



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Diplomová práce

Vícekanálový příjem a zpracování ADS-B signálů

Multichannel reception and processing of ADS-B signals

Fakulta: Fakulta elektrotechnická

Zadávací katedra: Katedra měření

Studijní program: Letectví a kosmonautika

Studijní obor: Avionika

Vedoucí práce: **Ing. Pavel Puričr, Ph.D.**, katedra radioelektroniky FEL

Vypracoval: **Bc. Filip Srbljanović**



I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Srbljanović** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **460154**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**
Studijní obor: **Avionika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vícekanálový příjem a zpracování ADS-B signálů

Název diplomové práce anglicky:

Multichannel reception and processing of ADS-B signals

Pokyny pro vypracování:

Prostudujte formát a metody příjmu a zpracování ADS-B signálu v leteckých systémech. Dále se seznamte s metodami vícenásobného příjmu rádiového signálu (SIMO, MIMO). Na základě tohoto prostudování výše uvedených metod proveďte návrh metod zpracování signálu ADS-B a dekodování dat, využívajících vícenásobný příjem a zpracování. Navržené metody otestujte simulacemi a vhodně implementujte ve vícekanálovém synchronním přijímači na bázi softwarového rádia. Při návrhu a implementaci berete v úvahu i případy příjmu signálů ve zhoršených příjmových podmínkách (nízký odstup signál/šum, multipath).

Seznam doporučené literatury:

- [1] J. G. Proakis and M. Salehi, Digital Communications, 5th edition. McGraw-Hill, 2008.
- [2] 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.
- [3] 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.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **17.09.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **20.02.2022**

Ing. Pavel Puričar, 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



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Poděkování:

Rád bych poděkoval panu Ing. Pavlu Puričerovi, Ph.D. z katedry radioelektroniky, který mi poskytl odborný dohled a cenné poznámky k práci.

Prohlášení:

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

V Praze dne:

Podpis:





ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Anotace:

ADS-B je používán v letecké dopravě jako závisle kooperující přehledový systém pro sledování letadel ve vzdušném prostoru. Vysílá informace o identifikaci letadla, rychlosti, poloze a výšce.

První část je věnována stručné historii vývoje v letectví, základní principy letecké navigace a komunikace. Druhá část této práce se zabývá přehledovými systémy, mezi které patří ADS-B. Následuje kapitola o obecném šíření radiového signálu v prostoru, rušivé prvky a jeho zpracování. V závěrečné části popisují postupy k navržení softwarového rádia a prezentují výsledky mé práce.

Klíčová slova:

CNS, ADS, ADS-B, zpracování signálu, vícekanálový příjem, metody SIMO a MIMO, Matlab.

Annotation:

ADS-B is used in air transport as a dependent cooperating surveillance system for monitoring aircraft in airspace. Transmits information about aircraft identification, speed, position and altitude.

The first part is devoted to a brief history of developments in aviation, the basic principles of air navigation and communication. The second part of this thesis deals with surveillance systems, including ADS-B. The following chapter describes the general propagation of the radio signal in the space, interfering elements and its processing. In the final part I describe the procedures for designing a software radio and present the results of my work.

Key words:

CNS, ADS, ADS-B, signal processing, multichannel reception, SIMO and MIMO methods, Matlab.





ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Abstrakt

Tématem diplomové práce s názvem Vícekanálový příjem a zpracování ADS-B signálů je vysvětlení navigačních, komunikačních a přehledových systémů, které se používají v letectví. Popis šíření rádiových vln a okolní rušivé vlivy, modely šíření a metody SIMO/MIMO. Dále pak tyto poznatky implementovat pro vícekanálový příjem ADS-B zpráv.

Hlavním cílem práce je na základě prostudování formátu ADS-B zprávy, metody příjmu a zpracování, vytvořit vlastní softwarové rádio, které simuluje ADS-B signál, jeho degradování díky rušivým elementům a následně jeho zpracování pomocí vícekanálového příjmu, metody SIMO a MIMO.

V teoretické části jsou popsány navigační systémy NDB, DME, VOR, TACAN a ILS, které jsou nedílnou součástí pro zjišťování polohy letadla. Způsoby komunikace mezi letadlem-zemí/letadlo-letadlo, které za pomoci datalinkových aplikací komunikují mezi sebou. Samostatně jsou pak popsány přehledové systémy PSR, SSR, MLAT, GNSS a ADS, mezi které patří ADS-B. Následuje kapitola o šíření elektromagnetických vln, rušivých vlivech Path loss, Multipath, Slow fading, Fast fading. Popis metod SISO, SIMO, MISO, MIMO. Praktická část se zaměřuje na implementaci těchto poznatků v podobě softwarového rádia, které generuje Mode S – ES (ADS-B zprávu), přidá rušivé prvky a následně je detekuje a dekoduje.



1.	Úvod	- 4 -
1.1.	Cíl práce.....	- 6 -
1.2.	Historie.....	- 6 -
1.3.	CNS	- 7 -
1.4.	Způsoby navigace	- 7 -
1.4.1.	NDB	- 9 -
1.4.2.	DME.....	- 10 -
1.4.3.	VOR.....	- 11 -
1.4.4.	TACAN	- 12 -
1.4.5.	ILS	- 12 -
1.5.	Způsoby komunikace.....	- 13 -
1.5.1.	Datalinky.....	- 14 -
1.5.2.	ACARS.....	- 15 -
1.5.3.	Přehled dalších datalinkových aplikací.....	- 15 -
2.	Přehledové systémy a jejich dělení	- 17 -
2.1.	Dělení	- 17 -
2.2.	Pozemní, palubní a pasivní radary	- 18 -
2.2.1.	Primární radar (PSR).....	- 18 -
2.2.2.	Sekundární radar (SSR).....	- 20 -
2.3.	MLAT	- 25 -
2.4.	GNSS.....	- 25 -
2.5.	ADS.....	- 27 -
2.5.1.	ADS-C.....	- 27 -
2.5.2.	ADS-B.....	- 28 -
3.	Detekce signálu v šumu a jeho zpracování, metody SIMO a MIMO	- 31 -
3.1.	Šíření elektromagnetických vln	- 32 -
3.2.	Šíření vln ve volném prostoru	- 33 -
3.3.	Okolní vlivy na signál	- 34 -
3.3.1.	Ztráty šířením (Path loss)	- 34 -
3.3.2.	Mnohocestné šíření (Multipath)	- 34 -
3.3.3.	Pomalé úniky (Slow fading)	- 34 -
3.3.4.	Rychlé úniky (Fast fading)	- 34 -
3.4.	Modely šíření signálu	- 34 -
3.5.	SIMO a MIMO metody	- 36 -

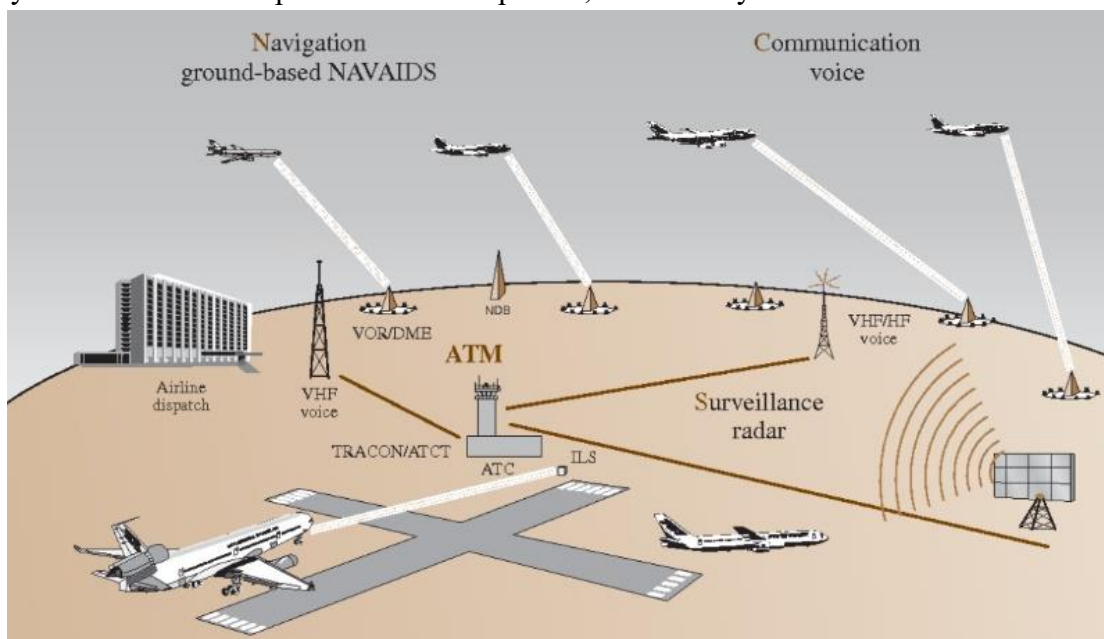
3.5.1.	SISO	- 36 -
3.5.2.	SIMO	- 37 -
3.5.3.	MISO	- 39 -
3.5.4.	MIMO	- 40 -
4.	Implementace	- 41 -
4.1.	Simulace ADS-B	- 41 -
4.1.1.	FCE Mode_S_ES_OUT	- 41 -
4.1.2.	FCE BinDive	- 43 -
4.1.3.	FCE ParSek	- 43 -
4.1.4.	FCE Code_ADS_B	- 44 -
4.1.5.	FCE DeCode_ADS_B	- 45 -
4.1.6.	FCE Noise_Add	- 46 -
4.1.7.	FCE TimeDif	- 47 -
4.1.8.	FCE Detection	- 49 -
4.2.	SCRIPT ADS_B_TEST_XXX	- 51 -
4.2.1.	Reference	- 51 -
4.2.2.	2 AT – kombinovaný test	- 53 -
4.2.3.	Rychlý test pro 3 AT	- 55 -
4.3.	Ukázka dat z FR24	- 56 -
4.4.	Vyhodnocení	- 57 -
5.	Závěr	- 60 -
	Seznam zdrojů	- 61 -
	Seznam použitých zkratk	- 63 -
	Seznam obrázků	- 64 -
	Seznam grafů a schémat	- 64 -
	Seznam tabulek	- 65 -
	Seznam příloh	- 65 -



1. Úvod

První letecký provoz byl operován za podmínek umožňující vizuální provedení letu a zabránění kolizím více letadel bylo pouze v rukou pilotů. Nicméně se zhušťujícím se provozem nejen na letištích bylo nutností zavést systémy, které zaručí přilétávajícím a odlétávajícím letadlům organizaci a zejména bezpečný provoz. Některé tyto systémy jsou energeticky náročné a jejich pořizovací/udržovací cena je příliš vysoká. Řešením by mohl být systém ADS-B. Pořizovací/udržovací cena tohoto systému je znatelně nižší než u radarových systému s velkým odběrem energie a nákladnou technologií.

Dále je zde problém ve vysokém zahlcení v tomto frekvenčním pásmu. V dnešní době dochází k velkému rozmachu bezpilotních letounů, jako jsou například drony, UAV, apod. Jejich vysoký počet by mohl komplikovat přehled v letovém prostoru, pokud by měla být vybavena vlastním odpovídáčem o své poloze, identitě a rychlosti.



Obrázek 1: CNS přehled [1]

V první kapitole je popsán stručný vývoj v letectví, jak v navigačních systémech, tak i komunikačních. Některé jsou stručně rozepsány, aby byl patrný jejich základní princip. Sub systémy a další aplikace využívané v letectví jsou zde jen zmíněny.

Druhá kapitola klade důraz na přehledové systémy v letectví, mezi které patří ADS-B. Jsou zde popsány základní principy a funkce těchto všech systému, více pak samotné ADS-B.



Třetí kapitola se zaměřuje na přenos signálu vzduchem, jeho detekci v šumu a následně jeho zpracování. Jsou zde popsány metody pro vícekanálový příjem, který by měl zlepšit hledání signálu v šumu.

Ve čtvrté kapitole jsou aplikovány všechny tyto poznatky k vytvoření softwarového rádia v prostředí MatLabu, který simuluje ADS-B zprávu vyslanou z transpondéru, jeho zašumění, následně jeho detekování v šumu a jeho dekodování. Následuje vyhodnocení těchto testů a prezentace výsledků.

1.1. Cíl práce

Cílem této práce je prostudování formátu, metody příjmu a zpracování ADS-B signálu v leteckých systémech, seznámení se s metodami vícenásobného příjmu rádiového signálu (SIMO, MIMO) a následně, na základě těchto prostudovaných materiálů, navrhnout metodu pro zpracování signálu ADS-B a jeho dekodování dat, využívajících vícenásobný příjem a zpracování. Tyto navržené a zpracované metody jsou otestovány simulacemi a vhodně implementovány ve vícekanálovém synchronním přijímači na bázi softwarového rádia. Dále je pak prostudováno chování tohoto rádia pro případy příjmu signálů ve zhoršených příjmových podmínkách.

1.2. Historie

Od počátku vývoje letadlové techniky a avioniky se kladl velký důraz na navigaci v prostoru, vzájemnou komunikaci a celkový přehled o letovém provozu.

V prvních fázích se piloti a navigátoři učili určovat polohu podle toho, co v daný moment viděli. Létalo se v nízkých výškách, za dobrého počasí a přes den, kdy let neohrožovala mlha, ptactvo atd. S příchodem nových poznatků a techniky se stalo létání mnohem více bezpečné. Díky přístrojům na palubě letadla se dala určit vzdušná rychlost, výška apod.

V pozdějších fázích, kdy na scénu přišla radionavigace a radiokomunikace, se stalo pro piloty zcela přirozené létat ve vysokých nadmořských výškách, v noci/mracích či mlhách. Pomocí palubních přístrojů a komunikaci s ATC/ostatních pilotů šlo určit vlastní polohu relativně přesně. Radiotechnika tak nasměrovala průběh dalšího vývoje v civilním i vojenském letectví.

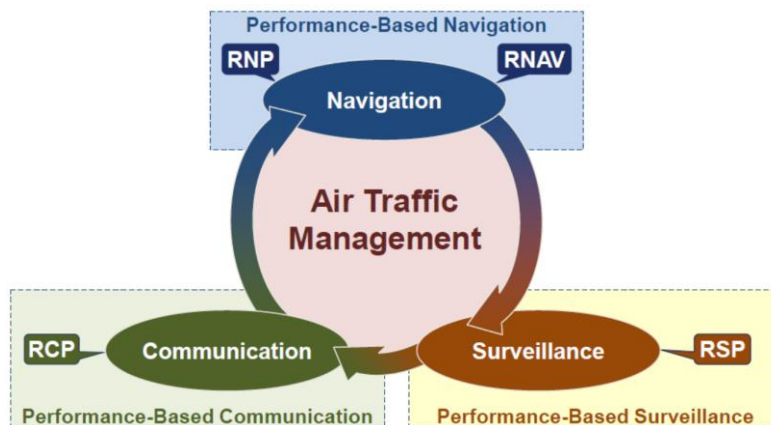
Následnou inovací všech předešlých systémů a počátkem kosmických misí, přišla na řadu kosmická technika, jako například umělé družice (satelity), které znatelně rozšířily možnosti komunikace a navigace.



1.3. CNS

= Communication – Navigation – Surveillance

S přibývajícím požadavky a rostoucími nároky na leteckou dopravu, (aby letadla létala za jakýchkoli podmínek – ve dne, v noci, nezávisle na počasí a ve větších výškách), bylo nezbytné zajistit modernizaci jak samotných letadel, tak pozemní infrastruktury zajišťující plynulý a bezpečný provoz a řídicím letového provozu správné informace o polohách letadel. Přínos nových a zdokonalených systémů je z hlediska bezpečnosti významný. Zejména umožněním snížení rozstupů mezi letadly a poskytováním automatických upozornění a varování řídicím letového provozu. Dalším významným přínosem je zlepšení situačního uvědomění řídicích letového provozu. Pro potřeby pátrání a záchrany mohou přehledové systémy pomoci poskytnutím informace o poslední poloze letadla. [1]



Obrázek 2: CNS diagram [1]

1.4. Způsoby navigace

Navigační specifikace, dle PBN (Performance Based Navigation):

- RNAV – Navigační specifikace založená na prostorové navigaci, která *nezahrnuje* požadavek na palubní monitorování navigační výkonnosti a výstražný systém. (RNAV 1, RNAV 5, atd...). [2] [3]



- RNP – Navigační specifikace založená na prostorové navigaci, která zahrnuje požadavek na palubní monitorování navigační výkonnosti a výstražný systém. (RNP 1, RNP APCH, atd...). [2] [3]

Způsob navigace se dělí na:

- **Vizuální:** Piloti se museli orientovat v prostoru pouze za pomoci zraku, map a kompasu. [4]
- **Astronomická:** Alternativní způsob navigace, která se využívá již po staletí. V dnešních dobách se převážně používá *sférická astronomie*. Jedná se o spolehlivý nezávislý způsob určení polohy na velké vzdálenosti. Prodlouha toho způsobu však je v řádů několika jednotek minut (cca 6-10 minut). Používá se převážně v námořní dopravě. [4]
- **Výpočtová:** Použitím údajů z přístrojů (zrychlení, rychlost, tlak, výška, kurz, ...), lze vypočítat přibližnou polohu a tím stanovit polohovou čáru, po které se letadlo pohybuje. [4]
- **Radionavigační:** Pro navigaci se využívá fyzikálních principů šíření radiových vln v prostoru a pomocí letadlové avioniky se určí poloha letadla. Příkladem je NDB, DME, ILS, VOR, ... [4]

Do této kategorie spadá i **navigace pomocí družic (GNSS)**: Využívá poznatky z astronomické navigace. Díky přesně známé poloze navigačních družic vůči zemi a propojení s leteckou technikou, lze určit vzájemnou polohu vůči sobě a tím získat přesnou pozici letadla. V dnešních dobách se jedná o standardní způsob určování polohy v moderních letadlech. [4]

- **Inerciální:** Platí zde 1. Newtonův zákon (Pohybový) a za pomoci inerční soustavy na palubě letadla (gyroskopy, akcelerometry, barometry, ...) určí se přesná poloha vůči zemi. [4]

V následujících podkapitolách jsou popsány některé z navigačních systémů, které se využívají v civilním sektoru letectví.

