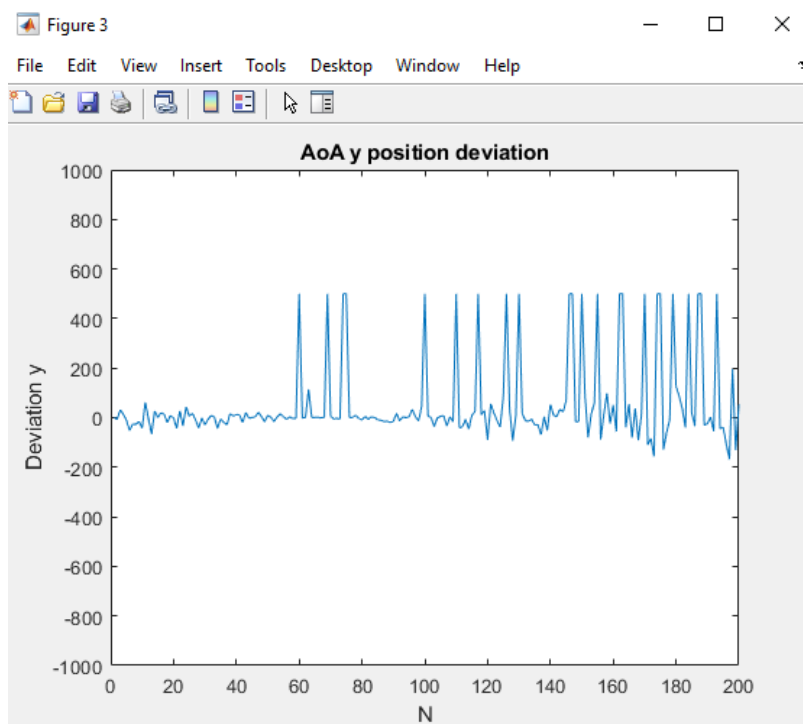


Obrázek 6.83: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 80dB $|P1P3|=200\text{m}$

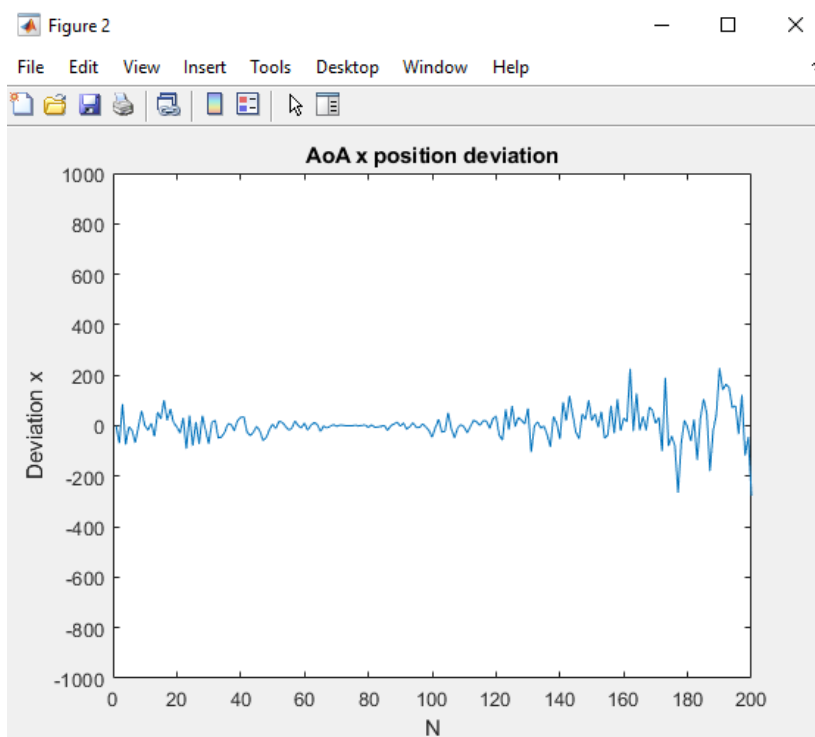


Obrázek 6.84: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 80dB |P1P3|=200m

e) Vzdálenost mezi P1 a P3 200m, SNR 40dB:

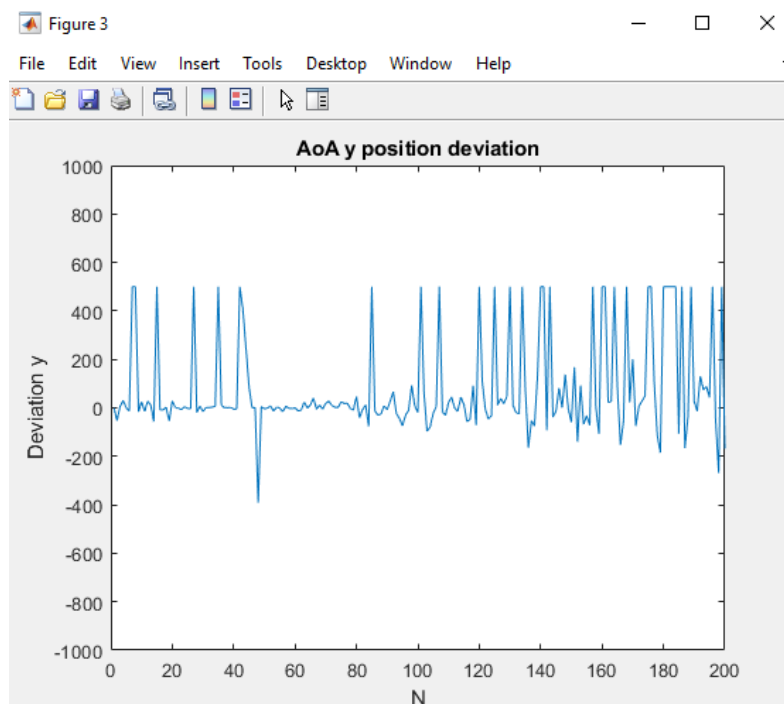


Obrázek 6.85: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 40dB |P1P3|=200m

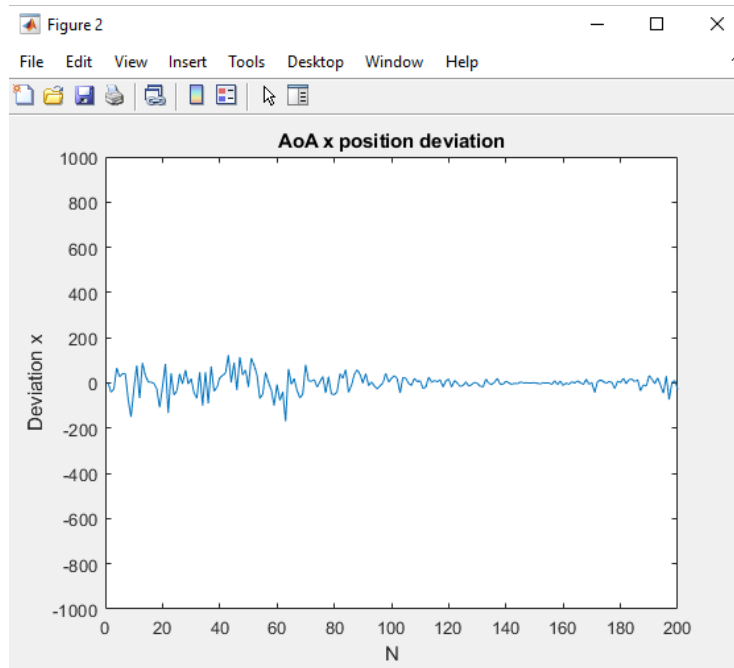


Obrázek 6.86: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 40dB |P1P3|=200m

f) Vzdálenost mezi P1 a P3 50m, SNR 40dB:



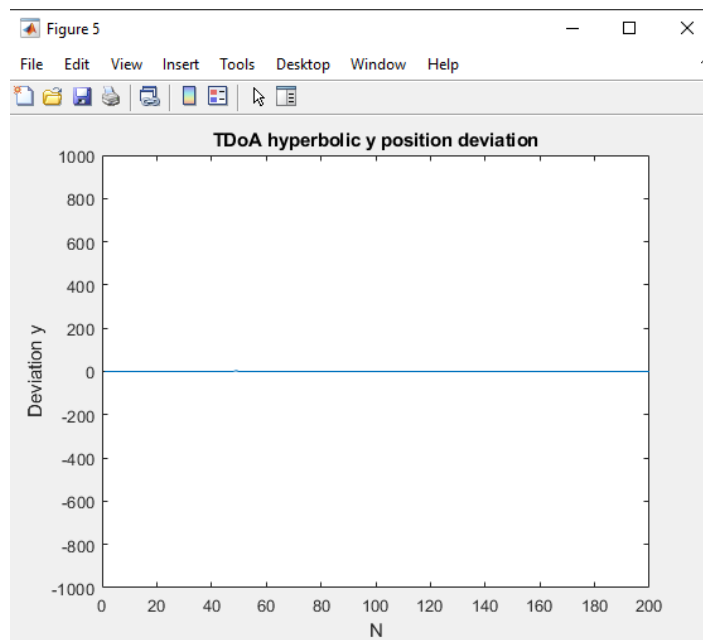
Obrázek 6.87: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 40dB |P1P3|=50m