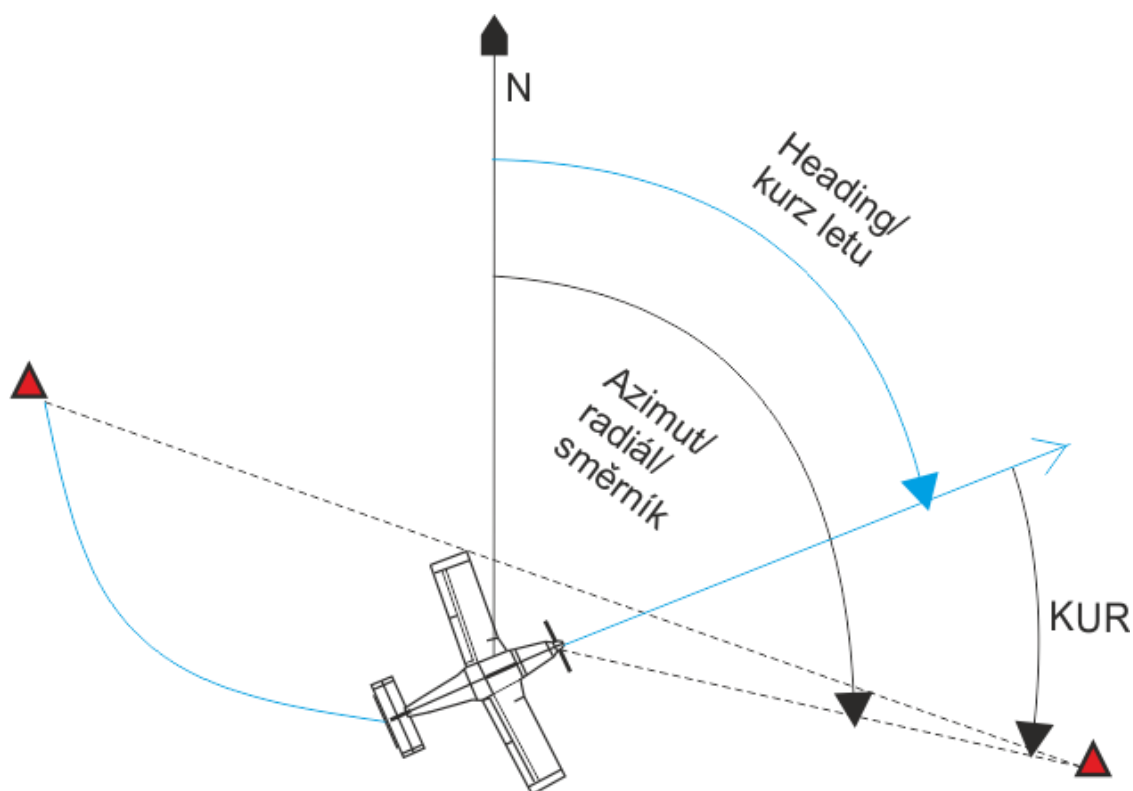
1.4.1. NDB

NDB = Non Directional Beacon.

Jedná se o všesměrový maják, jehož navigačním údajem je tzv. KUR (kurzový úhel radiové stanice), který spolupracuje s palubním přijímačem ARK/ADF. Princip funkce mezi NDB a ARK/ADF je podobný jako mezi magnetickým severem a magnetickým kompasem – získáme informaci o kursu, kterým letadlo letí (nejedná se o azimut). Pracuje na kmitočtu $f = 190\text{-}1750\text{ kHz}$. [5]

Dělení:

- Traťové: označují zájmové navigační body na letových cestách
- Přibližovací: v prodloužené ose dráhy



Obrázek 3: Princip NDB [2]



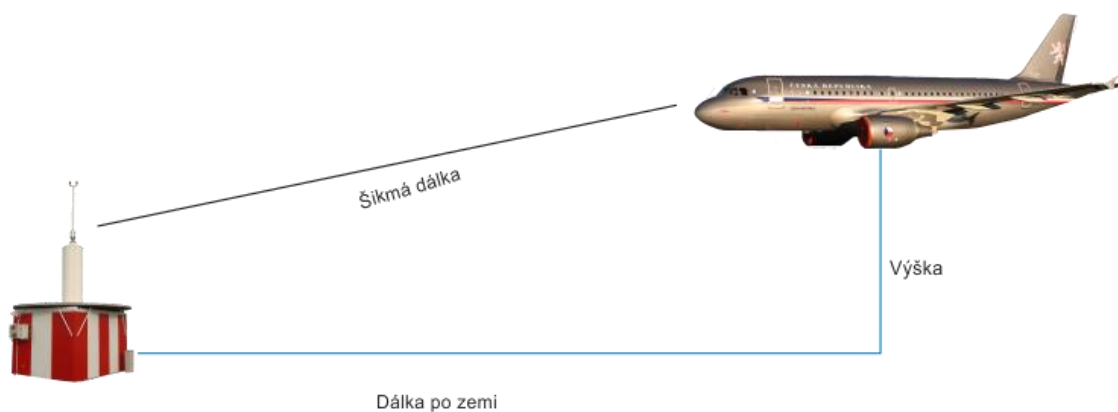
1.4.2. DME

DME = Distance Measuring Equipment

Radionavigační zařízení, které udává vzdálenost (šikmou délkou) mezi palubním dotazovačem a pozemním odpovídačem. Pracuje na kmitočtu $f = 962\text{-}1213$ MHz. [5]

Dělení:

- DME/W = Wide – široké vyzařované spektrum
- DME/N = Narrow – úzké vyzařované spektrum
- DME/P = POP – pro přesné přiblížení (DME/N spektrum)



Obrázek 4: Princip DME [2]

1.4.3. VOR

VOR = VHF Omni Directional Radio Range

Jedná se o radionavigační zařízení, které udává azimut (směrník/radiál) letadla k pozemnímu radiomajáku. Zároveň ukazuje, zda letadlo letí k/od (TO/FROM) majáku.

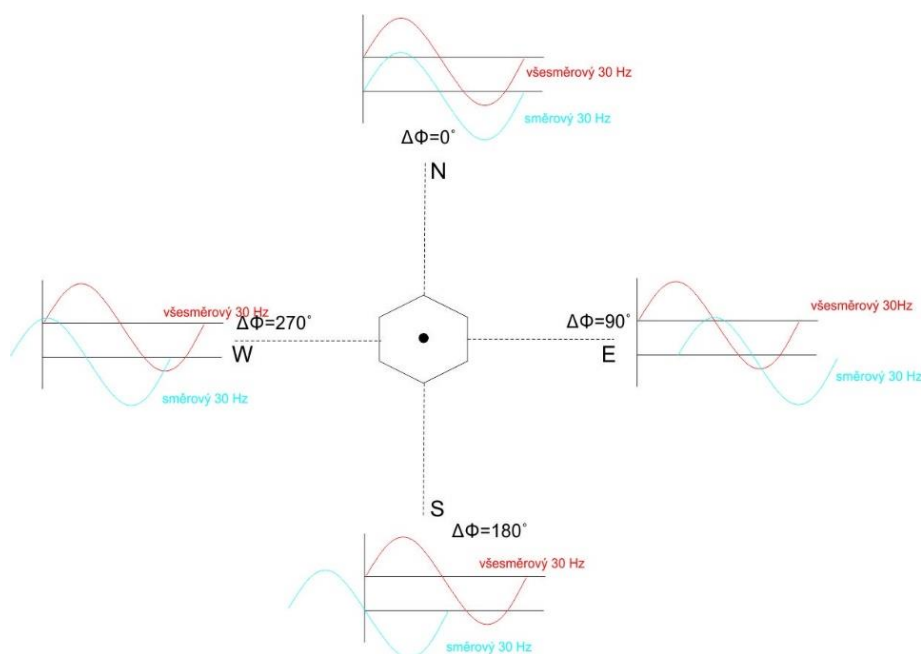
Pracuje na kmitočtu $f = 108\text{-}117,95$ MHz. [5]

Dělení:

- Podle principu:
 - CVOR: conventional VOR = „klasický“
 - DVOR: doppler VOR = „dopplerovský“

Rozdíl mezi CVOR a DVOR je v pozemním zařízení a anténách. Výsledný signál, který přijímá letadlo, je pro palubní počítač stejný.

- Podle použití:
 - High altitude = Vysoké hladiny
 - Low altitude = Nízké hladiny
 - Terminal = Konečné přiblížení



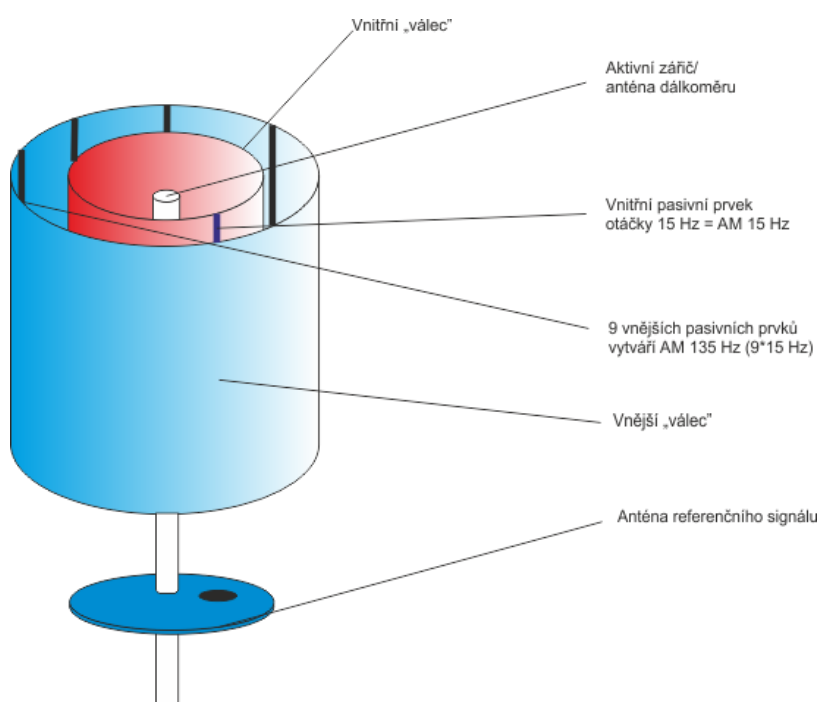
Obrázek 5: Princip VOR [2]



1.4.4. TACAN

= TACTical Air Navigation.

Jedná se vojenský radionavigační systém blízké navigace. TACAN spojuje oba principy radionavigačního systému, VORu a DME. Poskytuje *šikmou délku, směrník majáku, směrník letadla, odchylku od nastaveného směrníku, měření polohy v polárních souřadnicích*. Alternativou pro civilní letectví je kombinovaný systém VORTAC. TACAN pracuje na frekvenci $f = 962\text{--}1213$ MHz. [5]



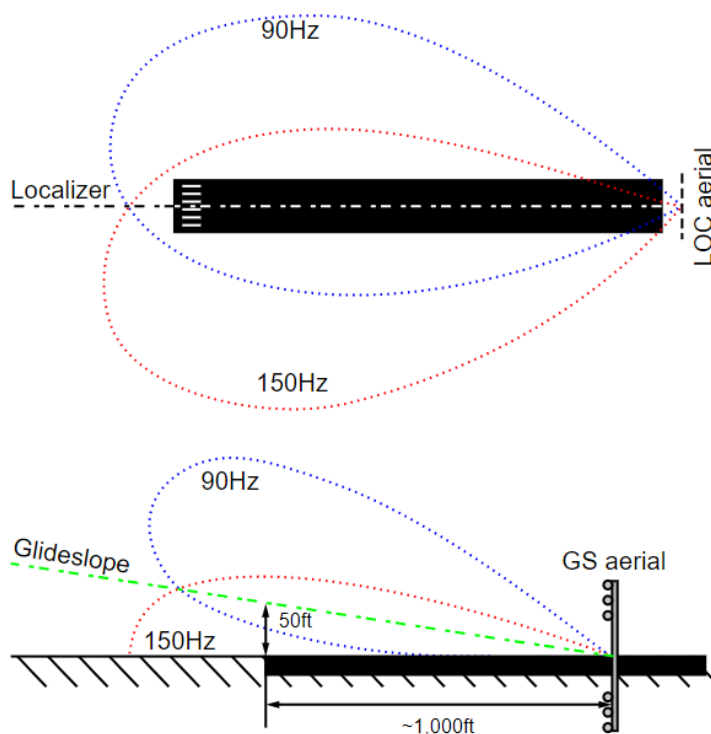
Obrázek 6: Princip TACAN [2]

1.4.5. ILS

ILS = Instrument Landing System.

Jde o přístrojový přistávací systém, který poskytuje přesné informace o aktuální poloze letadla vzhledem k referenční trajektorii, vytvořené pomocí dvou směrových radiových majáků. [5]

- Kurzový maják (Localizer = LOC/LZZ): tvořen dvěma vysílači, pracují na shodném kmitočtovém pásmu VKV. Vyzařovací laloky jsou ve směru osy dráhy. Nosné vlny jsou modulované na 90 Hz a 150 Hz. [5]
- Sestupový maják (GlideSlope/GlidePath = GS/GP): Pracuje na stejném principu jako lokalizer. Ukazuje však ideální sestupovou cestu. [5]



Obrázek 7: Princip ILS [2]

Tento systém je doprovázen DME (dříve 3 „markery“ *OM*, *MM*, *IM*), který měří vzdálenost od vzletové/přistávací dráhy.

1.5. Způsoby komunikace

Komunikace v letectví se obecně dělí na **HLASOVOU** a **DATOVOU**. Jedná se o stále rozvíjející se kategorii, na kterou jsou stále více kladeny nároky. Ať už se jedná o přenos dat ve formě datových balíčků, které obsahují informace o letadle (rychlost, stav, výška, kurz, ...), pokyny pro posádku letadla či jiné informace nebo zda se jedná o hlasovou



komunikaci mezi řídicím letového provozu a osádkou letadla. Jsou nezbytnou součástí celé letecké infrastruktury. [1]

Dělí se na:

- Air-Ground (A/G) – komunikace mezi vzduchem a zemí. Pro hlasovou komunikaci se používá VKV (118-136,975 MHz) – DSB AM / KV (2-30 MHz) – SSB AM
- Air-Air (A/A) – komunikace vzduch-vzduch
- Ground-Ground (G/G) – komunikace mezi pozemními stanovisky. Přechod z analogové nebo digitální (TDM/PCM) technologie na VoIP.

1.5.1. Datalinky

Datalinkové aplikace umožňují specifické ATM provozní funkčnost na datalinkové technologii, které jsou postavené na standardech síťové architektury.

- ATS = Air Traffic Service
 - A/G aplikace: CPDLC, ADS-C, ...
 - G/G aplikace: VoIP, OLDI zprávy, ...
- AOC = Airline Operation Communication
 - A/G aplikace: Weather, Maintenance, Free text Telex, ...
- APC = Aeronautical Passenger Communication
 - A/G aplikace: Internet, Tel. signál, TV, ...

Datalinkové služby jsou množina ATM transakcí uvnitř datalinkové aplikace, která je jasně definována.

- FANS = Future Air Navigation System. Tento standart představuje určitý set ATC aplikací, které musí být letadlem podporovány.
 - FANS A/1 aplikace: AFN, CPDLC, ADS-C; postaveno na systému ACARS
 - FANS B/2 aplikace: CM, CPDLC; postaveno na ATN



1.5.2. ACARS

= Aircraft Communications, Addressing and Reporting System

Jedná se o datalink s celosvětovým pokrytím. Průkopníkem této technologie byla společnost ARINC v roce 1978. Je specifikována množinou ARINC standardů. Tento datalink pracuje s MSK (Minimum-Shift Keying) modulací ve frekvenčním pásmu 129-137 MHz a používá se zejména pro přenos zpráv ATC, provozních zpráv aerolinek a servisních zpráv (stav motorů atp.) [1]

Další využívané přenosové cesty:

- VDL2 (VHF) – Jedná se o nástupce (modernizaci) dříve známého ACARS systému s vyšší přenosovou rychlostí.
 - AOA = ACARS Over AVLC (Aviation VHF Link Control). Užití existujícího ACARS protokolu prostřednictvím technologie VDML2
 - POA = Plain Old ACARS. ACARS využívající VDL Mode 0/A
- HFDL = High Frequency Data-Link, definována ARINC. Doplnující datalink pro VDL, které doplňuje některé oblasti pokrytí.
- SATCOM = Satelitní hlasová i datová komunikace. Moderní způsob komunikace s velkým pokrytím.

1.5.3. Přehled dalších datalinkových aplikací

Zde je stručný přehled dalších některých aplikací využívaných v letectví:

- **CPDLC = Controller – Pilot Datalink Communications:** Datová komunikace v kontinentálním vzdušném prostoru. Je zamýšlená jako doplňkový způsob komunikace k hlasové komunikaci. Má být využíván pouze pro časově nekritickou komunikaci. Zda tato komunikace proběhne je na úsudku řídicího letového provozu nebo posádky letadla. [1]
- **AOC aplikace:** Do této kategorie spadá vícero sub aplikací. Například IOOO (In-Out-Off-On), aplikace pro stavové zprávy posílané automaticky z letadla na



zem. In – letadlo dorazí na stojánku, Out – letadlo opustí stojánku, On – při přistání, Off – letadlo detekovalo vzlet. Dále pak Free-Text-Telex aplikace, funkce umožňující zasílat ze země na palubu letadla nebo z paluby na zem libovolné textové zprávy na vybrané adrese koncového uživatele. Jsou aktivně využívány pro korespondenci mezi letovými posádkami, dispečinkem a operačním oddělením. Zprávy jsou pak čteny z MCDU na palubě letadla. DMU aplikace, která vysílá reporty obsahující informace získávané ze systému Data Mangement Unit. DMU monitoruje a podává hlášení o parametrech týkajících se výkonu letadla, stavu motorů, stav APU, ... CMC/CFDIU aplikace umožňující automatické zasílání informací do systému údržby o stavu vybraných systému letounu, motorů atd. Tyto informace jsou využívány pro údržbu a odstraňování závad. Další z aplikací jsou meteorologické informace, které informují osádku letadla o změnách počasí atd. [1]

- **FMS aplikace:** umožňují obousměrnou výměnu informací prostřednictvím ACARS mezi FMS a pozemní AOC. [1]
- **OLDI zprávy:** zprávy se používají v koordinačním procesu mezi stanovišti ATC. Zpracování a výměnu zpráv s okolním systémem zajišťuje systém FDPS/v ČR ESUP. [1]
- **ADS-C a ADS-B:** Více o této aplikaci níže v této práci. (viz 2.5.1 a 2.5.2)



2. Přehledové systémy a jejich dělení

Tato kapitola je věnována popisu klíčových přehledových systémů a jejich dělení tak, aby byl patrný vývoj těchto technologií až k současným možnostem automatického závislého sledování, během kterého se uskutečňuje přenos tzv. ADS-B zprávy, která je hlavním tématem této práce.

Zpracování informací:

- Primární (prvotní) zpracování => plot
- Sekundární (druhotné) zpracování => track
- Terciální => multi – track, nebo systémový track

2.1. Dělení

Přehledové/Sledovací (Surveillance) systémy jsou definované jako technika pro včasné detekování cílů a k určování jejich polohy. Dále pak možnost získávat doplňkové informace vztahující se k danému cíli (letadla) a včasné dodání těchto informací k uživatelům na podporu bezpečného řízení a separace cílů uvnitř definované oblasti zájmu.

Existují různé druhy přehledových systémů. V této podkapitole je uvedeno, jak lze tyto systémy rozdělit. Dělí se podle získávání polohové informace cíle (letadla):

- **Nezávislé nekooperující** – mezi takové patří například radary, které fungují na principu odražených vln od objektu. Například: *primární přehledový radar, pozemní pojezdový radar*.
- **Nezávislé kooperující** – mezi tyto systémy patří například *sekundární přehledový radar v módu A/C a v módu S*, dále pak *multilaterační systémy*.
- **Závislé kooperující** – do této kategorie patří např.: *ADS-B a ADS-C*.

Pro *nezávislé* přehledové systémy, je poloha letadla vypočtena a určena pomocí pozemních systémů.



Závislé přehledové systémy jsou takové, které při získávání informací o poloze letadla využívají palubní systémy v letadle a následně tuto informaci vyšlou k pozemnímu systému.

Nekooperující systémy při získávání informací nejsou v žádné součinnosti s jakýmkoli systémem letadla.

Kooperující systémy kladou určité nároky na vybavení letadla. To musí být vybaveno systémem, který bude přijímat dotazy ze země a odpovídat na ně. Bude tedy s pozemním systémem spolupracovat.

2.2. Pozemní, palubní a pasivní radary

Radary jsou nedílnou součástí v letectví. Pomocí nich lze sledovat vzdušný prostor, změnu počasí, detekovat cíle/objekty ve vzduchu (velké uskupení ptactva/naváděné střely/atd.)

Dělí se na primární, sekundární a pasivní.

Zpracování signálu:

Primární – Zpracování signálu přijatého během jedné otáčky: komprese pulsu, Dopplerovská filtrace a extrakce.

Sekundární – Zpracování signálu z několika otáček: sledování – track.

Terciální – Zpracování signálu z několika radarů: fúze dat, multiradarové sítě.

2.2.1. Primární radar (PSR)

Primární radar byl jeden z prvních moderních přístrojů ke sledování pohybu letadel ve vzdušném prostoru v okolí letišť. Jednou z jeho předností je autonomnost a „úplná“ nezávislost na cíli, jelikož nevyžaduje žádnou aktivní součinnost s přístrojem na palubě letadla. Principem funkce je emitována radiová vlna o vlnové délce λ , která se odrazí od cíle (letadla) a ve formě pasivních odrazů je přijata zpět na pozemním přijímači.

Jeho velkou nevýhodou je nákladná technologie na výrobu a provoz, výkonost radaru je značně ovlivněna velikostí cíle (efektivní odraznou plochou σ) a jeho vzdáleností. Navíc



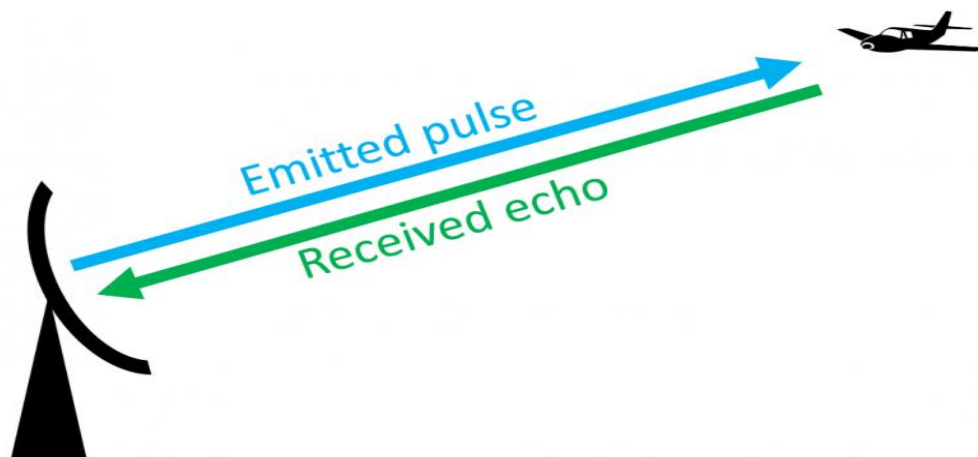
může být signál negativně ovlivněn odrazy od terénů, či nepříznivým počasím. Řídící letového provozu tak na svém stanovišti sledují pouze „tečku“ na monitoru, která reprezentuje polohu letadla. Identifikace či registrace letadla k dispozici není. Přes všechny tyto nedostatky je *primární radar* stále vnímán jako základní systém pro sledování letového provozu. [6] [7]

Pro radarovou rovnici platí:

$P_{\text{přijatý/vyzářený}}$	přijatý/vyzářený výkon antény.
$Q_{\text{př/vy}}$	zisk vysílací/přijímací antény. Zisk je počítán jako poměr výkonu, který anténa vysílá/přijímá do hlavního směru a výkonu, který by do tohoto směru vyzařoval izotropický zářič, který vyzařuje do všech směrů stejně.
$f_{\text{př/vy}}(\theta, \varphi)$	směrová charakteristika antény.
σ	efektivní odrazná plocha cíle.
R	vzdálenost cíle od radaru (šikmá délka).
λ	vlnová délka.
$L_a(R, \Theta)$	útlum v atmosféře.

Radarová rovnice:

$$P_{\text{přijatý}} = P_{\text{vyzářen}} \frac{\lambda^2 G_{\text{př}} G_{\text{vy}} f_{\text{př}}(\theta, \varphi) f_{\text{vy}}(\theta, \varphi) \sigma}{64\pi^3 R^4 L_a^2(R, \Theta)} \quad \text{Rovnice 1}$$



Obrázek 8: Princip PSR [3]

Radarové systémy:

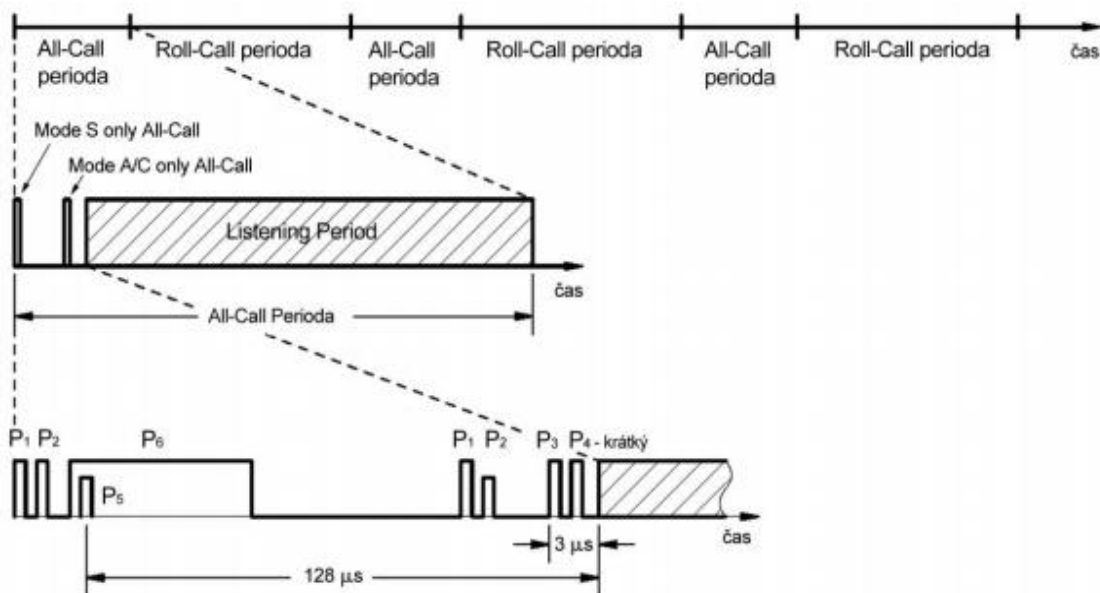
- Monostatický – vysílač i přijímač jsou zabudované v jednom pozemním systému.
- Multistatický – vysílač a přijímač jsou odděleny od sebe.
- Multipoziční – systém ke své funkci přijímače potřebuje několik pozemních stanic.

2.2.2. Sekundární radar (SSR)

Sekundární radar (SSR) je radarový systém, který zjišťuje polohu letadla. Také se jedná o datalinkovou komunikaci, která v sobě nese ID letadla a jeho nadmořskou výšku. Jedná se o nezávisle kooperující systém, tudíž jsou potřeba na palubě letadla systémy pro generování odpovědi na dotaz od pozemního vysílače. Pozemní vysílač vyšle v All-Call periodě dotaz, během kterého vyhledává okolní letadla v dosahu, v průběhu této periody jsou odpovědi letadel blokovány. Následuje tzv Roll-Call perioda, která v sobě nese dotazy pro jednotlivá letadla, aby poskytli odpověď data o sobě. [6] [7]

Dotaz: je generován na frekvenci 1030 MHz a typem dotazu Mode A/C/S.

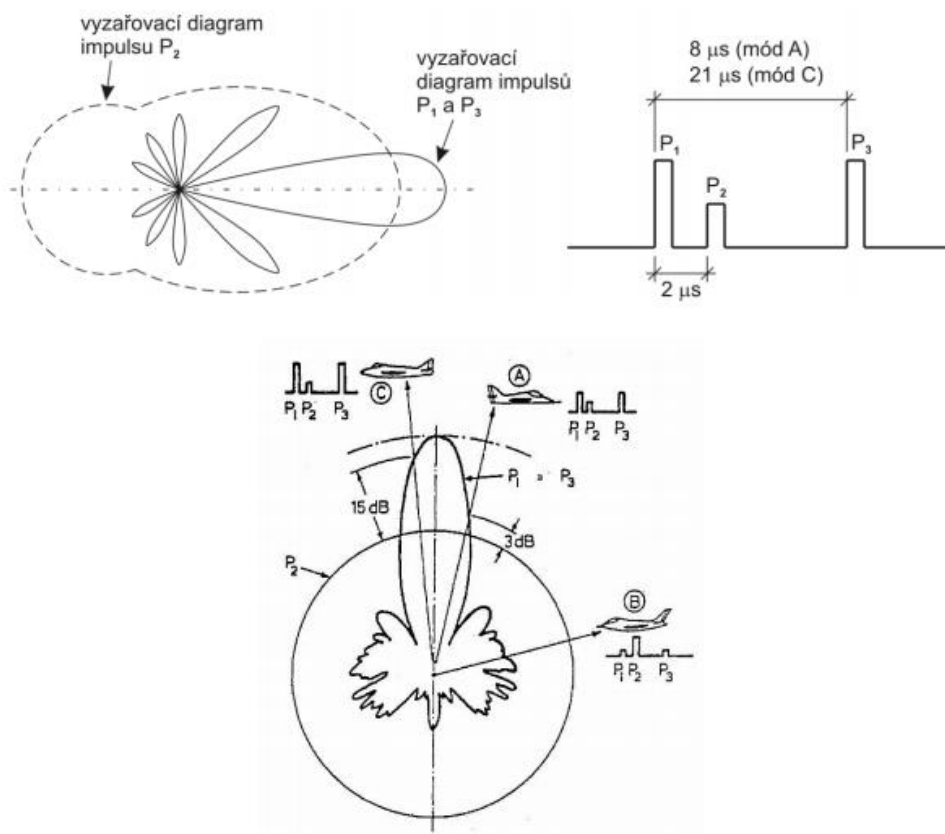
Odpověď: je generována na frekvenci 1090 MHz a typem odpovědi Mode A/C nebo Mode S.



Obrázek 9: SSR All-Call/Roll-Call perioda [1]

Mode A/C: Po zavedení sekundárních radarů byly užívány módy A/C. Mód A je charakterizován roztečí impulsů P1 a P3 o délce 8 mikrosekund a odpovědí na takový dotaz je identifikace letadla. Mód C je charakterizován roztečí impulsů o délce 21 mikrosekund a odpovědí na takový dotaz je barometrická výška letadla. Při identifikaci blízkých cílů může dojít k příjmu odpovědí na dotazy, které letadlo získá z postranních laloků dotazovače. Aby se tomu zabránilo, využívá se pulsu P2, který je oproti P1 zpožděn o 2 mikrosekundy. Pokud se letadlo nenachází na hlavním laloku dotazovače, je výkon P2 vyšší než výkon P1 a P3 a letadlo na takový dotaz nebude odpovídat. [6] [8]





Obrázek 10:SSR Mode A/C [1]

Mode S: Identifikace vysílaná módem A je čtyřmístný kód, který je letu přidělen řízením letového provozu a na odpovídači nastaven posádkou. Tento kód je tvořen pouze číslicemi osmičkové soustavy, a proto možných kombinací může existovat pouze 4096. Toto byl významný důvod pro vývoj nového módu S (Selective Adressing). Letadlu je v tomto případě přidělena 24bitová jedinečná adresa. Mód S umožňuje datovou komunikaci země-letadlo, letadlo-země a letadlo-letadlo. Hlavní výhodou tohoto módu je adresné dotazování letadla. V periodě, kdy dochází k vysílání dotazů všem letadlům, získá dotazovač odpovědi od všech odpovídačů v dosahu a jejich jedinečné adresy. To dotazovači umožňuje dále vysílat pouze adresné dotazy. [9]

Adresa letadla je předpisem definována jako jediná možná kombinace 24 bitů, použitelná pro přidělení letadlu za účelem spojení letadlo-země, navigace a přehledu o provozu. Dle předpisu L10 jsou bloky adres letadel přidělovány ICAO státu zápisu do rejstříku nebo úřadu zapisujícímu společné značky. Stát zápisu do rejstříku nebo úřad zapisující společné značky pak musí každému patřičně vybavenému letadlu

zapisovanému do národního rejstříku přidělit individuální adresu letadla. Předpis L10 dále uvádí, že žádná adresa nesmí být v jednu chvíli přidělena více než jednomu letadlu. Výjimku mohou tvořit pozemní letištní vozidla, pokud jsou provozována na letištích vzdálených více než 1000 km. Adresa letadla může být změněna pouze za výjimečných okolností a nesmí se měnit v průběhu letu. [10]

V následující tabulce (viz

Tabulka 1: Downlink formáty Mode S) jsou zobrazeny typy downlinkových formátů. Pro účely této práce se budu zajímat o formát DF17, který je používán pro ADS-B zprávy.

Tabulka 1: Downlink formáty Mode S

DOWNLINK FORMAT	OBSAH
DF 0	Short Air to Air ACAS
DF 4	Surveillance (roll call) Altitude
DF 5	Surveillance (roll call) IDENT Reply
DF 11	Mode S Only All-Call Reply
DF 16	Long Air to Air ACAS
DF 17	1090 Extended Squitter
DF 18	1090 Extended Squitter, supplementary
DF 19	Military Extended Squitter
DF 20	Comm. B Altitude, IDENT Reply
DF 21	Comm. B Altitude, IDENT Reply
DF 22	Military use only
DF 24	Comm. D Extended Length Message (ELM)



Díky odpovídači, který čeká impuls, se z původní radarové rovnice výkonové bilance změní na radiokomunikační.