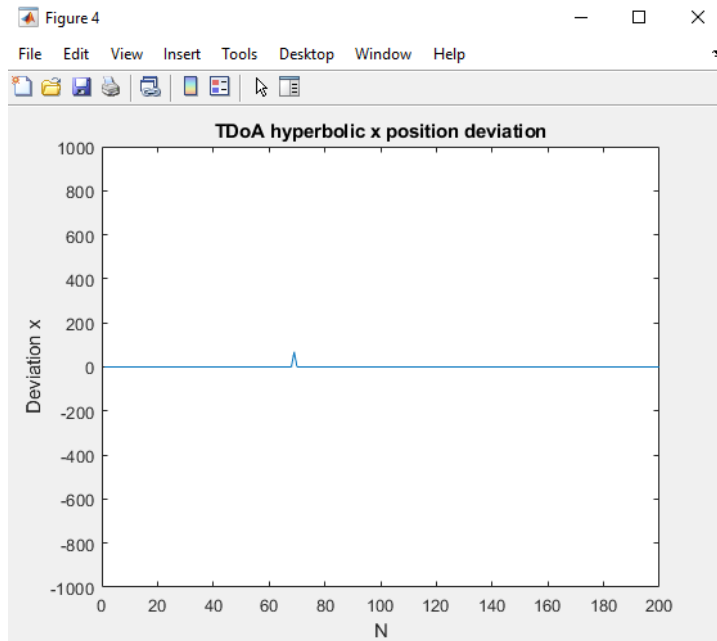
Obrázek 6.88: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 40dB |P1P3|=50m

TDoA hyperbolická metoda a AoA/ss:

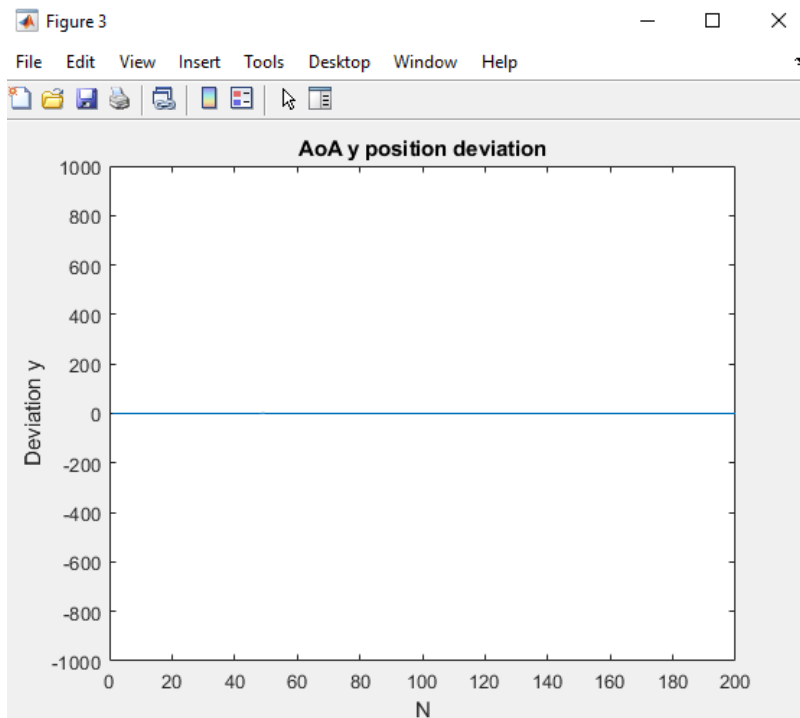
- a) Vzdálenost mezi P1 a P3 100m, SNR 120dB:



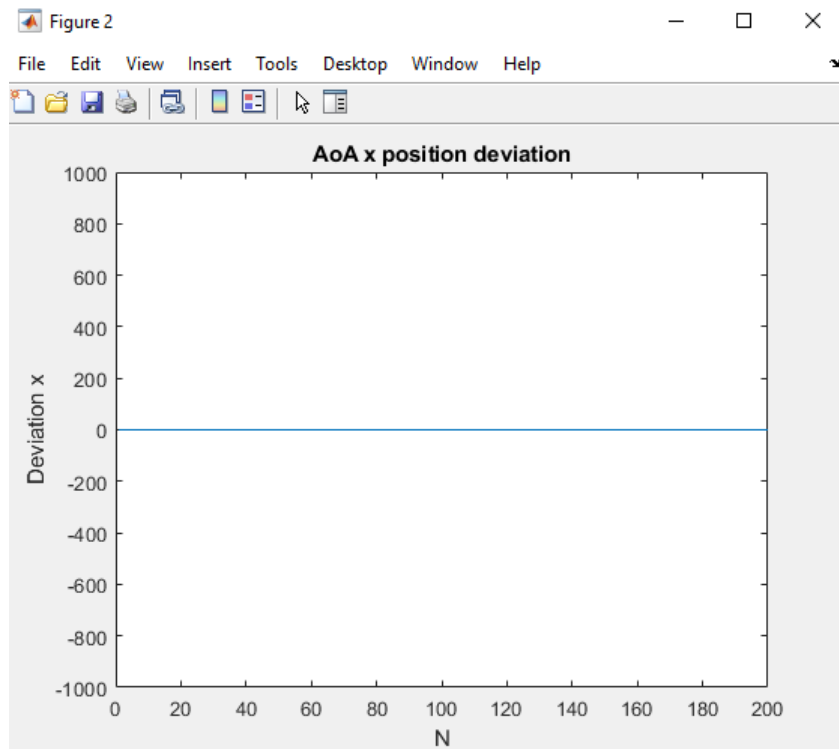
Obrázek 6.89: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a TDoA SNR 120dB |P1P3|=100m



Obrázek 6.90: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a TDoA SNR 120dB $|P1P3|=100m$

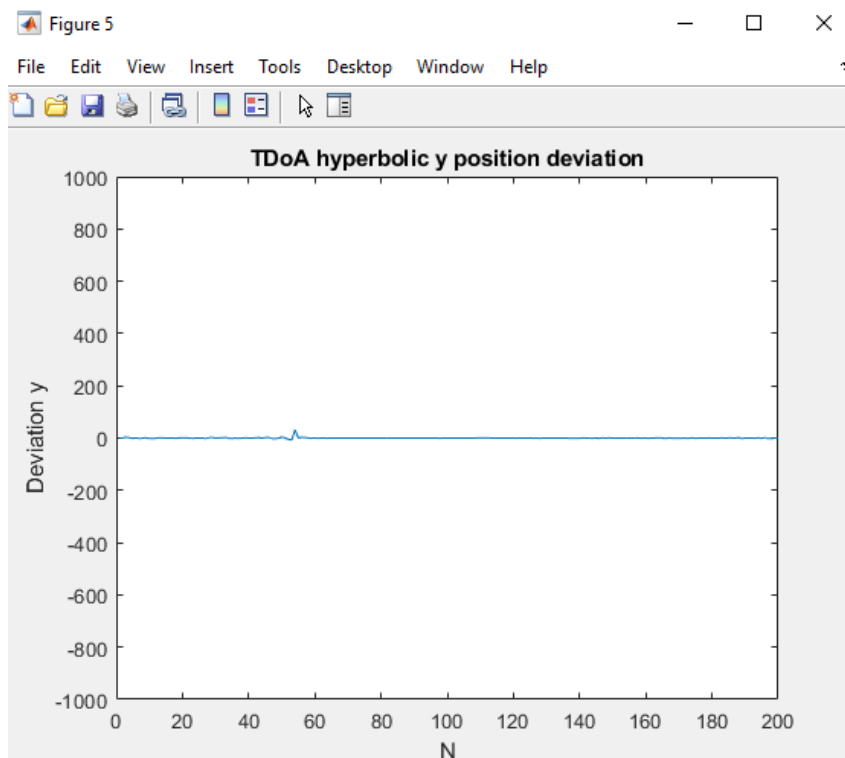


Obrázek 6.91: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 120dB $|P1P3|=100m$

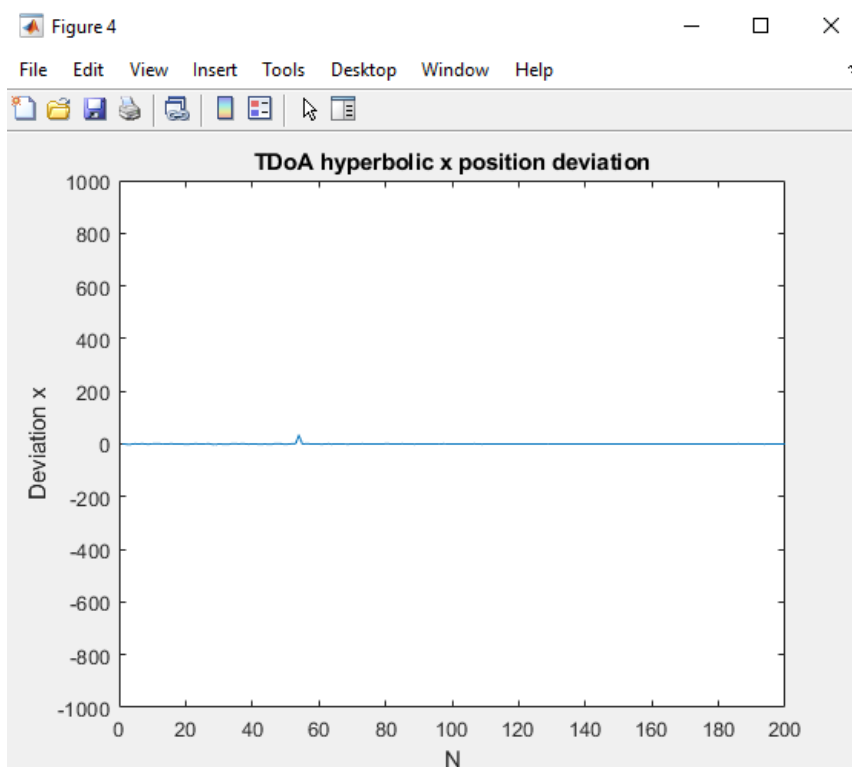


Obrázek 6.92: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 120dB $|P1P3|=100m$