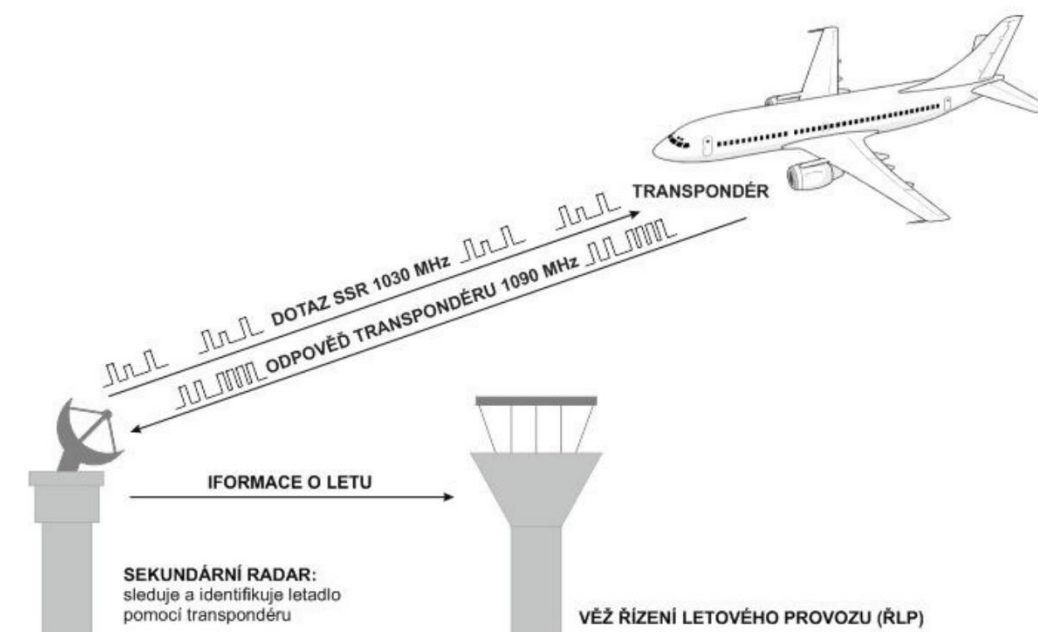
Pro radiokomunikační rovnici platí:

- L_φ Jsou ztráty nepřesným zaměřením antény. Vznikají, když přijímací anténa není natočena přesně do směru vysílání. Tyto ztráty jsou problémem hlavně u antén s velkou směrovností, kde i malé odchylky v zaměření mohou znamenat velké ztráty.
- L_p Jsou polarizační ztráty. Vznikají tehdy, když vlny dopadající na přijímací anténu, mají jinou polarizaci než anténa přijímací. Například když elektrické pole vysílaného signálu má vertikální polarizaci a přijímací anténa je natočena pro přijímání horizontální polarizace.

Radiokomunikační rovnice:

$$P_{Př} = P_{Vy} G_{Vy} G_{Př} \frac{\lambda^2}{16\pi^2 d^2} L_\varphi L_p$$

Rovnice 2



Obrázek 11: Princip SSR [4]

2.3. MLAT

= Multilateration

Letoun emituje pulz elektromagnetické energie, který je vysílán všesměrově. Tento signál je detekován na přijímačích a následně je určena poloha letounu. Systém může zpracovávat různá data vyslaná z vysílače letounu a různě je kombinovat dle potřeby pro dané účely. Výpočet je založen na rozdílu časů přijatých signálů na jednotlivých stanovištích TDOA (Time Difference Of Arrival).

MLAT systémy lze rozdělit na:

- Pasivní: systém pouze odposlouchává všechny okolní signály. Spoléhá se pouze na zprávy vyslané letounem. Tento systém je výhodný proto, že není potřeba žádné povolení ani oprávnění pro použití. Další výhodou je, že nenarůstá počet dotazů v pásmu 1030MHz ani odpovědí v pásmu 1090MHz. Na druhou stranu zde může vzniknout problém, pokud je v dosahu vícero letadel. Jelikož nelze aktivně řídit systém těchto náhodně generovaných odpovědí, může nastat situace, kdy vznikne kolize signálu různých letadel. [5] [1]
- Aktivní: systém se aktivně dotazuje letounů v jeho dosahu. Prakticky se jedná o stejný systém jako pasivní MLAT systém, jen s tím rozdílem, že systém si dokáže vyžádat vlastní odpovědi. [5] [1]

2.4. GNSS

GNSS k určení polohy využívá několik možných metod: *úhломěrná, dopplerovská, interferometrická, měření fáze nosné a dálkoměrná*. V dnešní době je nejčastěji používaná metoda *dálkoměrná* (měření vzdálenosti objekt-družice). Pro jednoznačné určení polohy objektu je zapotřebí 4 družic. Poloha družice v prostoru je známá. Měří se doba (čas) zpoždění signálu od družice k objektu.

Pro navigační rovnice platí:

U_x, U_y, U_z Pozice uživatele.

X_i, Y_i, Z_i Pozice družice.

P_i Přesná vzdálenost družice od i -tého komponentu.

ΔT_B	Čas signálu mezi družicí a uživatelem.
c	Rychlost světla.

Navigační rovnice:

$$(X_1 - U_X)^2 + (Y_1 - U_Y)^2 + (Z_1 - U_Z)^2 = (P_1 - c\Delta T_B)^2,$$

$$(X_2 - U_X)^2 + (Y_2 - U_Y)^2 + (Z_2 - U_Z)^2 = (P_2 - c\Delta T_B)^2,$$

$$(X_3 - U_X)^2 + (Y_3 - U_Y)^2 + (Z_3 - U_Z)^2 = (P_3 - c\Delta T_B)^2,$$

$$(X_4 - U_X)^2 + (Y_4 - U_Y)^2 + (Z_4 - U_Z)^2 = (P_4 - c\Delta T_B)^2$$

Rovnice 3

GPS je složená ze 3 částí:

- Řídicí systém – jedná se o řídicí středisko a provozní pozemní stanice.
- Kosmický segment – zastupují je družice nad zemským povrchem, které jsou na orbitálních drahách. Družice jsou navrženy tak, aby podávaly informace o času, rychlosti a poloze. Tyto informace jsou nezávislé na počasí a prostředí, tudíž jsou použitelné kdykoliv. Vysoké pokrytí zemského povrchu = vysoká dostupnost.
- Uživatelský segment – složený z antény, přijímače signálů GNSS, počítače a displeje.

Příklady realizovaných systémů:

- NAVSTAR pro USA
- GLONASS pro Rusko
- GALILEO pro EU



2.5. ADS

= Automatic Dependent Surveillance

ADS má ve srovnání s radarem jednu obrovskou výhodu, a to tu, že dokáže přenášet přes datovou linku více informací. Jako základní zdroj informace o dané poloze letadla slouží GNSS. Poskytuje vysoké využití pro přehled v oceánských oblastech nebo tam, kde pokrytí radarem je malé až žádné.

Jedná se o *závislý kooperující* systém, proto automaticky získává informace z palubních systémů o ID letadla, rychlosti, poloze atd. Ty dále vysílá okolním uživatelům v dosahu. Tento systém není nijak dotazován, vysílané informace jsou generované v pseudonáhodném časovém intervalu. Systém automatického závislého sledování má využití při sledování letadel, ale lze jej využít také pro sledování pozemních cílů.

Typy ADS:

- ADS-C (Contract): první forma systému ADS. Je také znám jako ADS-A neboli Automatic Dependent Surveillance – Addressed.
- ADS-B (Broadcast): vyznačuje všesměrové vysílání signálu a jeho příjem kýmkoli. Tedy nejen řídicím letového provozu, ale i ostatními letadly, která musejí být příslušně vybavena.

2.5.1. ADS-C

Automatic Dependent Surveillance-Contract byla první forma systému ADS.

Systém je závislý na tzv. „smlouvách“ tedy dohodách. Dohody jsou vytvářeny mezi pozemním stanovištěm řídicího letového provozu a avionikou letadla. Ve své podstatě jde o zasilání dat mezi letadlem a pozemní stanicí. ADS-C je závislý přehledový systém, jelikož pozemní stanice je závislá na zprávách od letadla, se kterými dále nakládá. Prvotní záměr se skrýval v poskytnutí dohledu nad letadly ve vzdušném prostoru bez jakéhokoliv pokrytí radary.

Systém využívá několik typů pravidelných dohod, které jsou založeny na čase a řídicím letového provozu je může dle svých potřeb měnit. Tyhle dohody mají sloužit ke snížení podélných i příčných rozstupů mezi letadly. Jednou z dohod je tzv. pravidelná dohoda, která je odeslána každých předepsaných x minut. Další je tzv. akce či událost. Jak název



napovídá, jde o nezbytnou zprávu v případě nastoupení jisté události např. při přechodu na waypoint dle letového plánu, stoupání nebo klesání pod nebo nad danou letovou hladinu. Jedná se o upozornění, že se letoun odchýlil od osy svého letu nebo pokud například změnil rychlost svého letu. V poslední řadě se jedná o tzv. dotaz. Je to jednoduchá periodická zpráva typu požadavku z pozemní stanice. Dotaz řídící pozemní stanice vyšle v případě, když si potřebuje zjistit, kde se každý letoun nachází. Následkem dotazu budou uživatelé letového provozu iniciováni k zaslání odpovědi o svojí poloze. Díky tomu si řídící může bez jakýchkoliv problémů aktualizovat své zobrazení a povědomí o vzdušné situaci.

Využití se zaměřuje spíše na oceánské prostory, z tohoto důvodu nebude tento systém více rozebírán.

2.5.2. ADS-B

Definice: ADS-B je prostředek, kterým letadla, letištní mobilní prostředky a další objekty mohou automaticky vysílat a/nebo přijímat údaje, jako jsou identifikace, poloha a další, podle vhodnosti, ve vysílacím módu pomocí datového spoje. (Předpis dle L4444) [3]

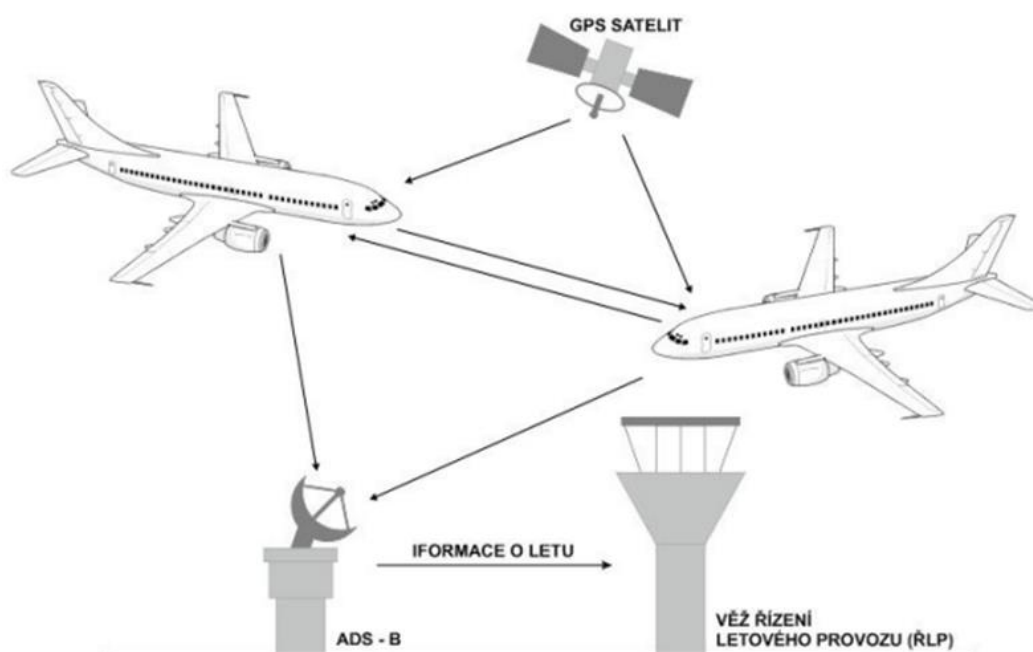
Tři technologie přenosu na úrovni fyzické vrstvy jsou navrženy k podpoře ADS-B zpráv:

- 1090 MHz Extended Squitter (Mode S – ES): DF 17, formát navržený pro využívání systémem ADS-B. (Podporuje také ACAS a ASAS)
- VDL – Mode 4: Technologie, která podporuje nejen sledovací aplikace, ale i širokou škálu komunikačních služeb.
- Universal Access Transceiver (UAT): Speciálně navržený systém pro funkcionalitu ADS-B

ADS-B/OUT: vysílané informace, které jsou odeslané z letadla či jiného prostředku. Hlavní vysílanou informací je identifikace a aktuální poloha. Mezi další vysílané informace patří volací znak, nadmořská výška, rychlost apod. Všechny odeslané informace musejí být v přesně daném formátu pro příjem *ADS-B/IN*. Systém *ADS-B/OUT* je složen ze dvou částí: 1) GNSS jednotka, ke zjištění svojí polohy. 2) Palubního odpovídače, kterým je informace odeslána. Odpovídač na odesílání využívá Mode S – Extended Squitter. Data jsou posílána na frekvenci 1090 MHz.

ADS-B/IN: systém schopný přijímat přicházející informace od *ADS-B/OUT* za pomoci datových kanálů. Jedná se spíše o doplněk na palubě ve formě zobrazení vzdušné situace.

ADS-B zpráva: ADS-B zpráva je součástí datové komunikace vysílané odpovídačem Mode S-ES, která je charakterizovaná formátem downlinkem DF17.

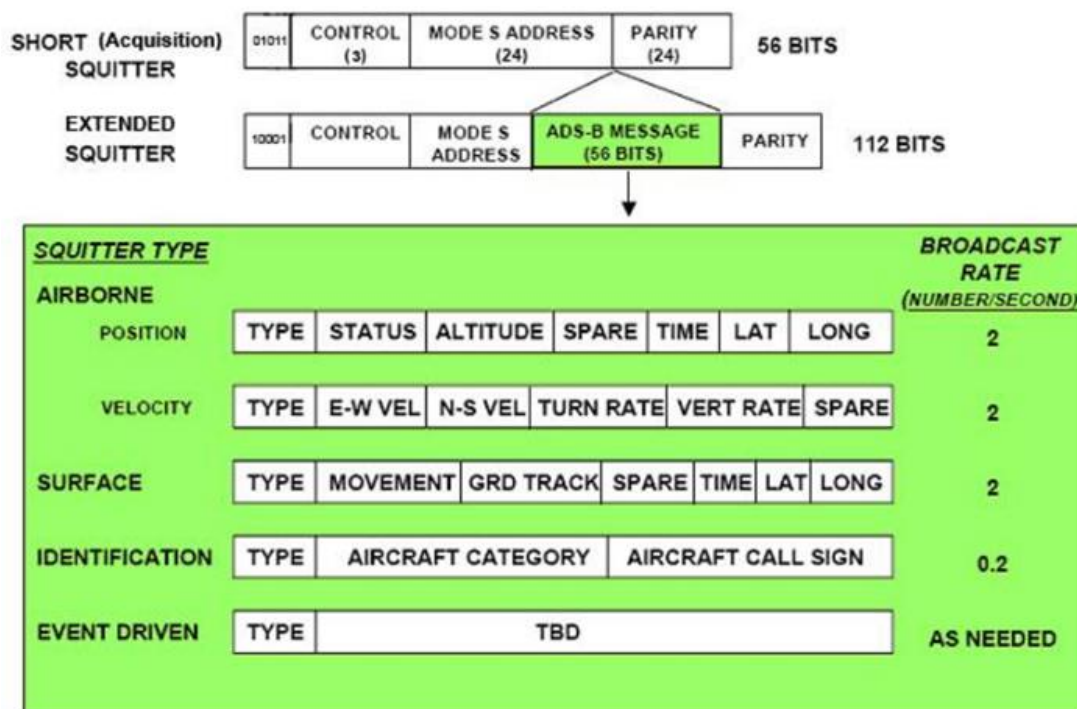


Obrázek 12: Princip ADS-B

Typy ADS-B zprávy:

- **Airborne Position:** Tato zpráva je vysílána v intervalu 0,5 s, nese s sebou polohové informace – výšku, zeměpisnou šířku a zeměpisnou délku.
- **Airborne Velocity:** Tato zpráva je vysílána v intervalu 0,5 s, obsahuje informace o rychlostech (vertikální i horizontální).
- **Surface Position:** Tato zpráva je vysílána v intervalu 0,5 s nebo 5 s (pokud je letadlo v klidu), obsahuje informace o poloze letadla.

- **Aircraft Identification:** Tato zpráva je vysílána v intervalu 5 s nebo 10 s (pokud je letadlo v klidu), obsahuje volací znak příslušného letu
- **Event Driven:** Těmto zprávám se říká *událostí podmíněné zprávy* – jsou tedy vysílány pouze v případě vzniku definované situace.



Obrázek 13: Mode S - Extended Squitter [1]

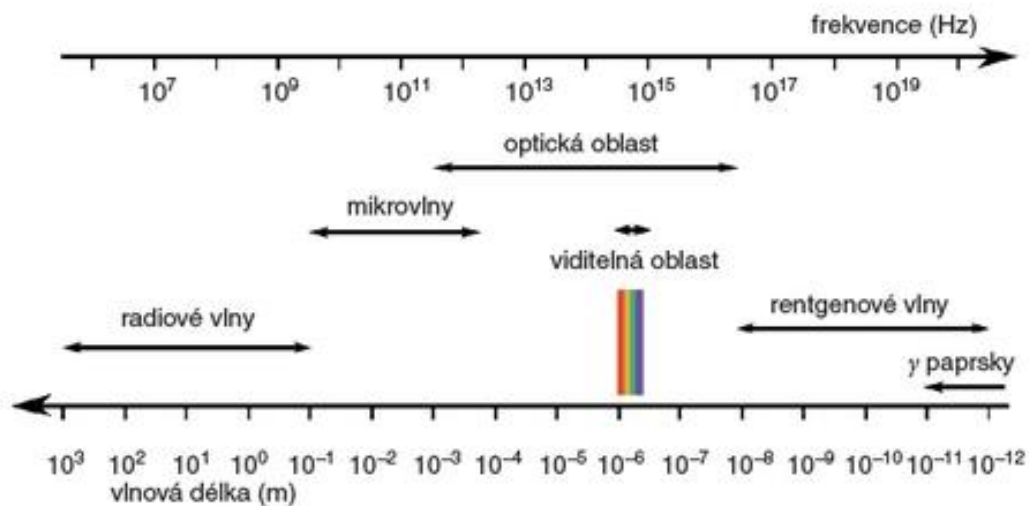


3. Detekce signálu v šumu a jeho zpracování, metody SIMO a MIMO.

Rádiové vlny jsou druhem elektromagnetického záření, které se přenáší jako částice či vlny o různých frekvencích/vlnových délkách. Používají se jako nositele pro datovou komunikaci mezi stanicemi. Obecně lze spektrum rozdělit do sedmi hlavních oblastí: *Rádiové vlny, mikrovlny, infračervené, viditelné, ultrafialové, záření X a γ záření.*

Tabulka 2: Kategorizace radiových vln

Radiové vlny	Frekvence	Vlnová délka
Extrémně nízká frekvence (ELF)	<3 kHz	>100 km
Velmi nízká frekvence (VLF)	3-30 kHz	10-100 km
Nízká frekvence (LF)	30-300 kHz	1 m-10 km
Střední frekvence (MF)	300 kHz - 3 MHz	100m -1 km
Vysoká frekvence (HF)	3-30 MHz	10-100 m
Velmi vysoká frekvence (VHF)	30-300 MHz	1-10 m
Ultra vysoká frekvence (UHF)	300 MHz-3 GHz	10 cm-1 m
Super vysoká frekvence (SHF)	3-30 GHz	1 cm-10 cm
Extrémně vysoká frekvence (EHF)	30-300 GHz	1 mm-1 cm



Obrázek 14: Spektrum [5]



3.1. Šíření elektromagnetických vln

Základem moderních technologií pro mobilní a datové služby je bezdrátová komunikace. K těmto účelům slouží anténa vysílače, kdy dojde vyslání elektromagnetické vlny s datovou informací a následně ji přijme anténa přijímače. Pro tuto technologii se využívá poznatku Maxwellových rovnic, které popisují tento jev a jsou součástí všech bezdrátových přenosů.

Maxwellovy rovnice:

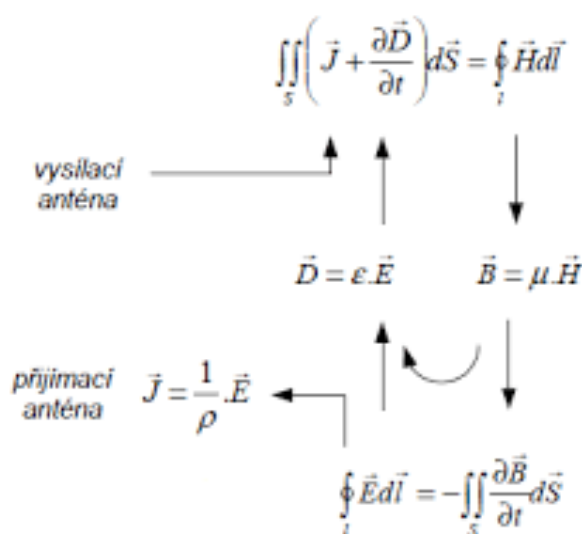
$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \quad \text{Rovnice 4}$$

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \iint_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S} \quad \text{Rovnice 5}$$

Pro šíření elektromagnetické vlny v izolantu (vzduchu).

Maxwellův posuvný proud:

$$\sum I = \oint_L \vec{H} d\vec{l} \quad \text{Rovnice 6}$$



Obrázek 15: Princip antény vysílač/přijímač [5]



3.2. Šíření vln ve volném prostoru

Šíření vln ve volném prostoru lze popsat jako izotropní zářič, umístěný do volného prostoru, kde nedochází k odrazům.

Pro: P_c celkový vyzářený výkon izotropním zářičem.

120π charakteristická impedance volného prostoru.

D směrovost antény.

G zisk antény.

Střední hodnota Poyntingova vektoru:

$$S = \frac{P_c}{4\pi r^2} = E_{ef} H_{ef} = \frac{E_{ef}^2}{120\pi} \quad \text{Rovnice 7}$$

$$E_{ef} = \frac{\sqrt{30P_c D}}{r} = \frac{\sqrt{30P_1 G}}{r} \quad \text{Rovnice 8}$$

Na vstupu přijímací antény bude výkon:

$$P_{Př} = \frac{P_{Vy} G_{Vy}}{4\pi r^2} \frac{G_{Př} \lambda^2}{4\pi} \quad \text{Rovnice 9}$$

Přenosová rovnice spoje:

$$P_{Př} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 \frac{P_{Vy}}{G_{Vy} G_{Př}} \quad \text{Rovnice 10}$$

Přenosové ztráty ve volném prostoru definující pokles výkonu mezi vysílací a přijímací anténou:

$$L_0 = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 \quad \text{Rovnice 11}$$

3.3. Okolní vlivy na signál

Současné bezdrátové služby pracují převážně v pásmu MF – UHF. Důvodem použití tohoto pásma jsou výhodné vlastnosti elektromagnetických vln v těchto vlnových délkách. Přesto se však na tyto vlny (signály) superponují rušivé elementy, které mohou přenášenou informaci částečně znehodnotit, nebo jej dokonce zcela vyrušit.

3.3.1. Ztráty šířením (Path loss)

Tento typ ztrát je daný především prostředím, kterým se signál šíří a vzdáleností mezi anténami. Tato hodnota je konstantní a udává střední hodnoty signálu v daném bodě. Hodnota se určí průměrem z velkého počtu měření v dostatečném časovém intervalu na daném místě. [6]

3.3.2. Mnohocestné šíření (Multipath)

V případě pevného spoje téměř nedochází k mnohocestnému šíření, protože antény bývají směrové, a tak dojde „třeba“ jen k jednomu odrazu, který je v blízkém směru a má malé zpoždění (jednotky nanosekund), tudíž přijímaný signál tolik neovlivní. U mobilních spojů dochází k mnohocestnému šíření neustále. K mnohocestnému šíření dochází mnoha paprsky ze všech směrů, zpoždění tudíž může být hodně velké (desítky mikrosekund). [6]

3.3.3. Pomalé úniky (Slow fading)

Jedná se o útlum způsobený zastíněním spoje, například terénem, zástavbou, stromy nebo lidmi. Při pohybu mobilní antény dochází k pomalému kolísání úrovně signálu. Z hlediska vlnových délek se jedná o rozdíl alespoň v řádu desítek mikrosekund a signál při takovém zastínění může poklesnout až o desítky decibel. [6]

3.3.4. Rychlé úniky (Fast fading)

Rychlé úniky způsobuje především mnohocestné šíření. Způsobují velké a rychlé kolísání signálu. Dochází k fázovému sčítání velkého množství odrazů v prostoru. Rychlé úniky jsou velmi proměnné v čase, což je způsobeno pohybem mobilní antény a měnícím se okolím. [6]

3.4. Modely šíření signálu

Pro popis šíření signálu se používají modely šíření, které se snaží určit, jak se signál v jakém místě zatlumí a jaký výkon bude mít v jednotlivých místech. Modely šíření se



používají i v komplikovaném prostředí, tedy v městské zástavbě a uvnitř budov, kde dochází k mnoha odrazům, ohybům a signál se zde šíří mnoha cestami.

- **Empirické modely:** Empirické modely jsou velmi jednoduché a rychlé na výpočet. Modelování je založeno na velkém počtu měření, z nichž se určí průběh funkce, která nejlépe odpovídá naměřeným datům.

Pro empirický model platí:

L_p	útlum šířením v dB.
L_0	referenční útlum v dB ve vzdálenosti d_0 .
d_0	referenční vzdálenost.
n	činitel spádu útlumové křivky, které závisí na prostředí.

Empirický model:

$$L_p = L_0(d_0) + 10n * \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

Rovnice
12

Tabulka 3: Koficienty útlumu

Typ prostředí	n
Volný prostor	2
Město	2,5-4
Město - při zastíněný	3-5
Uvnitř budov - přímá viditelnost	1,6-1,8
Uvnitř budov - bez přímé viditelnosti	4-6

- **Deterministické modely:** Deterministické modely se snaží modelovat šíření signálu pomocí fyzikálních principů. Snaží se modelovat šíření vlny v



materiálově i geometricky složitých prostředích. Nevýhodou takového modelování je potřeba přesné znalosti prostoru, kde se vlna šíří. Aby tyto modely nebyly tolik složité, dochází k jejich zjednodušení.

Při zjednodušení deterministického modelu se může uvažovat:

1) jednodušší popis prostředí,

2) periodizování okolního prostředí.

- **Semi-deterministické modely:** někdy také semi-empirické, modely jsou kombinací deterministických a empirických modelů. Základem těchto modelů je deterministický model, který se upraví podle naměřených výsledků.

3.5. SIMO a MIMO metody

Obecná kategorie pro všechny možné konfigurace se nazývají MIMO formáty. Každý z těchto MIMO formátů nabízí své výhody i nevýhody a lze je modifikovat tak, aby poskytovaly optimální řešení pro danou aplikaci v prostředí.

Jejich hlavní odlišnost je v počtu antén, který daný formát využívá. Tím je dána i jeho složitost.

3.5.1. SISO

Nejjednodušší verze rádiového spojení v tomto formátu je SISO (Single Input – Single Output). Jedná se o standardní rádiový kanál, vysílač i přijímač disponující jednou anténou. V tomto systému není žádná rozmanitost a nevyžaduje další jiné zpracování. [13]

Pro SISO systém platí:

$x(t)$ Vyslaný signál v čase t .

$r(t)$ Přijatý signál v čase t .

τ_{max} Doba trvání impulsu.

*

Operátor pro konvoluci.

SISO systém – vztah mezi vstupem a výstupem:

$$r(t) = \int_0^{\tau_{\max}} h(\tau, t) x(t - \tau) d\tau = h(\tau, t) * x(t)$$

Rovnice
13

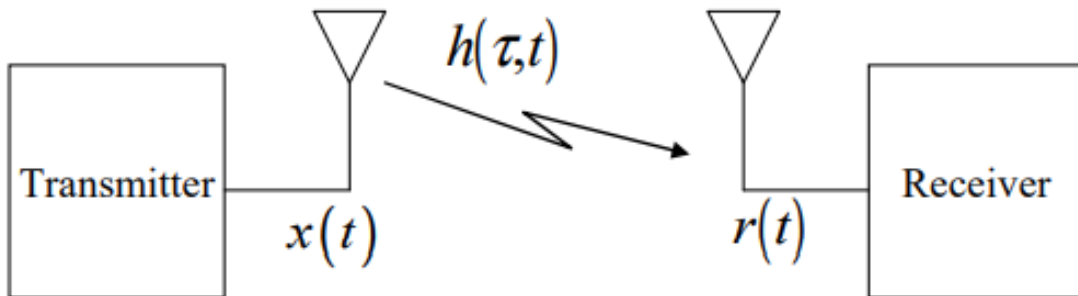


Figure 1: Schéma formátu SISO [13]

3.5.2. SIMO

Další verzí je SIMO (Single Input – Multiple Output), kde vysílač disponuje jednou anténou a přijímač dvěma a více. Díky vícero anténám na přijímači získáváme rozmanitost příjmu. [13]

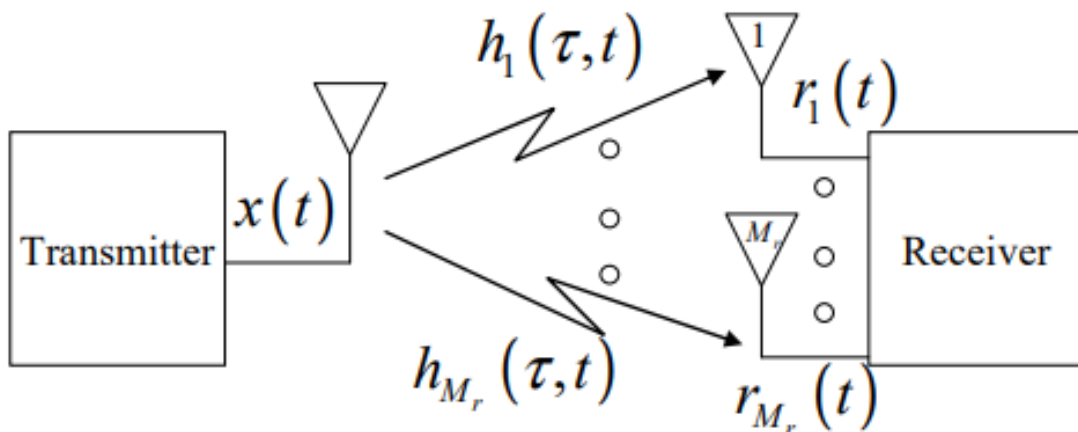


Figure 2: Schéma formátu SIMO [13]



SIMO systém – vztahy pro výstup a přenos:

$$h_i(\tau, t), i = 1, 2, \dots, M_r$$

Rovnice
14

$$r_1(t) = h_1(\tau, t) * x(t)$$

$$r_2(t) = h_2(\tau, t) * x(t)$$

$$\vdots$$

$$r_{M_r}(t) = h_{M_r}(\tau, t) * x(t)$$

Rovnice
15

SIMO systém – vztah mezi vstupem a výstupem:

$$r(t) = h(\tau, t) * x(t)$$

Rovnice 16

Kde:

* Symbol označující konvoluci element po elementu.

$$r(t) = [r_1(t) \ r_2(t) \ \dots \ r_{M_r}(t)]^T$$

Rovnice 17

$$h(t) = [h_1(t) \ h_2(t) \ \dots \ h_{M_r}(t)]^T$$

Rovnice 18



3.5.3. MISO

V případě MISO (Multiple Input – Single Output) formátu, jsou stejná data přenášena redundantně ze dvou antén vysílače. Příjímač je poté schopen přijímat optimální signál, který pak může použít k přijetí extrakce požadovaných dat. Výhodou použití MISO je snížení energetické spotřeby přijímače, jelikož nižší úroveň zpracování vyžaduje nižší spotřebu. [13]

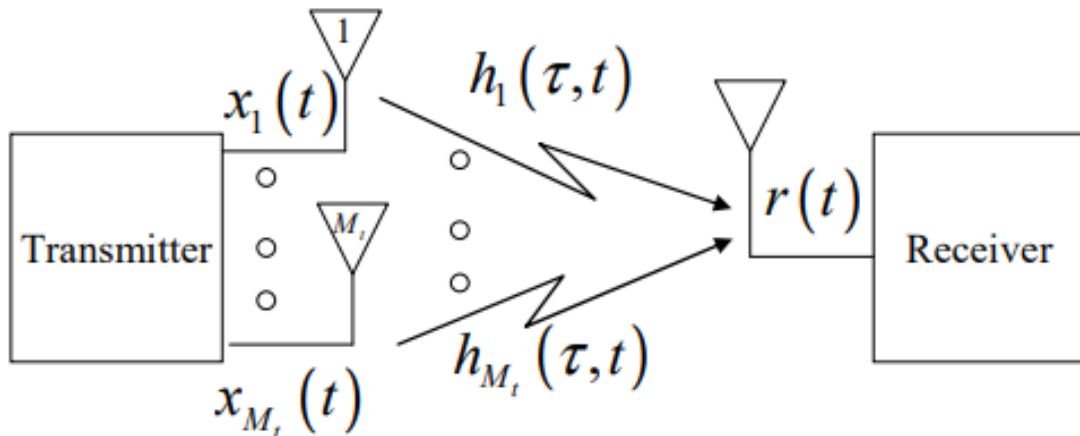


Figure 3: Schéma formátu MISO [13]

MISO systém – vztahy pro výstup a přenos:

$$x_j(\tau, t), j = 1, 2, \dots, M_t$$

Rovnice 19

$$x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_{M_t}(t)]^T$$

$$h_j(\tau, t), j = 1, 2, \dots, M_t$$

Rovnice 20

$$h(t) = [h_1(t) \ h_2(t) \ \dots \ h_{M_t}(t)]^T$$

MISO systém – vztah mezi vstupem a výstupem:

$$r(t) = h(\tau, t) * x(t)$$

Rovnice 21

3.5.4. MIMO

Pokud je na obou koncích rádiového spojení více než jedna anténa, nazývá se tento formát MIMO (Multiple Input – Multiple Output). MIMO lze použít k zajištění vylepšení jak robustnosti kanálu, tak propustnosti kanálu.