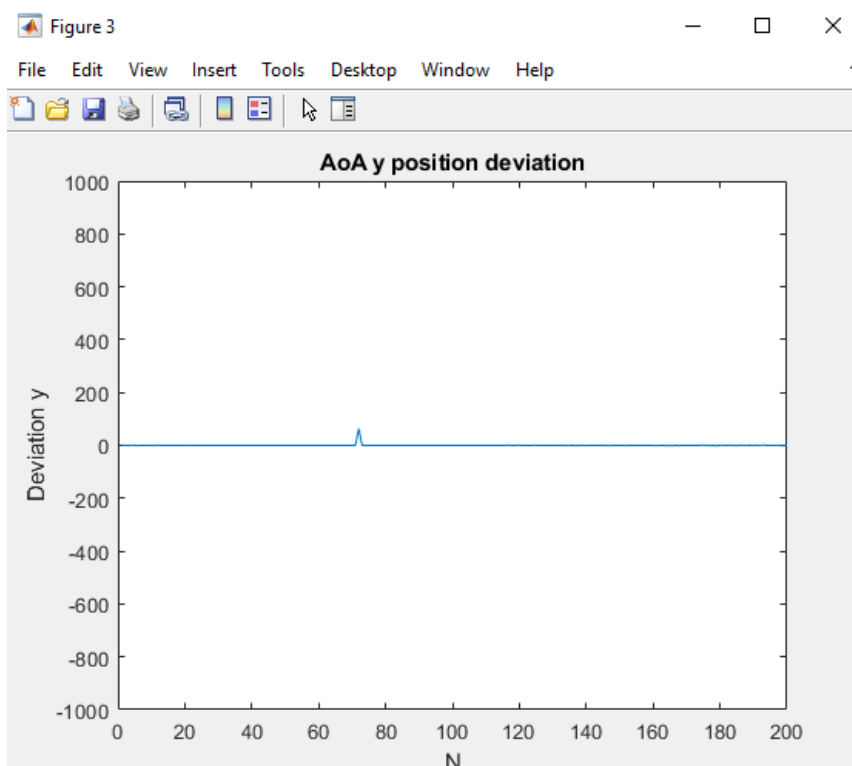
b) Vzdálenost mezi P1 a P3 100m, SNR 80dB:



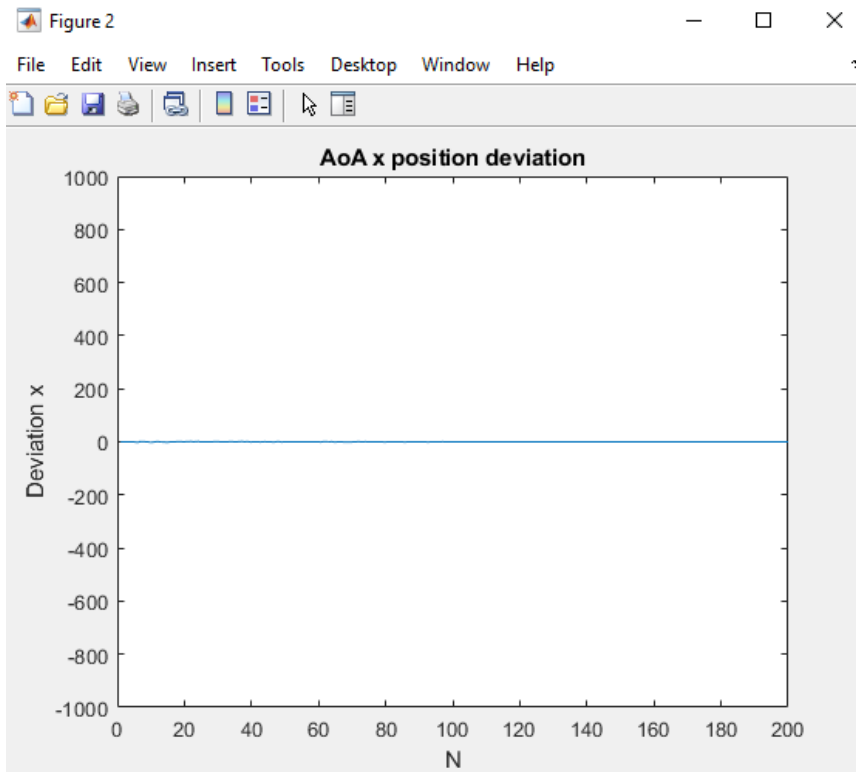
Obrázek 6.93: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a TDoA SNR 80dB $|P1P3|=100m$



Obrázek 6.94: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a TDoA SNR 80dB $|P1P3|=100m$

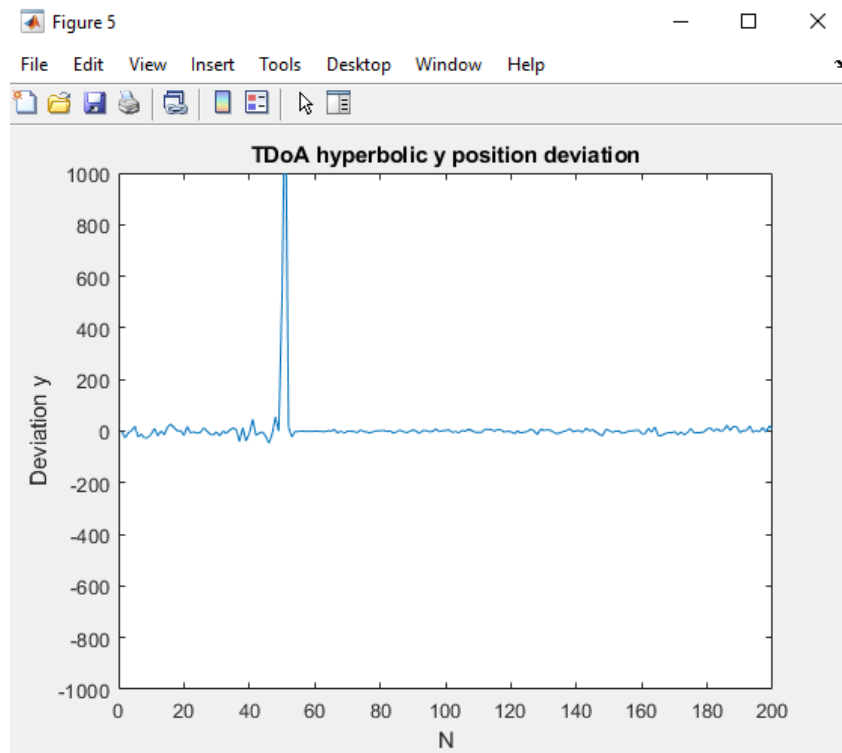


Obrázek 6.95: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 80dB $|P1P3|=100m$

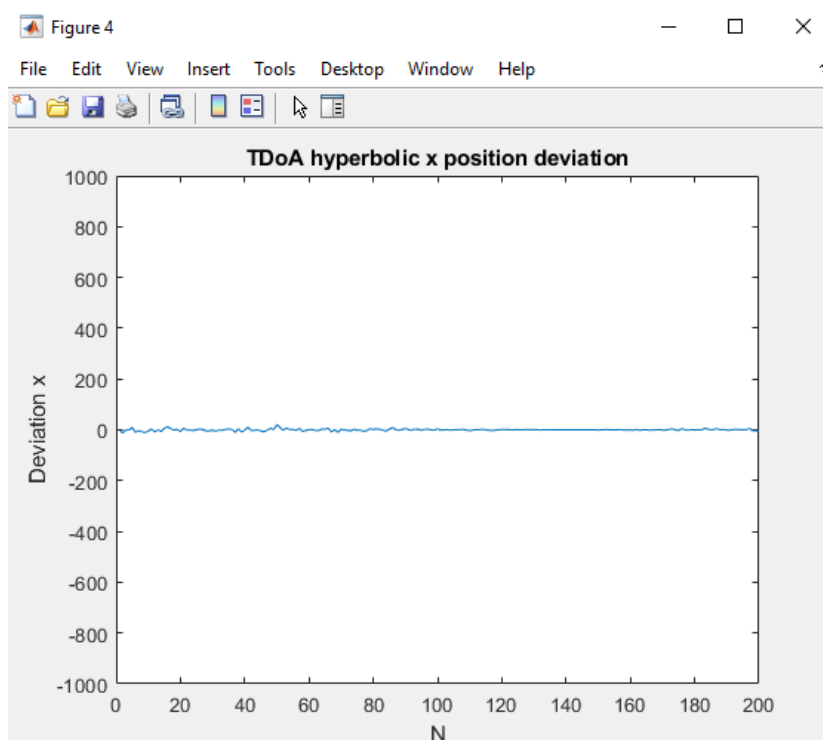


Obrázek 6.96: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 80dB $|P1P3|=100\text{m}$