MIMO je schopno poskytnout výrazné zlepšení výkonu, ale za cenu dalšího zpracování a počtu použitých antén. Při výběru správné možnosti je třeba dosáhnout rovnováhy výkonu s náklady, velikostí, dostupným zpracováním a výslednou výdrží baterie. [13]

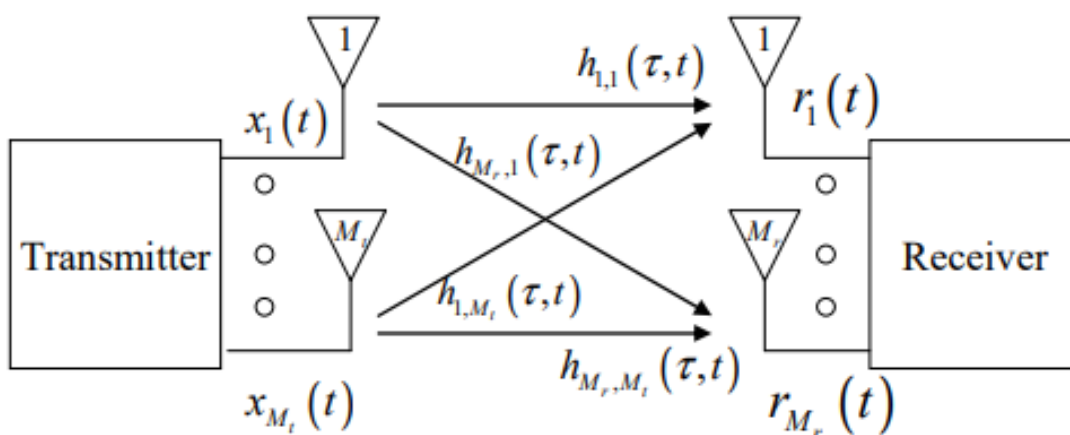


Figure 4: Schéma formátu MIMO [13]

MISO systém – vztahy pro výstup a přenos:

$$x_j(\tau, t), j = 1, 2, \dots, M_t$$

Rovnice 22

$$x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_{M_t}(t)]^T$$

$$h(t) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(\tau, t) & h_{1,2}(\tau, t) & \dots & h_{1,M_t}(\tau, t) \\ h_{2,1}(\tau, t) & h_{2,2}(\tau, t) & \dots & h_{2,M_t}(\tau, t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_r,1}(\tau, t) & h_{M_r,2}(\tau, t) & \dots & h_{M_r,M_t}(\tau, t) \end{bmatrix}$$

Rovnice 23

MISO systém – vztah mezi vstupem a výstupem:

$$r(t) = h(\tau, t) * x(t)$$

Rovnice 24

$$r(t) = [r_1(t) \ r_2(t) \ \dots \ r_{M_r}(t)]^T$$

4. Implementace

V této kapitole jsou popsány scripty a funkce vytvořené v Matlabu a je prezentován jejich výsledek. Matlab je zde používám jako softwarové rádio.

4.1. Simulace ADS-B

Základem pro vytvoření této simulace jsou poznatky popsány v předešlých kapitolách.

4.1.1. FCE Mode_S_ES_OUT

Mode S – ES (viz 2.5.2). Jedná se o Mode S obohacený o ADS-B zprávu. Signál je podroben PPM modulaci, ve které jsou datové informace kódovány v časové prodlevě mezi impulsy ($1 \mu\text{s}$) v posloupnosti pulzů v signálu.

Vstupem je vzorkovací frekvence F_s ($T_s=1/F_s$) a informace v binární podobě (v tomto případě je to ID letadla, zbytek zprávy je doplněn náhodnou sekvencí 1 a 0). Výstupem je zpráva podrobená PPM modulaci.

Tato funkce se skládá ze:

1) FCE Preamble: Preambl – Každá odpověď módu S začíná preambulí o délce 8 mikrosekund. Vzor preamble se skládá ze čtyř pulzů o délce 0,5 mikrosekundy na pulz. Meziprostory (k prvnímu pulzu) jsou 1; 3,5 a 4,5 mikrosekundy.

Vstupem je vektor, který tvoří preambuli (popsána výše), která je funkcí vzorkovací frekvence. Výstupem je výsledná preamble.

2) FCE Message: Data block – Datový blok o délce 112 mikrosekund. Formát downlinku (DF 17), využívající 112-ti bitovou délku datového bloku. Je složená ze samotné zprávy a parity. Vstupem je ID letadla, které se automaticky zařadí do správné sekvence v ADS-B zprávy. Zbytek informace se náhodně doplní 1 a 0.



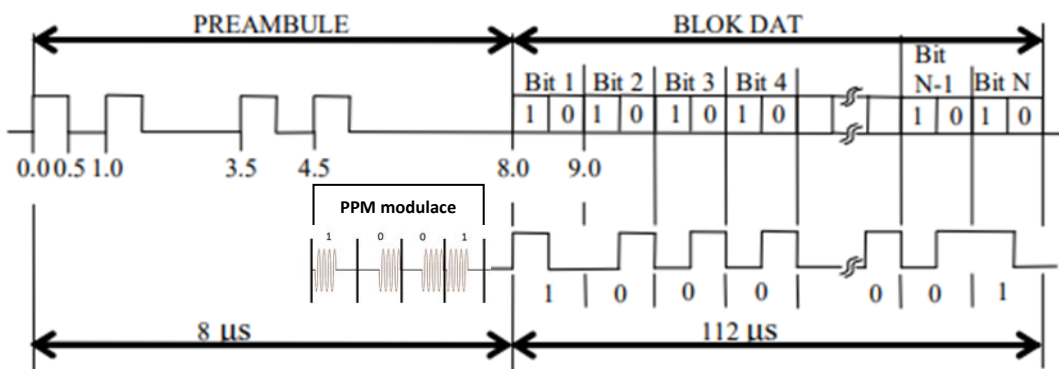


Figure 5: Formát Mode S - ES

Pro: $t_r = 120 \mu s$ Doba trvání jednoho rámce.

$f_s = 20 MHz$ Vzorkovací frekvence.

ADS-B/OUT:

$$f_s * t_r = \text{počet symbolů}$$

Rovnice 25

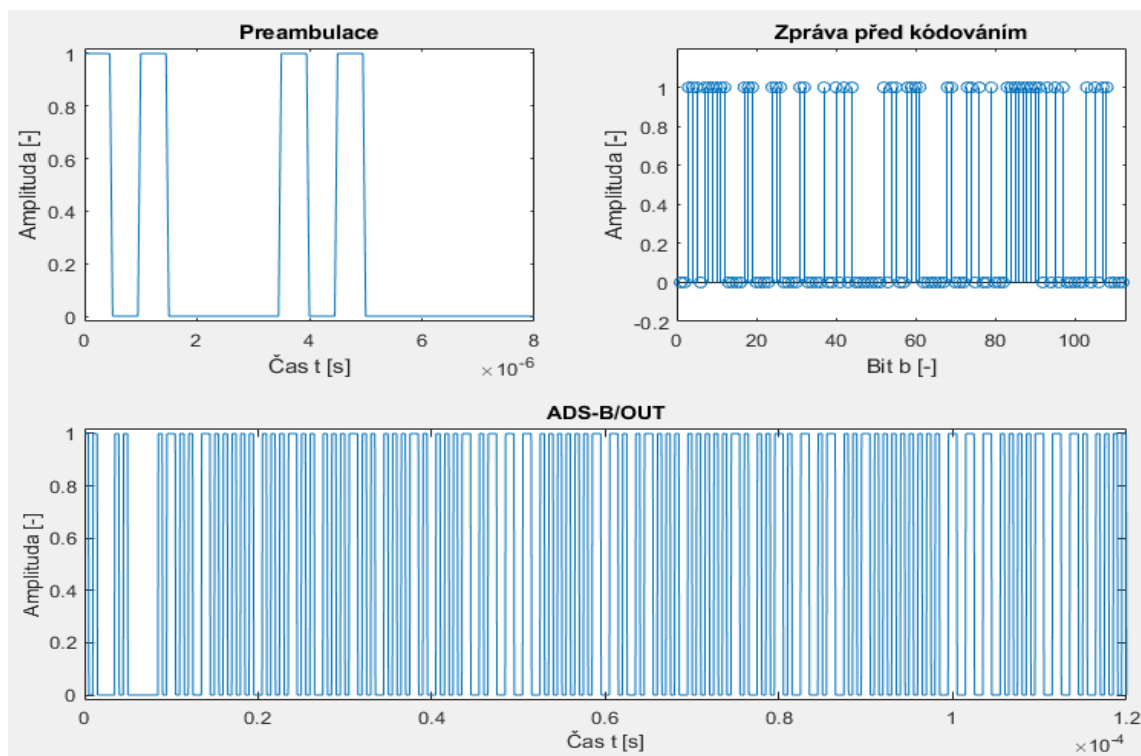


Figure 6: ADS-B/OUT

4.1.2. FCE BinDive

Funkce pro binární dělení, která je dále využívána v paritě signálu (podfunkce **ParSek**). Vstupem této funkce je zpráva z **Message** a generující polynom $\mathbf{G} = [1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1]$.

Modulo-2:

$$C_{m-1}x^{m-1} + C_{m-2}x^{m-2} + \dots + C_1x + C_0 \quad \text{Rovnice 26}$$

Kde: $C_0, C_1, C_2 \dots C_{m-1}$ jsou 1 nebo 0 a + znamená součet modulo-2.

4.1.3. FCE ParSek

Cyklický redundantní součet (CRC) je definován jako výpočet paritní sekvence pro zjišťování chyb vzniklých v důsledku selhání techniky. Kontrolní součet bývá odesílán či ukládán společně s daty, při jejichž přenosu by mohlo dojít k chybě. Po převzetí dat je znovu nezávisle spočítán. Pokud je nezávisle spočítaný kontrolní součet odlišný od přeneseného, tak došlo k chybě. Pokud je shodný, k žádné chybě nedošlo. V určitých případech je možné chybu pomocí CRC opravit. Vstupem je ADS-B zpráva a ID letadla, tyto vstupy se podrobí binárnímu dělení. Výstupem je kontrolní součet (neboli paritní sekvence).

Pro: $M(x), B(x)$ polynom zprávy (bity ve zprávě).

$G(x)$ generující polynom.

$Q(x), C(x)$ kvocient.

$R(x), D(x)$ zbytek po dělení.

Parita:

$$\frac{M(x)}{G(x)} = Q(x) + \frac{R(x)}{G(x)} \quad \text{Rovnice 27}$$

$$\frac{B(x)}{G(x)} = C(x) + \frac{D(x)}{G(x)} \quad \text{Rovnice 28}$$

Pro modulo-2 v aritmetice platí, že cokoliv je sečtené samo se sebou je rovno 0. Proto:

$$\frac{M(x) + R(x)}{G(x)} = Q(x) + \frac{0}{G(x)} = Q(x) + 0 \quad \text{Rovnice 29}$$

$$\frac{B(x) + D(x)}{G(x)} = C(x) + \frac{0}{G(x)} = C(x) + 0 \quad \text{Rovnice 30}$$

Potom:

$$\frac{M(x) + R(x) + B(x)}{G(x)} = Q(x) + C(x) + \frac{0}{G(x)} + \frac{D(x)}{G(x)} \quad \text{Rovnice 31}$$

4.1.4. FCE Code_ADS_B

Funkce, která superponuje *Preambuli*, *Zprávu a Paritu* na sebe. Vstupem je vzorkovací perioda a zpráva (včetně preamble, paritní sekvence (CRC kód)). Výstupem je pak výsledný signál s informací k odeslání.



4.1.5. FCE DeCode_ADS_B

Jedná se reverzní proces pro to, co bylo popsáno výše. Vstupem je ADS_B_OUT (uměle vytvořený signál ADS-B) a vzorkovací perioda. Výstupem je pak ADS-B zpráva, která byla na počátku vytvořena.

Zpráva přijatá bez chyb:

$$R(x) = D(x)$$

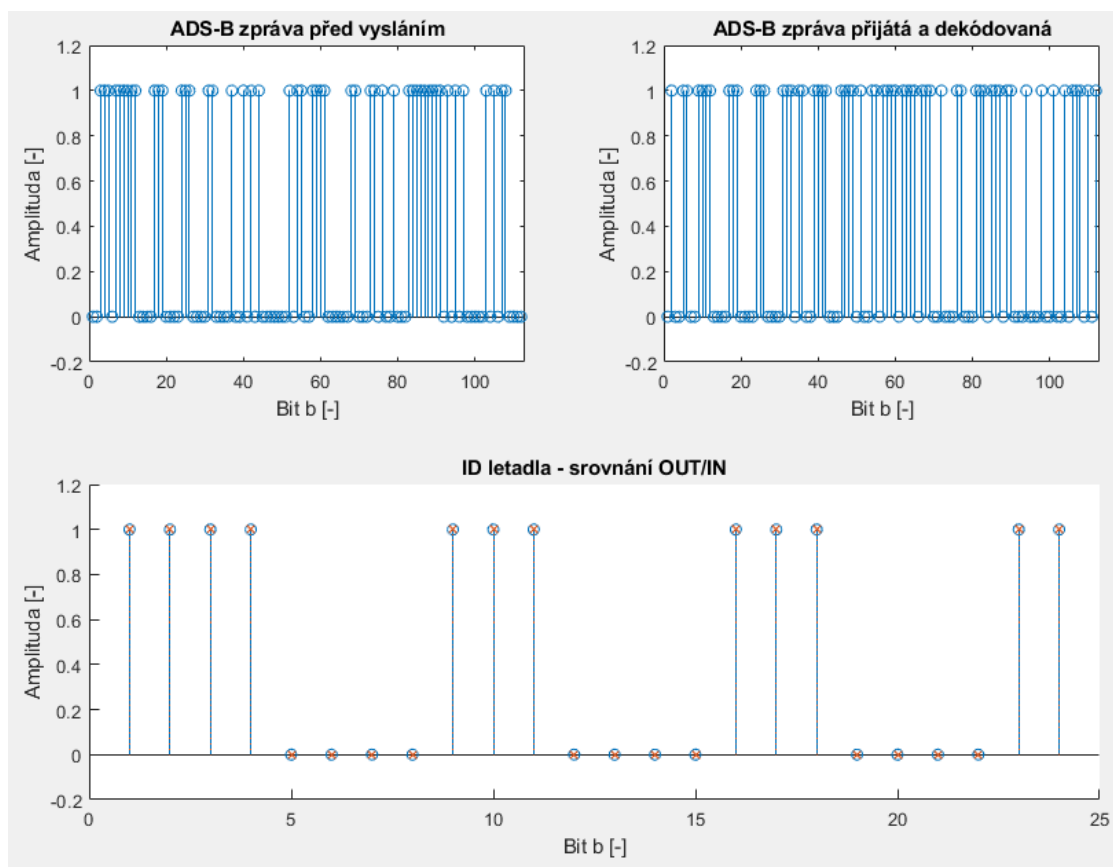


Figure 7: ADS-B OUT/IN - porovnání ID letadla

4.1.6. FCE Noise_Add

Vstupem této funkce je signál ADS-B/Out, na který je superponovaný šum. Výstupem je ADS-B/Out se šumem.

Aditivní šum:

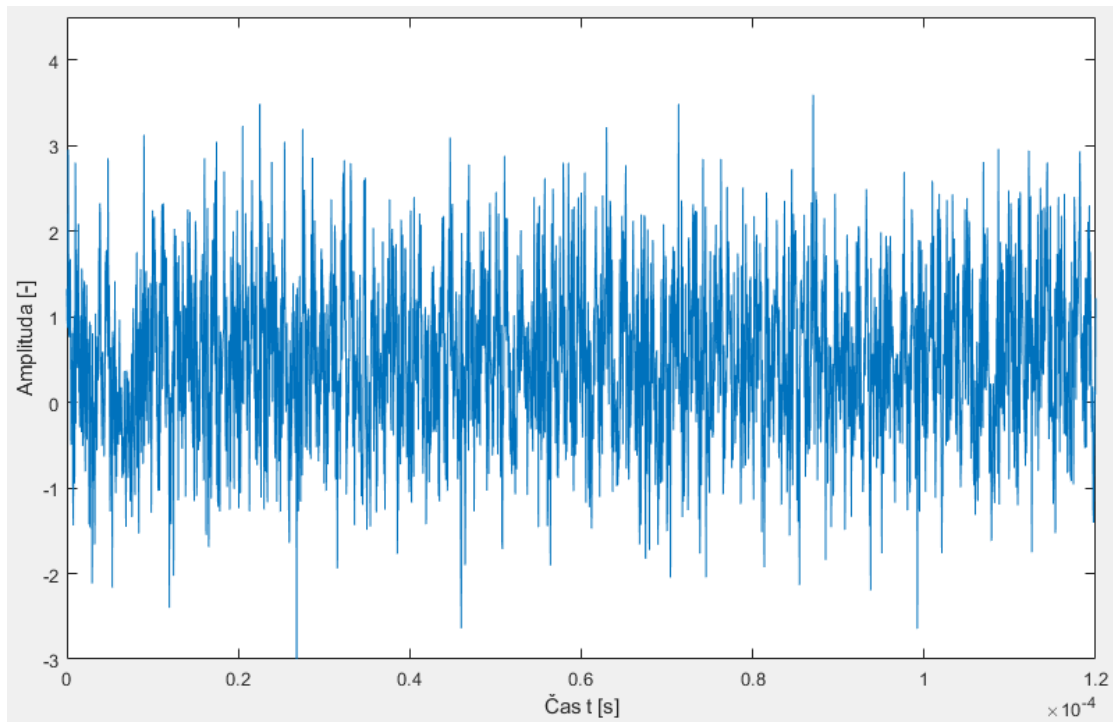


Figure 8: ADS-B/OUT - se šumem

4.1.7. FCE TimeDif

Vstupem této funkce je signál, který chceme posunout v čase a „délka“ tohoto signálu. Výstupem je pak signál, který je náhodně umístěn v délce tohoto signálu. Tím pádem dostáváme náhodný časový posun. Ukázkou lze vidět v grafu níže.

Přidání časového posunu:

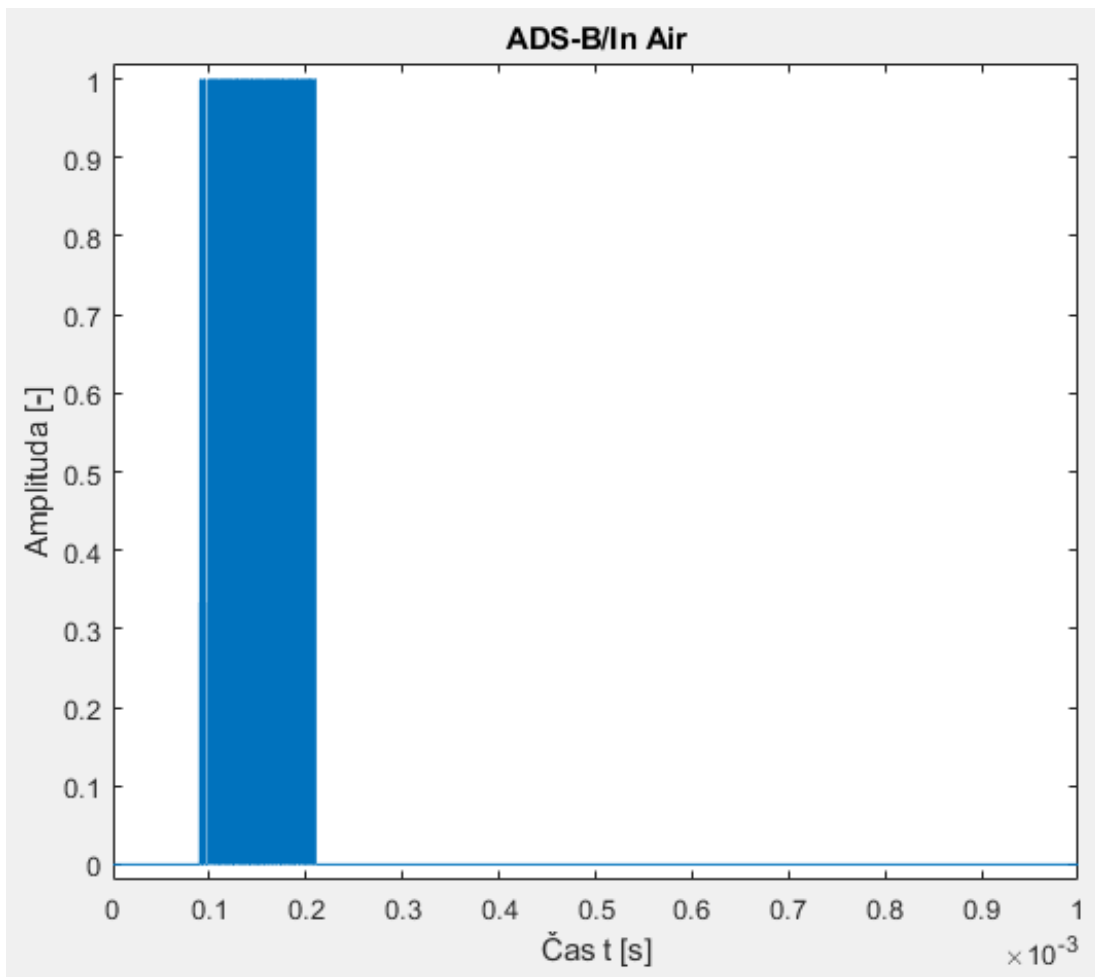


Figure 9: ADS-B/OUT - s čas. posunem

Výsledný signál ADS-B je náhodně posunutý v čase s přidaným aditivním šumem. Takovýto signál je následně přijat na anténu přijímače, kde by měl být detekován za pomoci preamble a následně dekodován. Může však nastat situace, že signál je natolik degradován například šumem, že jej nelze detekovat, natož dekodovat.

Výsledný signál ADS-B:

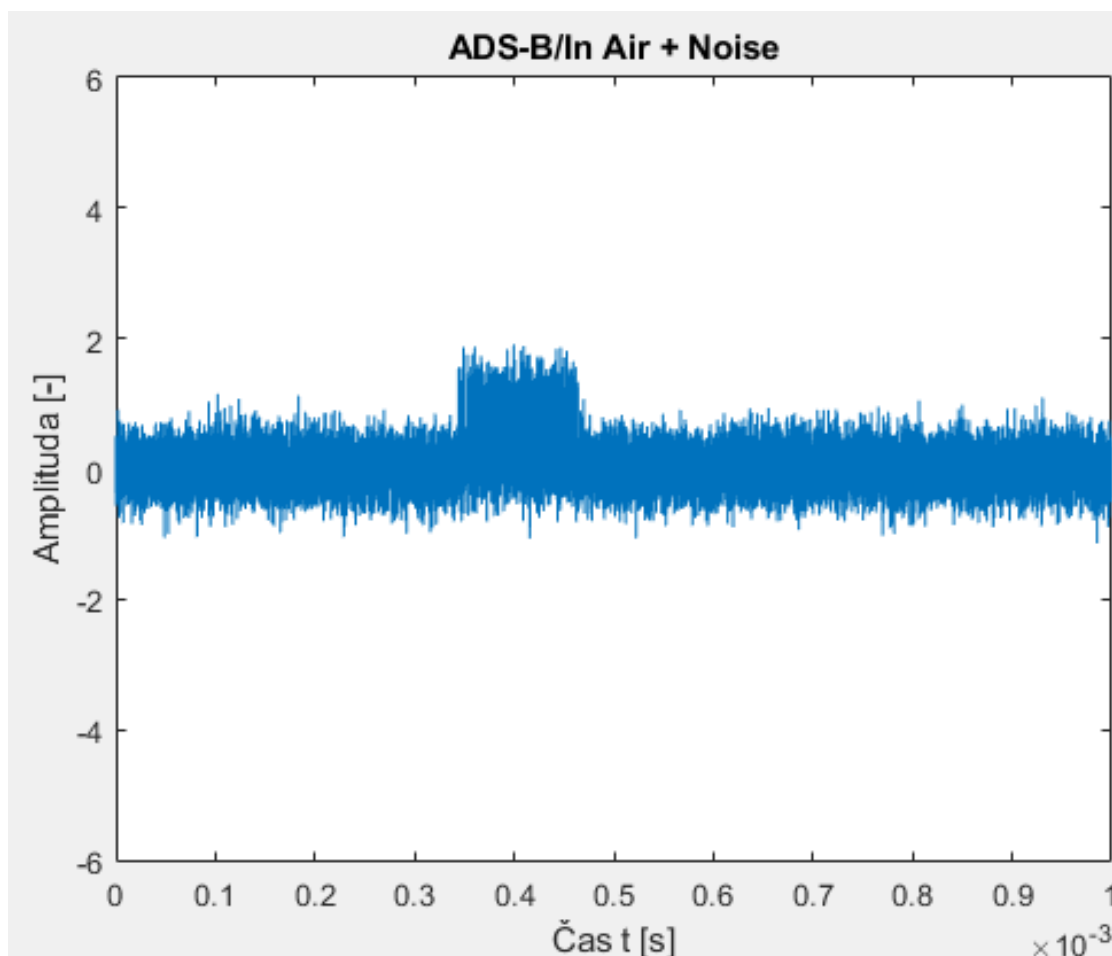


Figure 10: ADS-B/OUT - Obecný signál (šum + čas. posun)

4.1.8. FCE Detection

Pro: $s_1(t + \tau)$ Preambl + posun τ .

$s_1(t)$ Vstupní signál.

ADS-B Detekce:

$$R_{12}(\tau) = \sum_{-\infty}^{+\infty} s_1(t + \tau) s_2(t) \quad \text{Rovnice 32}$$

V tomto případě byla využita již vnořená funkce v matlabu. Funkce xcorr, jejíž vstupem je preamble a signál ADS-B/Out, na který byl již superponovaný časový posun s aditivním šumem. Jedná se o vzájemnou korelaci těchto dvou signálů neboli určuje tak vzájemnou podobnost. Výsledek této korelace je zobrazen v následujícím grafu níže.

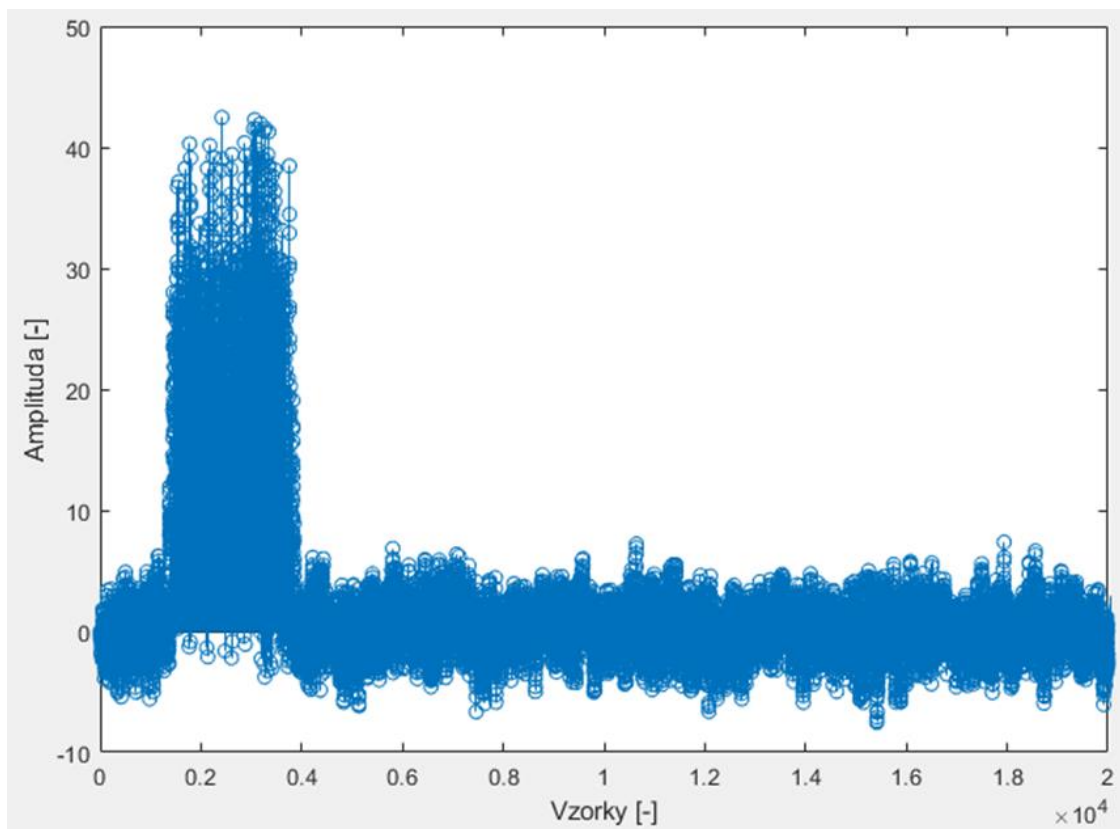


Figure 11: FCE xcorr (preambl, signal)



V poslední části této podkapitoly je názorná ukázka výsledku těchto vnořených funkcí. Jsou zde vidět tři grafy (ADS-B/Out – signál, který je vyslán z transpondéru na palubě letadla; ADS-B/AI – „In Air“ signál, který je podroben degradaci signálu (šum + časový posun); ADS-B/In – signál, který byl detekován, přijat a připraven dále k dekodování). Jedná se o vstup na přijímači.

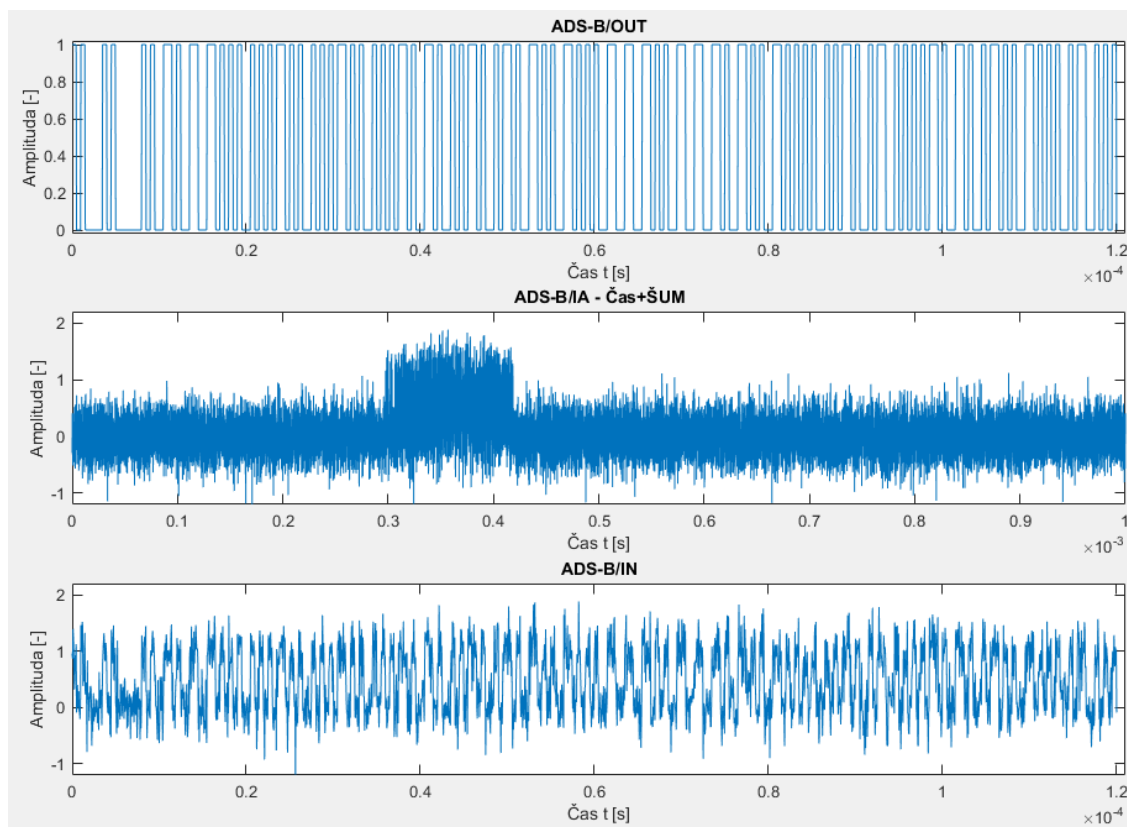


Figure 12: ADS-B OUT, IA, IN

4.2. SCRIPT ADS_B_TEST_XXX

Script, který spustí Test o „n“ testech pro každou hodnotu útlumu „u“ v daných mezích a po určitém kroku. Vyhodnocuje úspěšnost detekce signálu a jeho dekódování.

4.2.1. Reference

První z testů je pro 1 signál se šumem, $u = \langle -6; 1 \rangle$ s krokem 0,001. HH a DH jsou hranice zájmu. Jedná se o subjektivní hranici, kde cokoliv nad HH je považováno, že úspěšnost je natolik vysoká, aby dále nebyla zkoumána; DH je spodní hrana a cokoliv se nachází pod ní je příliš neúspěšné. Je zde zkoumáno jak se „S“ (hysterezní) křivka chová mezi DH a HH.

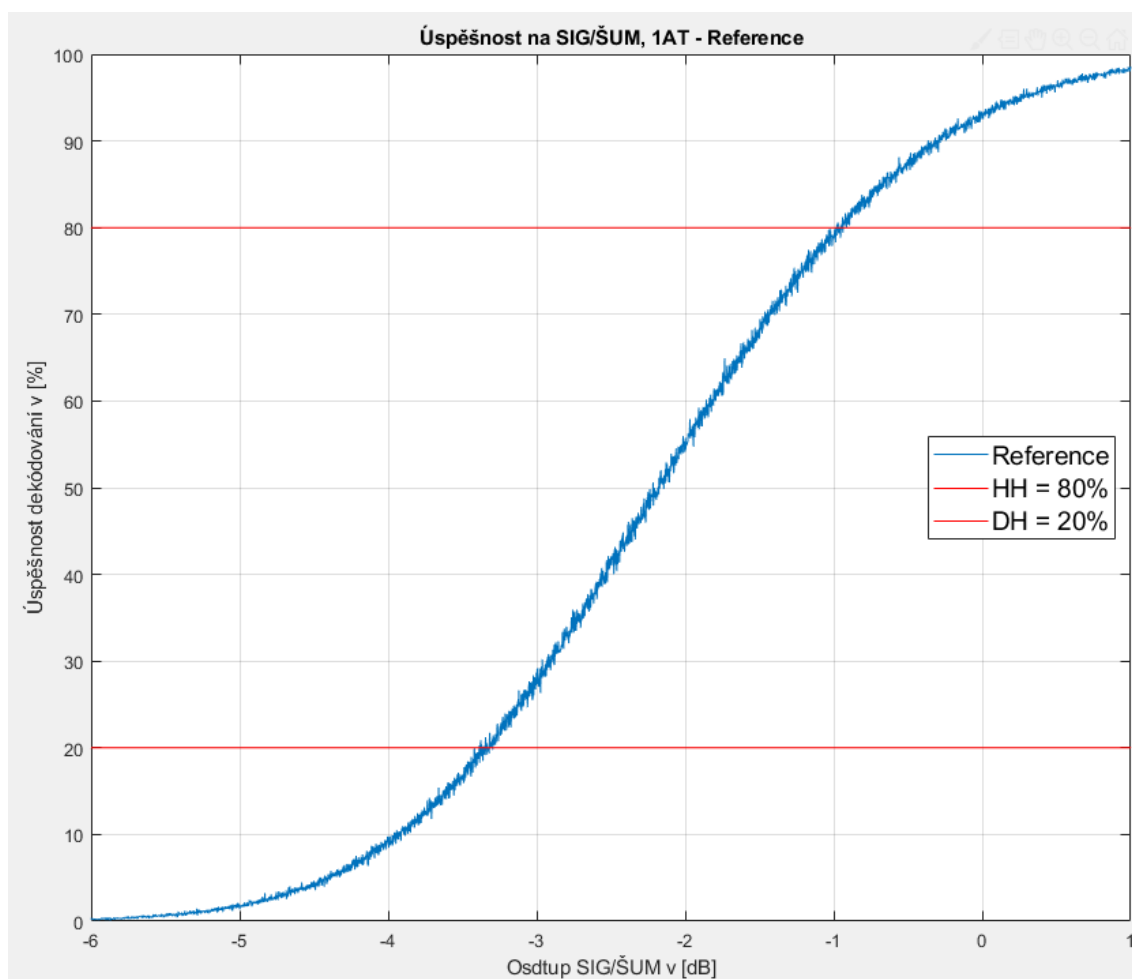


Figure 13: Úspěšnost dekódování pro 1AT ŠUM

Tento test je uskutečněn i pro 1 anténu, kde je signál časově zpožděný a s přidaným aditivním šumem. Zde vstupuje do výpočtu **FCE Detection**, která za pomoci korelace mezi přijatým signálem a známé preamble hledá maxima funkce, která se snaží dekódovat. Proto jsou výsledkem 2 grafy. První je „stejný“/podobný předchozímu. Druhý je samotná úspěšnost detekce tohoto signálu. **FCE Detection** funguje na bázi, kde je známý čas (pozice) počátku signálu a pokud detekční funkce „netrefí“ správný vzorek pro detekci, tak je automaticky vyhodnocen jako *Chyba detekce*. Je zde zavedena tolerance v podobě 3 vzorků. Mohou zde být diskuse o přísném kritériu této detekce. Jelikož je funkce schopná „trefit“ správný vzorek po několika iteracích. Nicméně je znatelně prodloužena doba výpočtu jedné simulace. Doba prodloužení simulace je v řádech několika jednotek-desítek sekund pro jednu iteraci. Toto číslo pak dále násobeno s počtem testů na hodnotu útlumu. Z toho důvodu nebylo toto kritérium navýšeno na vícero vzorků.