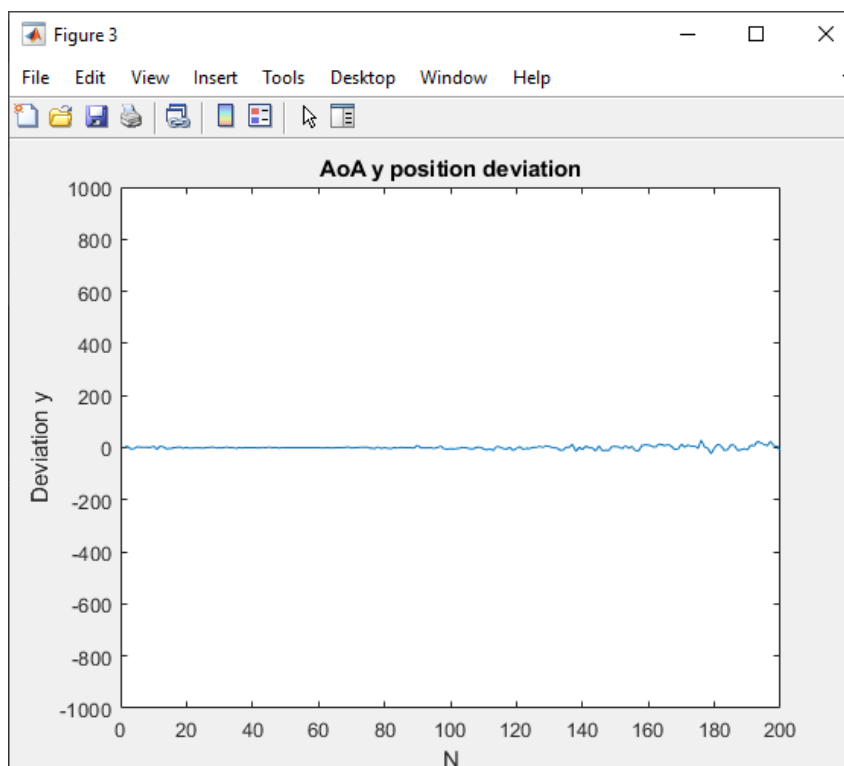
c) Vzdálenost mezi P1 a P3 100m, SNR 60dB:



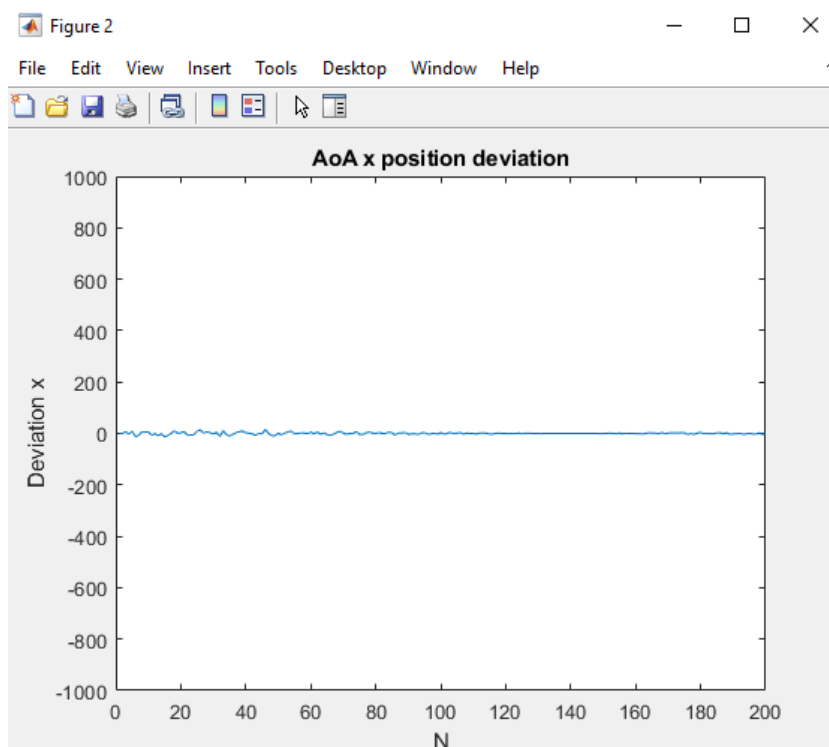
Obrázek 6.97: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a TDoA SNR 60dB $|P1P3|=100\text{m}$



Obrázek 6.98: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a TDoA SNR 60dB $|P1P3|=100m$

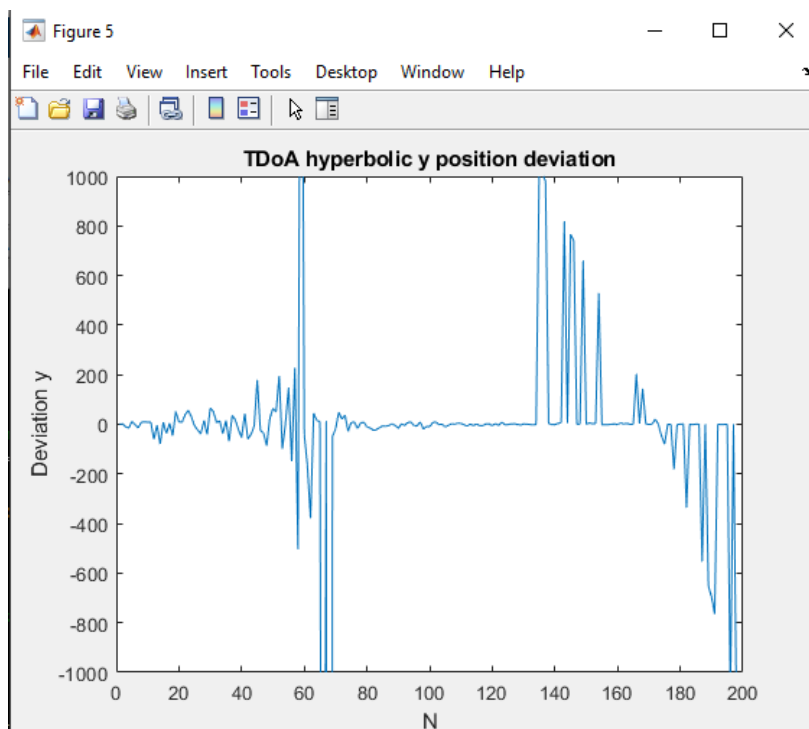


Obrázek 6.99: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 60dB $|P1P3|=100m$

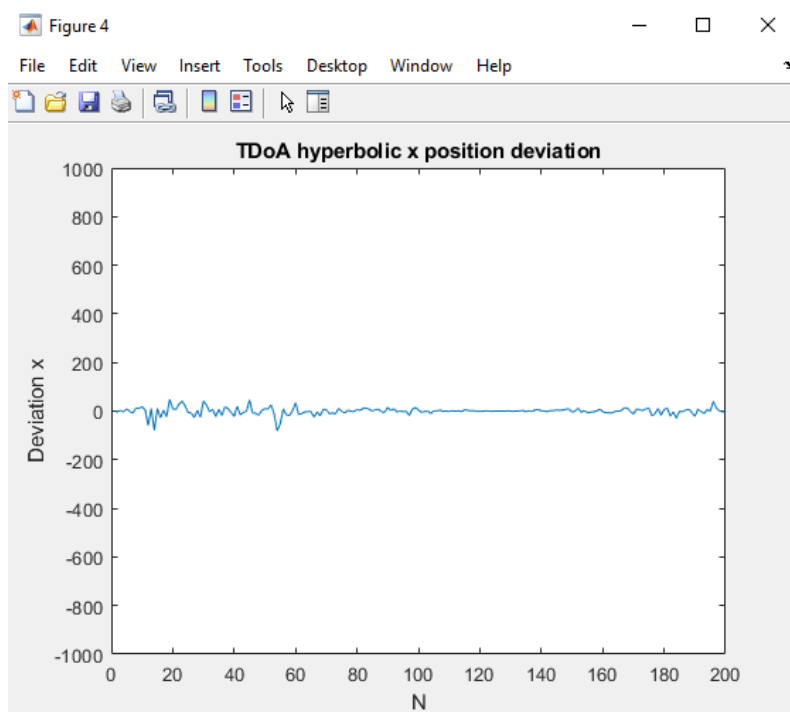


Obrázek 6.100: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 60dB $|P1P3|=100m$

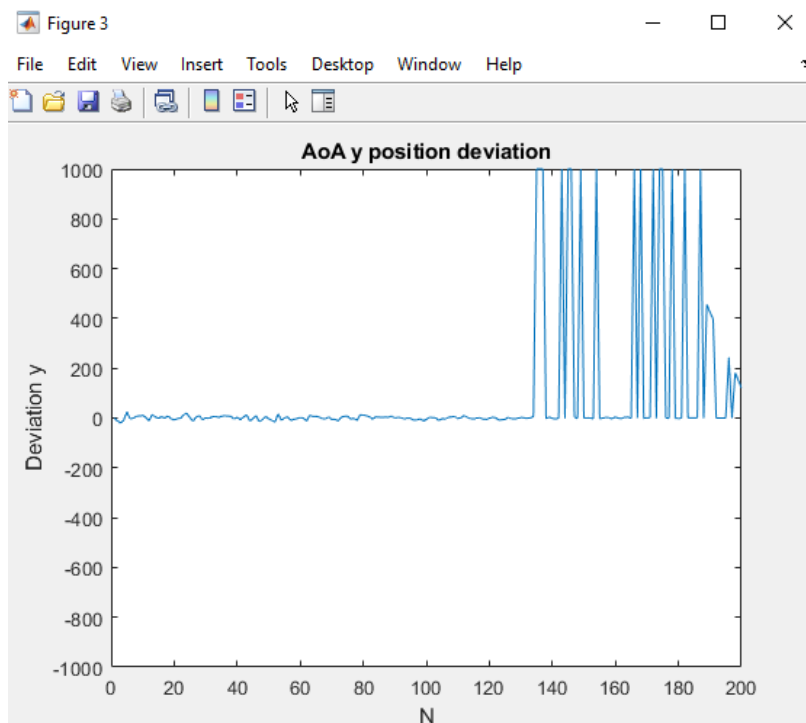
d) Vzdálenost mezi P1 a P3 100m, SNR 50dB:



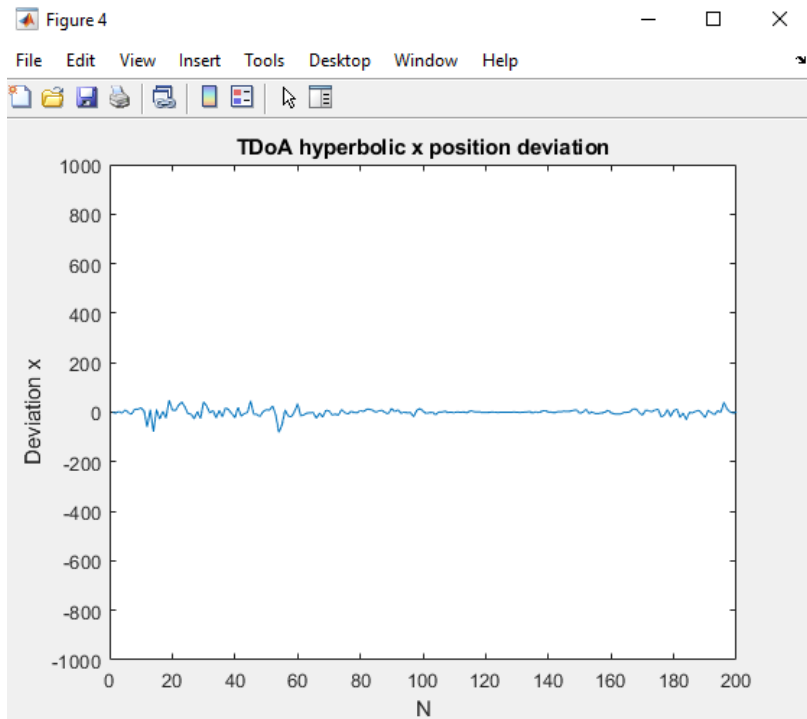
Obrázek 6.101: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a TDoA SNR 50dB $|P1P3|=100m$



Obrázek 6.102: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a TDoA SNR 50dB $|P1P3|=100m$



Obrázek 6.103: Odchylka mezi generovanou y-ovou souřadnicí a AoA SNR 50dB $|P1P3|=100m$



Obrázek 6.104: Odchylka mezi generovanou x-ovou souřadnicí a AoA SNR 50dB $|P1P3|=100\text{m}$

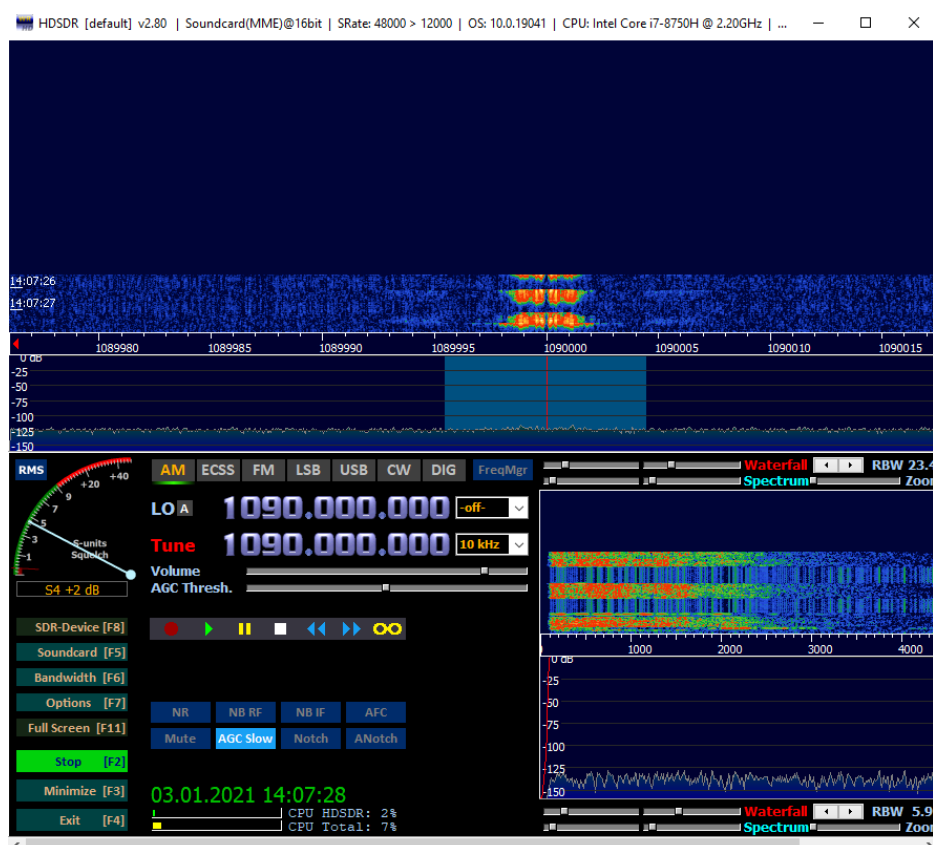
Kapitola 7

7) Měření na reálných datech

K ověření zpracování ADS-B signálu bylo použito SDR DVB-T+FM+SDR s malou přídatnou všesměrovou anténou (neznámého typu a parametrů). Dále byly otestovány dva typy ovládání.

- Pomocí softwaru *HSDR*, který je volně stažitelný[14][15]
- Pomocí matlab toolboxu pro komunikaci s SDR *RTL-SDR*, který je potřeba stáhnout z domovské stránky matlabu [16].

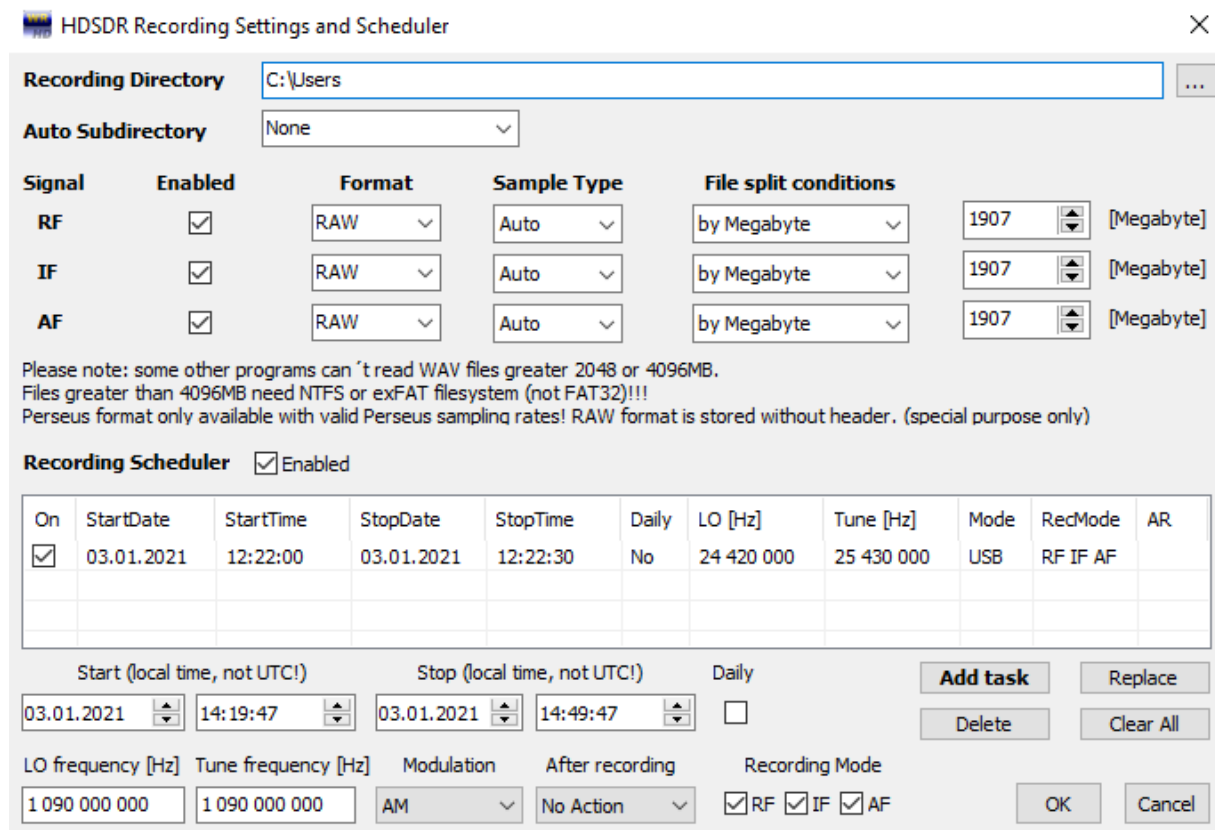
Oba přístupy však vedou na zpracování naměřených dat v matlabu. Samotné SDR může být ovládáno pouze jedním zvoleným přístupem v daném čase. Příkladem je to, že jeli zrovna SDR ovládáno toolboxem, program HSDR nelze spustit, a naopak jeli řízen pomocí HSDR, matlab hlasí chybovou hlášku o chybějícím zařízení.



Obrázek 7.1: HSDR software

Zde se nastaví hledaný kmitočet, v tomto případě 1090Mhz. Pomocí záložky *Recording Settings and Scheduler* se provede nastavení doby, kdy má měření začít, skončit, případně jaký formát dat má být

použit pro uložení, a do jaké složky má být záznam uložen. Před samotnou instalací je potřeba nainstalovat USB driver (v tomto případě driver *Zadic*[17]), a dále knihovna *ExtIO_RTL2832.DLL*[15].



Obrázek 7.2: HSDR nastavení nahrávání

Kód pro načtení dat do matlabu z *HSDR* obstará funkce `loadRTLSDRFile`:

```
function y = loadRTLSDRFile(filename)
% y = loadRTLSDRFile(filename)
%
% reads complex samples from the rtlcdr file

fid = fopen(filename, 'rb');
y = fread(fid, 'uint8=>double');
y = y-127.5;
y = y(1:2:end) + i*y(2:2:end);
```

Kód pro samotné zpracování:

```
clear all
close all
clc
```

Načtení dat z *HSDR* pro zpracování do proměnné a:

```
a = ['ads_test.raw']
hdr_file = loadRTLSDRFile(a);
```

Vykreslení komplexních hodnot I,Q z načteného souboru:

```
figure(1)
plot(abs(hdr_file))
title('ADS-B')
xlabel('time(t)')
ylabel('Magnitute')
```

Větší rozlišení dat v čase (5x):

```
interpFIR=dsp.FIRInterpolator(5);
```

Načtení do proměnné data pomocí *HSDR* z SDR:

```
data = step(interpFIR,hdr_file);
```

Načtení do proměnné data pomocí toolbox RLT-HDR z SDR[18]:

```
RX = comm.SDRRTLReceiver('0','CenterFrequency',1090e6,...
'EnableTunerAGC',false,'TunerGain',60,'SampleRate',2.4e6,...
'OutputDataType','single','SamplesPerFrame',262144,...
'FrequencyCorrection',0)
```

```
IQSamples = step(RX);
```

```
%data = step(interpFIR,IQSamples);
```

```
figure(2)
plot(data)
title('ADS-B')
xlabel('time(t)')
ylabel('Magnitute')
```

Korelace mezi preambulí ADS-B signálu a naměřeným signálem z SDR:

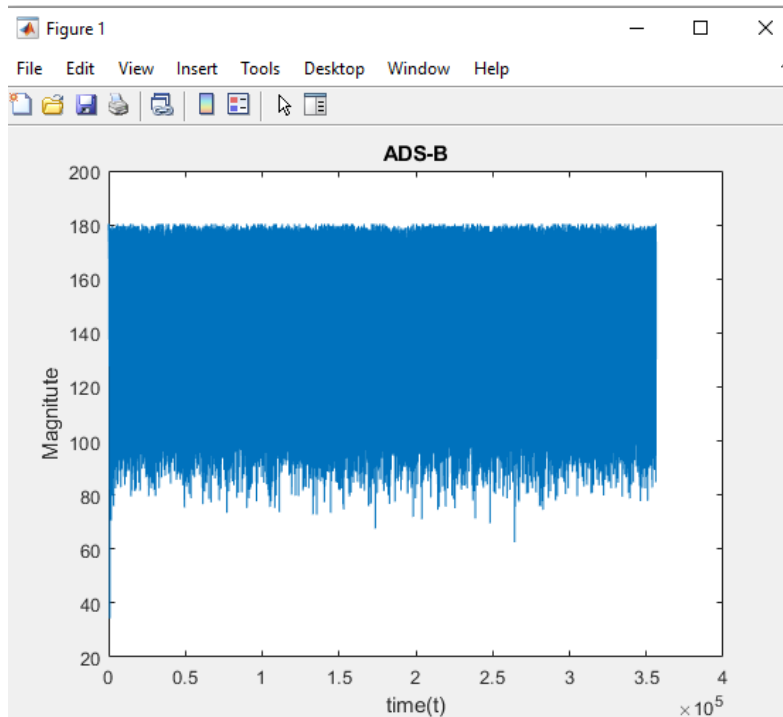
```
% Calculate correlation to ADS-B preamble (Use this calculation to find
message bit #1)
```

```
figure(3)
subplot(2,1,1)
preamble = [ones(1,6) zeros(1,6) ones(1,6) zeros(1,24) ones(1,6)...
zeros(1,6) ones(1,6)];
correlatedData = xcorr(preamble', flipud(double(abs(data))));
plot(preamble)
title('ADS-B preamble')
xlabel('sample number')
ylabel('Magnitute')
```

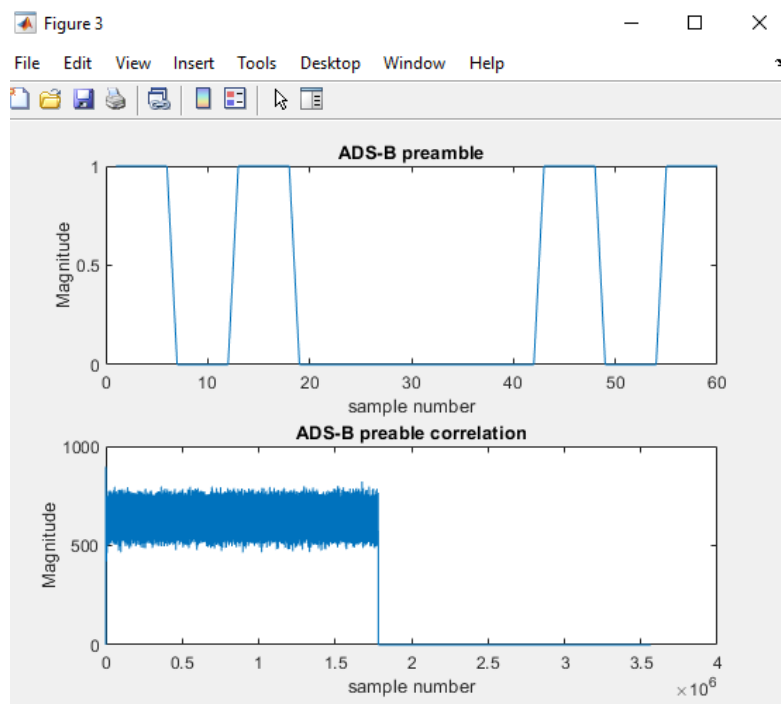
```
subplot(2,1,2)
plot(correlatedData)
title('ADS-B preable correlation')
xlabel('sample number')
ylabel('Magnitute')
```

Kapitola 8

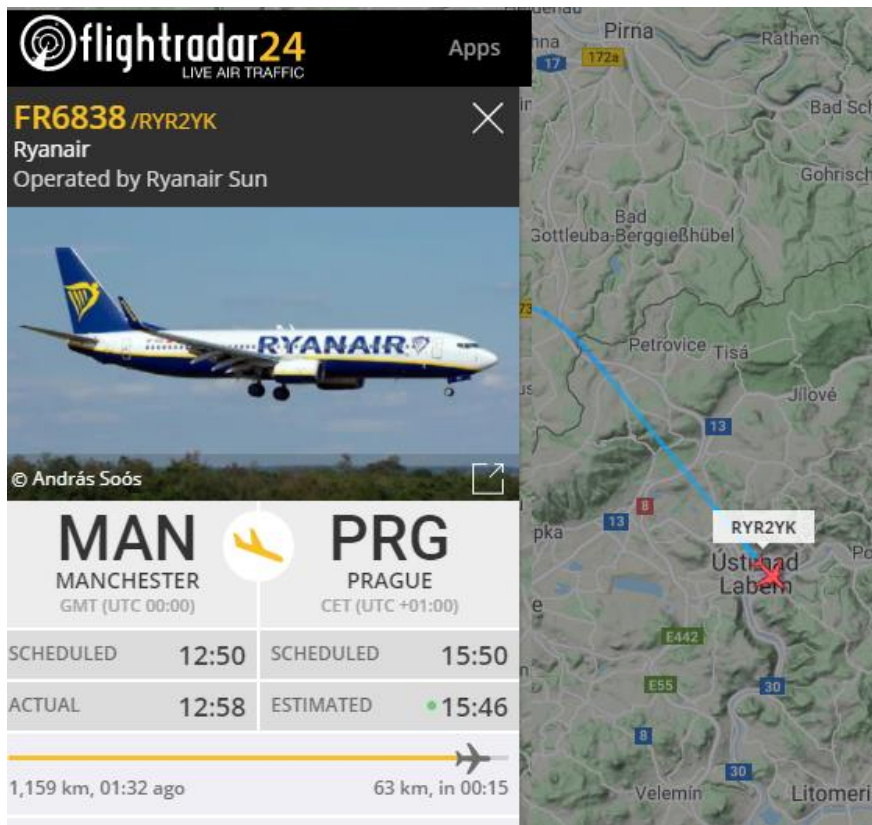
8) Výsledky měření



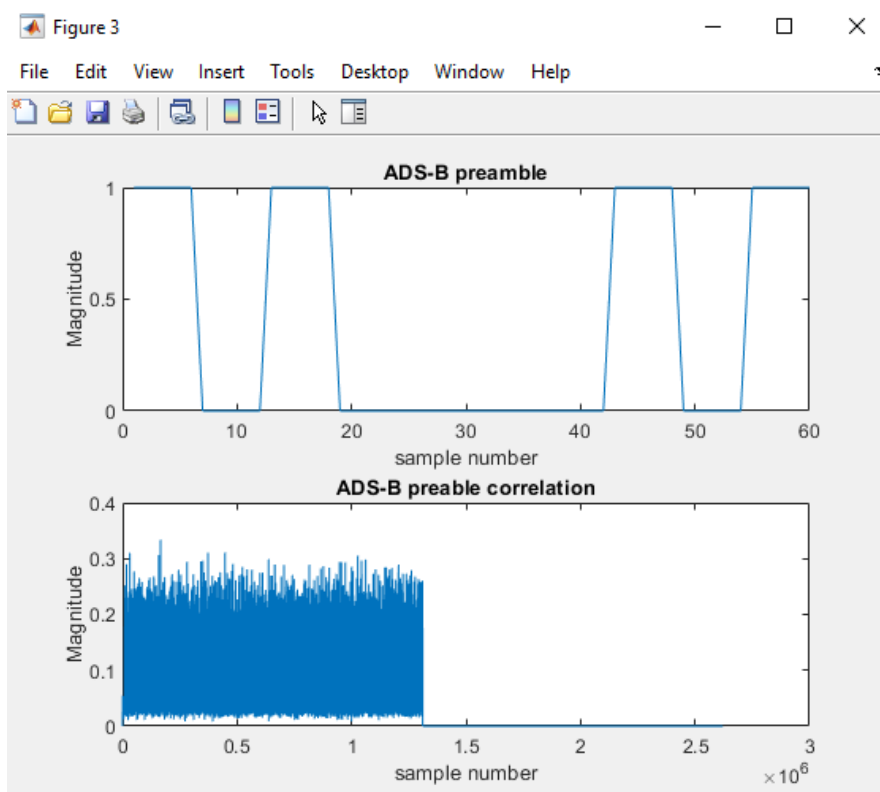
Obrázek 8.1: Nahrání dat z HSDR do matlabu, pokus o detekci ADS-B



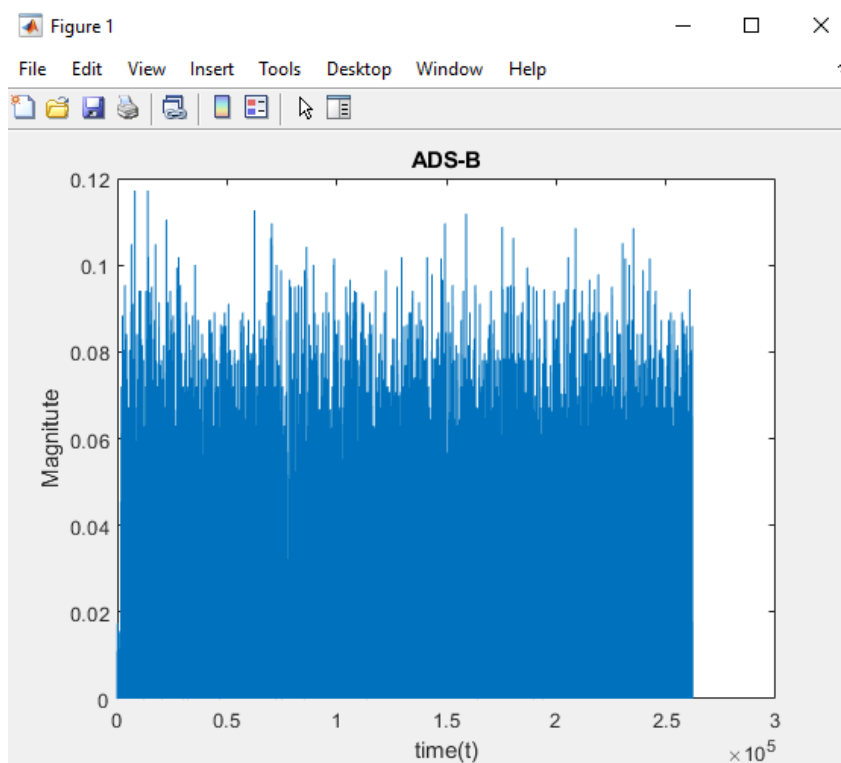
Obrázek 8.2: Vygenerování preamble ADS-B, pokus korelaci s naměřenými daty



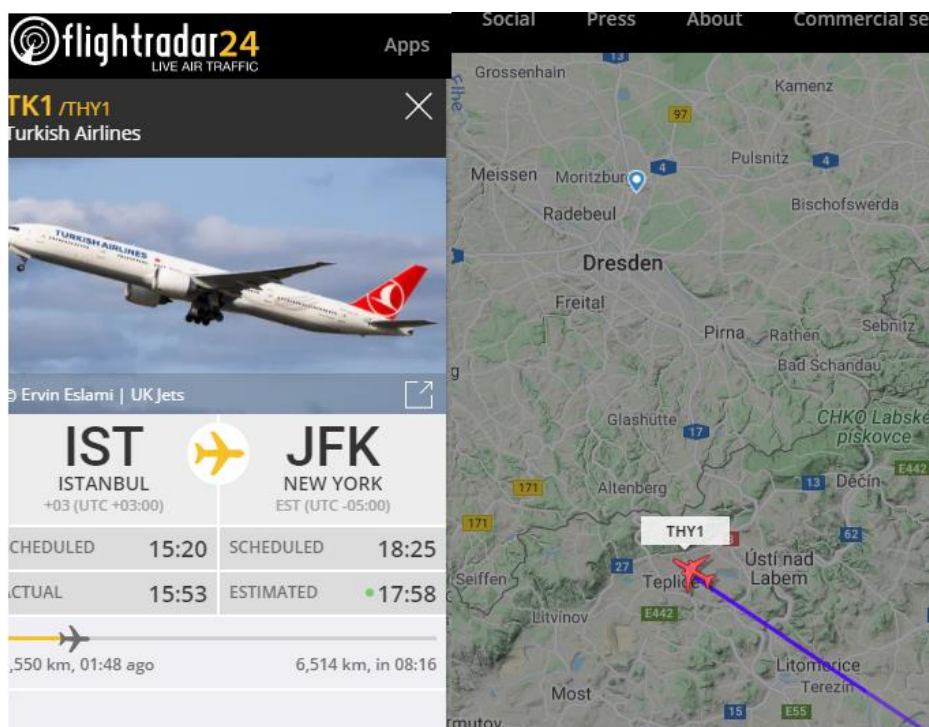
Obrázek 8.3: Kontrola provozu na Radar24 Ryanair



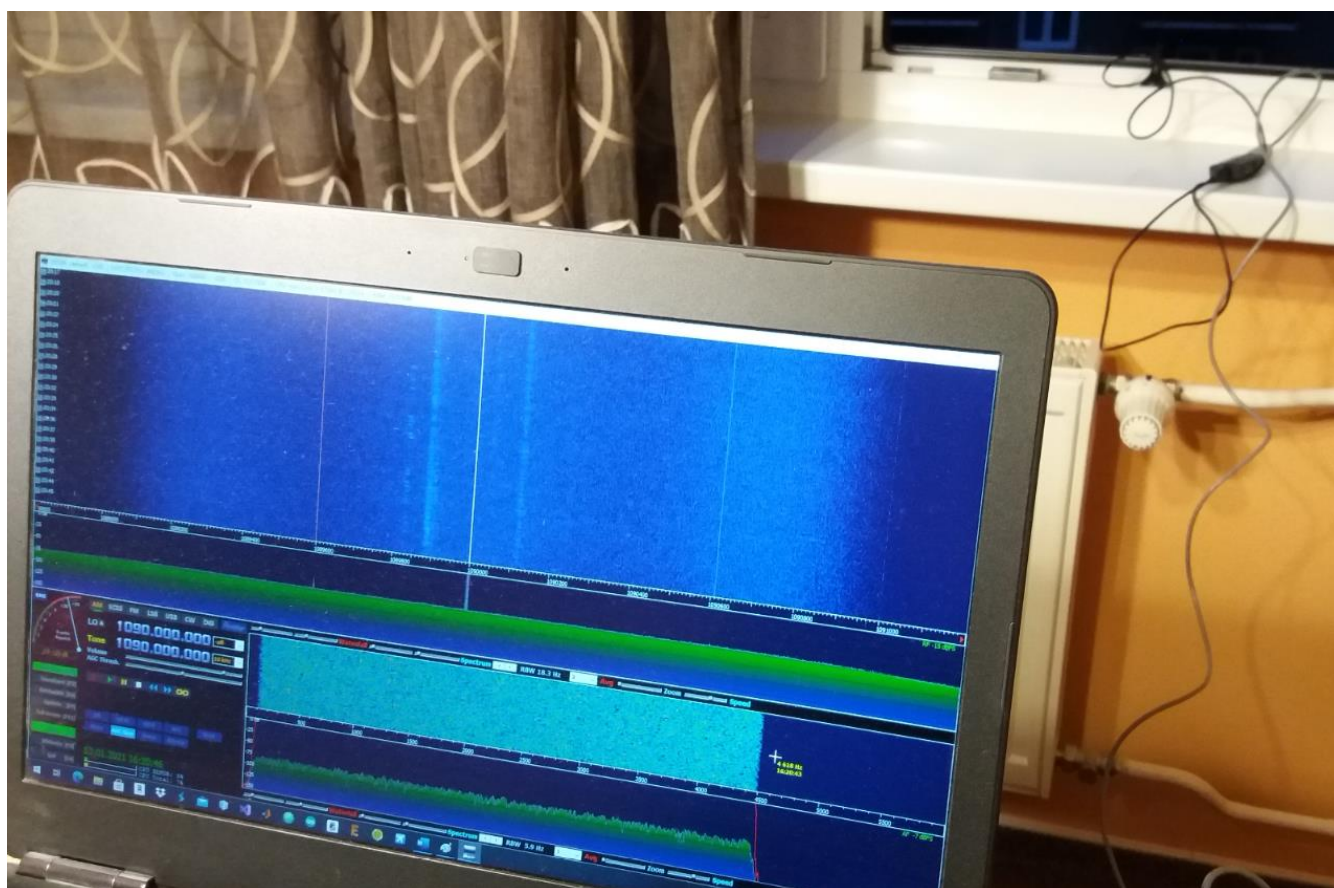
Obrázek 8.4: Vygenerování preamble ADS-B, pokus korelaci s naměřenými daty z SDR toolbox



Obrázek 8.5: Naměřená data pomocí SDR toolbox



Obrázek 8.6: Kontrola provozu na Radar24 Turkish Airlines



Obrázek 8.7: Zapojení SDR s notebookem

Kapitola 9

9) Závěr

V této práci jsem se zabýval řešením problémů pro MLAT s využitím ADS-B signálu. Prvním úkolem bylo otestování korelačních funkcí na vygenerovaném signálu ADS-B. Protože rozpoznávání různých signálů bylo provedeno pomocí vyhodnocování maxim korelačních funkcí, byl testován vliv délky repliky, tedy předem známého signálu na počet maxim korelační funkce a bylo ověřeno, že pro tento účel stačí replika o délce 20 až 30us. Takový to úsek již pokrývá kromě preambule data, která jsou pro konkrétní ADS-B signál, neboli letadlo unikátní. Ze simulací také vyplynulo, že nejvýhodnější by bylo použití signálu, který by byl paralelně naměřený, a který by obsahoval stejný šum. Tím vychází ostré korelační maximum. To je však pouze teoretická úvaha, která není prakticky realizovatelná, neboť při měření signálu na každém z kanálů dojde k zarušení odlišným šumem.

Dalším úkolem bylo ověření postupů pro výpočet úhlu, TDoA na fázové anténě. Testovacího signálu simulující ADS-B charakterizovaný PPM modulací tedy, pulzy se symboly „1“ a „0“ byl modulován nosnou vlnou. Poté byl tento modulovaný signál rozložen na reálnou a imaginární část, což vedlo na signál s nižší frekvencí vhodnější pro zpracování. Za použití vztahu pro úhel mezi vektory, byl spočítán fázový posuv. Z výsledků simulace vyplynulo, že je vhodnější pro výpočet úhlu použít obě komplexní komponenty, které se následně aritmeticky zprůměrují. Zároveň byl otestován vliv symbolu „-1“ místo symbolu „0“ tam, kde se vyskytuje více „0“ jdoucích po sobě. V případě použití symbolu „-1“ místo „0“ by pro výpočet úhlu stačila pouze reálná, nebo pouze imaginární složka. V případě ponechání symbolu „0“ by při použití pouze reálné nebo imaginární složky vedlo na nutnost synchronizace na periodu rozdílového signálu, což vyžaduje náročnější postupy. Dále byl testován vliv šumu na výpočet úhlu. Tento vliv byl testován pro úhly 45° a 90° pro vstupní a výstupní šum (označen v grafech jako input/output noise) v rozsahu SNR 50dB až -50dB Vlivem filtru typu dolní propust byl šum, respektive jeho vliv na výpočet úhlu na vstupním rozdílovém signálu celkem dobře potlačen do úrovně šumu - 50dB. Vliv přidání šumu za filtrem však vedl k rapidnímu zhoršení výsledků. Tento šum simuloval rušení na lince při přenosu naměřených, ale ještě nezpracovaných dat. Při použití SNR 10dB a méně byla data nepoužitelná. Algoritmus byl testován v prostředí matlab/simulink. Na závěr byl otestován na vygenerovaném ADS-B signálu. Hodnoty úhlů, a časových posuvů které byly v simulinku měřeny pomocí simulace jsou zatíženy nepatrnou chybou zaokrouhlováním, chybou při manipulaci kurzorů (kontrolní odečty časového zpoždění obdelníkového signálu simulující ADS-B) a také nenulovou chybovostí implementovaných metod. Například hodnota úhlu 0° je zobrazena jako velmi malé desetinné číslo, řádově E-04 (viz. tabulky hodnot vedle grafů).

Třetím úkolem bylo ověřit metody směrového zaměření. Pro tento účel byl vybrána metoda AoA v kombinaci s metodou SS a 2-D hyperbolická metoda. Na vytvořeném simulátoru v matlabu, který umí také detekovat kolize mezi letouny jsem ověřil principy těchto metod zaměřování. V tomto simulátoru je možné simulovat několik letounů najednou, nicméně pro lepší výkon simulace je vhodné zvolit

maximálně čtyři letouny. Výsledné grafy zobrazují odchylky mezi skutečnými souřadnicemi letounu vygenerovanými simulací a souřadnicemi, které byly stanoveny na základě principů směrového zaměřování. Metoda AoA/SS, která byla implementována vykazuje relativně dobré výsledky. Jak bylo zmíněno v kapitole 5, projevuje se vliv délky stanice SS od jedné ze stanic AoA, při kterém se projevuje neurčitost y-souřadnice. Zároveň se potvrdil předpoklad, čím jsou stanice, respektive body P1 a P3 (AoA přijímač jako P1 a SS přijímač jako P3) blíže u sebe, jsou méně odolné proti šumu.

Poslední část se týkala reálných dat naměřených pomocí SDR. Zde byl problém, že dostupné SDR(SDR DVB-T+FM+SDR) bylo jednokanálové, a tudíž principy směrového zaměření nemohli být otestovány. Bylo tedy alespoň vyzkoušeno změření dat pomocí SDR a následné nahrání do matlabu. Podle aplikace Radar24 byl v době měření detekován letecký provoz, který však byl ve velké výšce, a proto i když jsem se snažil v danou chvíli detekovat signál ADS-B na 1090MHz, s největší pravděpodobností nedošlo k detekci, ale jednalo se pouze o šum pozadí.

Během této práce nebyly samozřejmě prověřeny všechny aspekty, které mají na MLAT vliv. Jeden dalších možných úkolů by bylo prozkoumat vliv Dopplerova jevu na příjem signálu a výpočet úhlu pro AoA. Další možné vylepšení by byla kombinace dekodování ADS-B a principů MLAT pro zvýšení robustnosti a spolehlivosti celého systému.

Přílohy

ATC_vol1.m

ATC_vol2.m

fi_test.file

untitled.slx

ADSB.m

bindiv.m

kodovaniadsb.m

message1.m

message2.m

parsekvence.m

preamble.m

Seznam použité literatury

- [1] Pavel Puričer *fel čvut RNAV – Rádiové navigační systémy, radarová technika*. Dostupné z:
- [2] Filip Štunc Dekódování ADS-B signálu. Dostupné z:
<https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/65307/F3-BP-2016-Sturc-Filip-Dekodovani%20ADS-B%20signalu.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [3] Vít Vojtěch *Fakulta dopravní, Monitorování vysílání palubních SSR odpovídačů v reálném prostředí*. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/74080/F6-DP-2017-Vojtech-Vit-DPV2017.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [4] EUROCONTROL. Mode S Elementary Surveillance (ELS) Operations Manual [online]. In: . 2011 [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/publication/mode-s-elementary-surveillance-els-operations-manual>
- [5] Moderní letecká navigace. Dostupné z: <http://www.airnav.eu/index.php?stranka=adsb>
- [6] Doc. Dr. Ing. Pavel Kovář *fel čvut, Základy rádiové digitální komunikace*. Dostupné z:
https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjPje-FgtHsAhXj-SoKHQtXA9kQFjACegQIAxAC&url=http%3A%2F%2Fradio.feld.cvut.cz%2Fcourses%2FX37DK2_templat e%2Fmaterialy.php%3Fakce%3Ddlf%26zdroj%3Dvpm%26fkey%3D18%26xtgt%3D2f686f6d652f53657 276696365732f777772f68746d6c2f6564755f6465706f742f2f593337424b53&usq=A0vVaw2jwT6x0l lc08c_ioFVOQdp
- [7] Doc. Dr. Ing. Pavel Kovář *fel čvut RNAV - Rádiové navigační systémy, radarová technika*. Dostupné z:
https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/185721/mod_resource/content/1/1.%20%C3%9A%20v%20d%20n%20%C5%99%20e%20d%20n%20%C3%A1%20C5%A1%20ka.pdf
- [8] Michal Ehl, DiS *Základy určování polohy mobilních zařízení Fundamentals of Mobile Devices Positioning*. Dostupné z:
http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/104177/EHL0007_FEI_B2647_2601R013_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=n
- [9] Umlauf Lukas *Aplikace MLAT metody nad sítí low-cost ADS-B přijímačů*. Dostupné z:
https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63960/F6-DP-2015-Umlauf-Lukas-Diplomova_prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [10] 3D Position Estimation Performance Evaluation of a Hybrid Two Reference TOA/TDOA Multilateration System Using Minimum Configuration. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/318940431_3D_Position_Estimation_Performance_Evaluation_of_a_Hybrid_Two_Reference_TOATDOA_Multilateration_System_Using_Minimum_Configuration
- [11] Pavel Puričer *ADS–B Signal Processing Improvement in Difficult environment*. Dostupné z:
https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/85526/F3-D-2019-Puricer-Pavel-PhD%20Thesis_Pavel_Puricer.pdf?sequence=-1&isAllowed=y

- [12] Junzi Sun The 1090MHz Riddle An open-access book about decoding Mode-S and ADS-B data. Dostupné z: <https://mode-s.org/decode/content/ads-b/1-basics.html>
- [13] Eliška Turková MLAT metoda v rámci ADS-B přijímačů na FD. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/80175>
- [14] HDSDR software. Dostupné z: <http://www.hdsdr.de/>
- [15] Manuál k HDSDR. Dostupné z: http://hdsdr.de/RTLSDR_with_HDSDR.pdf
- [16] RTL-SDR support toolbox.
Dostupné z: <https://www.mathworks.com/hardware-support/rtl-sdr.html>
- [17] USB drivery. Dostupné z: <https://zadig.akeo.ie/>
- [18] Decoding Live Wireless Signals with MATLAB and RTL-SDR. Dostupné z: https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/tag-team/Objects/c/87286_92960v00_Decoding_Wireless.pdf