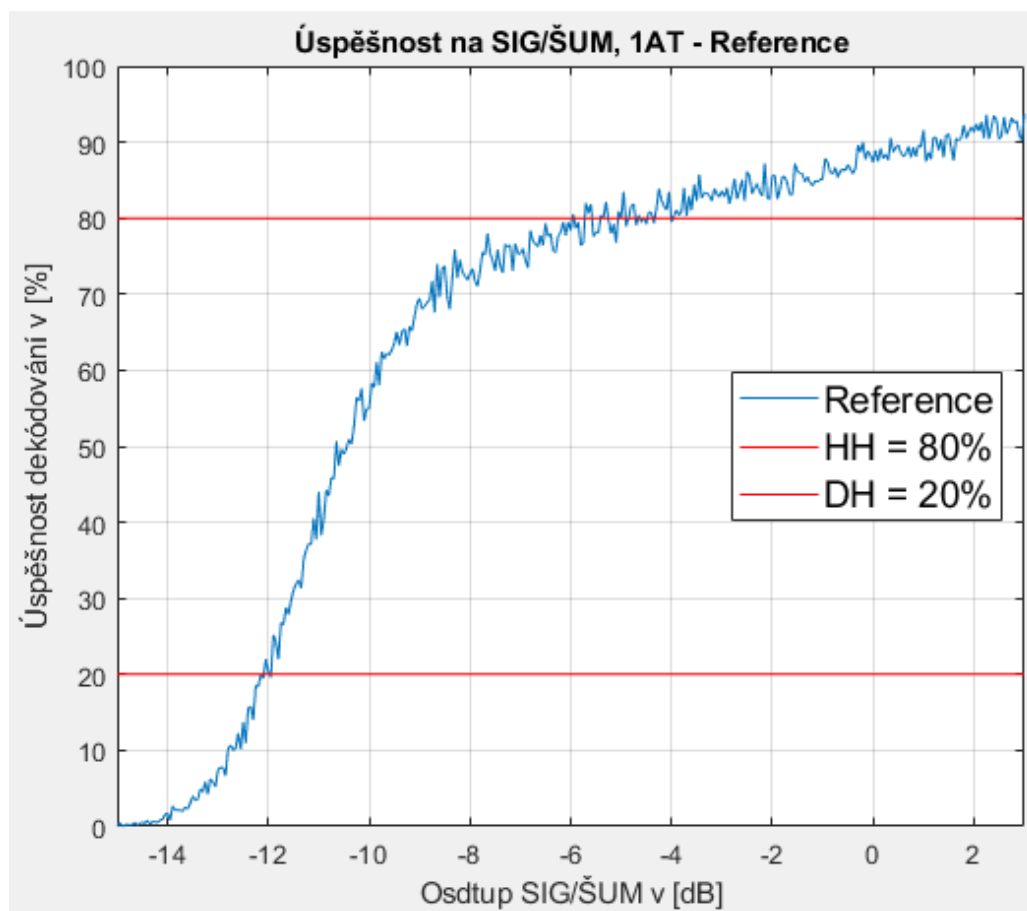


Figure 14: Úspěšnost dekódování pro 1AT ŠUM+ČAS



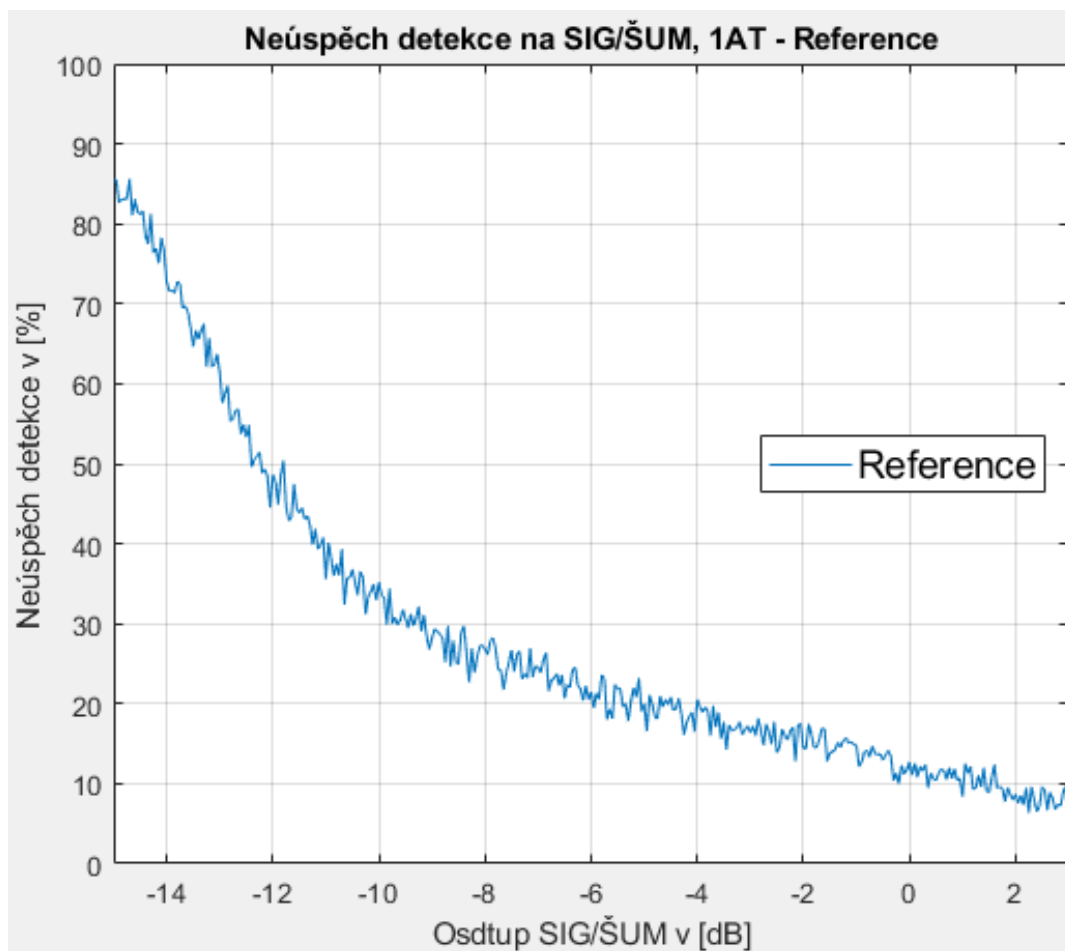


Figure 15: Neúspěšnost detekce pro 1AT ŠUM+ČAS

4.2.2. 2 AT – kombinovaný test

Tento kombinovaný test je prováděn pro 2 antény. Kombinace: 1 – šum + šum; 2 – šum + čas. posun, tento posun je na příjmu stejný; 3 – kombinací je šum + čas. posun, kde je rozdílný časový posun na příjmu.

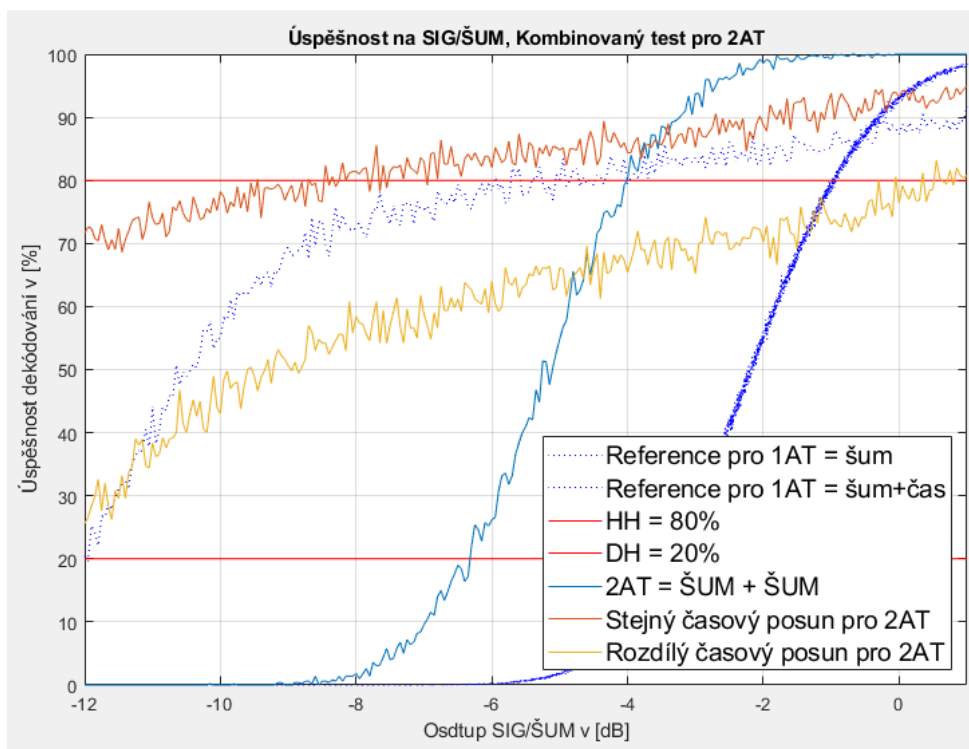


Figure 16: Kombinovaný test pro 2AT, úspěšnost dekódování

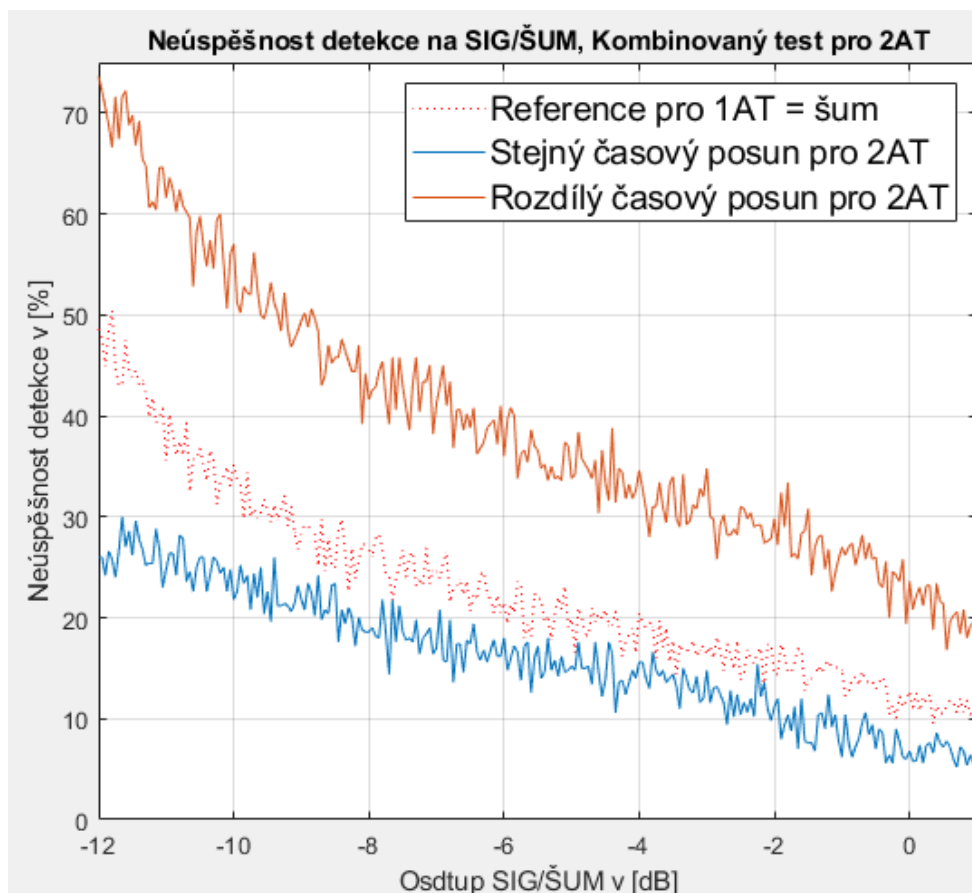


Figure 17: Kombinovaný test pro 2AT, neúspěšnost detekce



4.2.3. Rychlý test pro 3 AT

Test pro 3 antény. (2x reference: 1 – reference pro 1AT se šumem, 2 – reference pro 1AT se šumem a časovým posunem; 2x test pro 3 antény: 1 – příjem na 3AT se šumem, 2 – příjem na 3AT se šumem a čas. posunem)

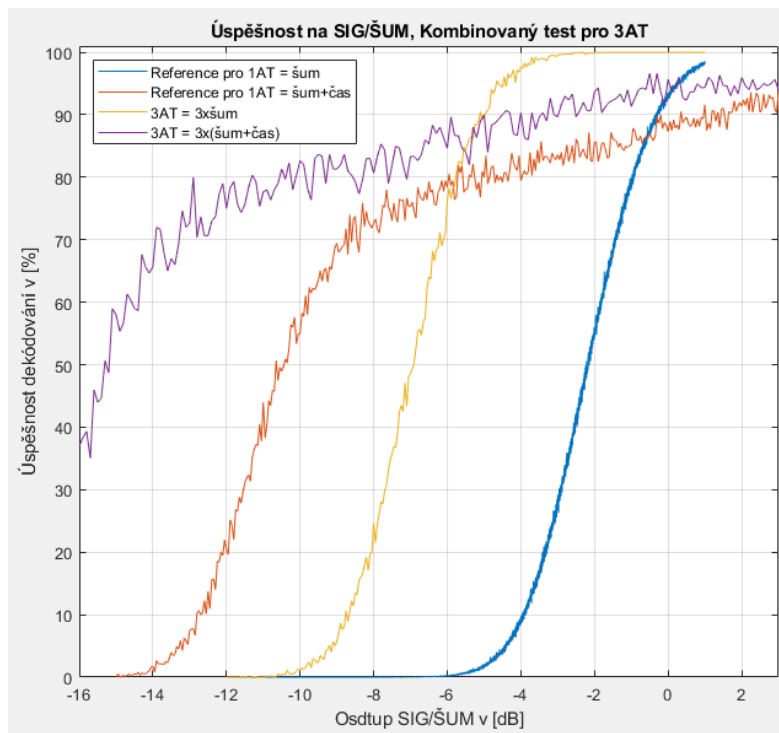


Figure 18: Test pro 3AT (šum+čas), úspěšnost dekódování

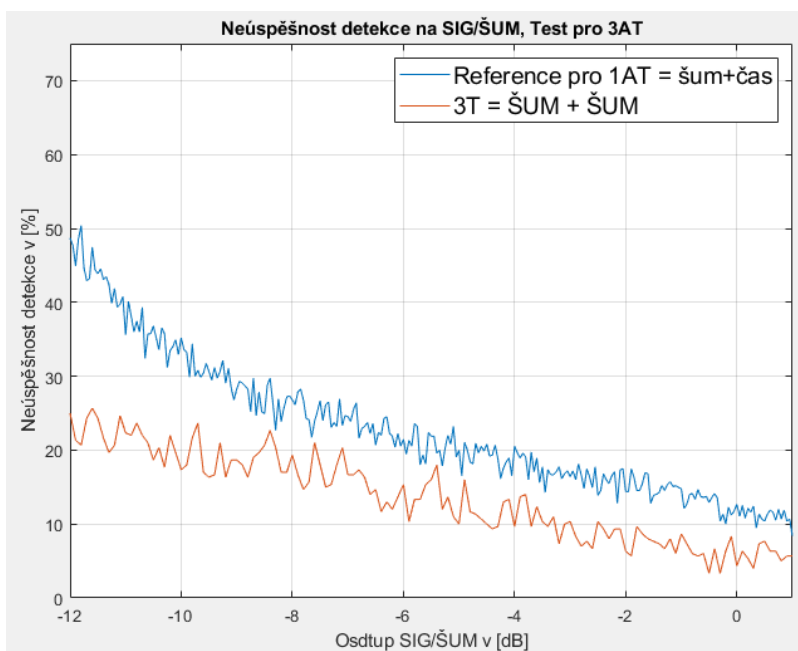
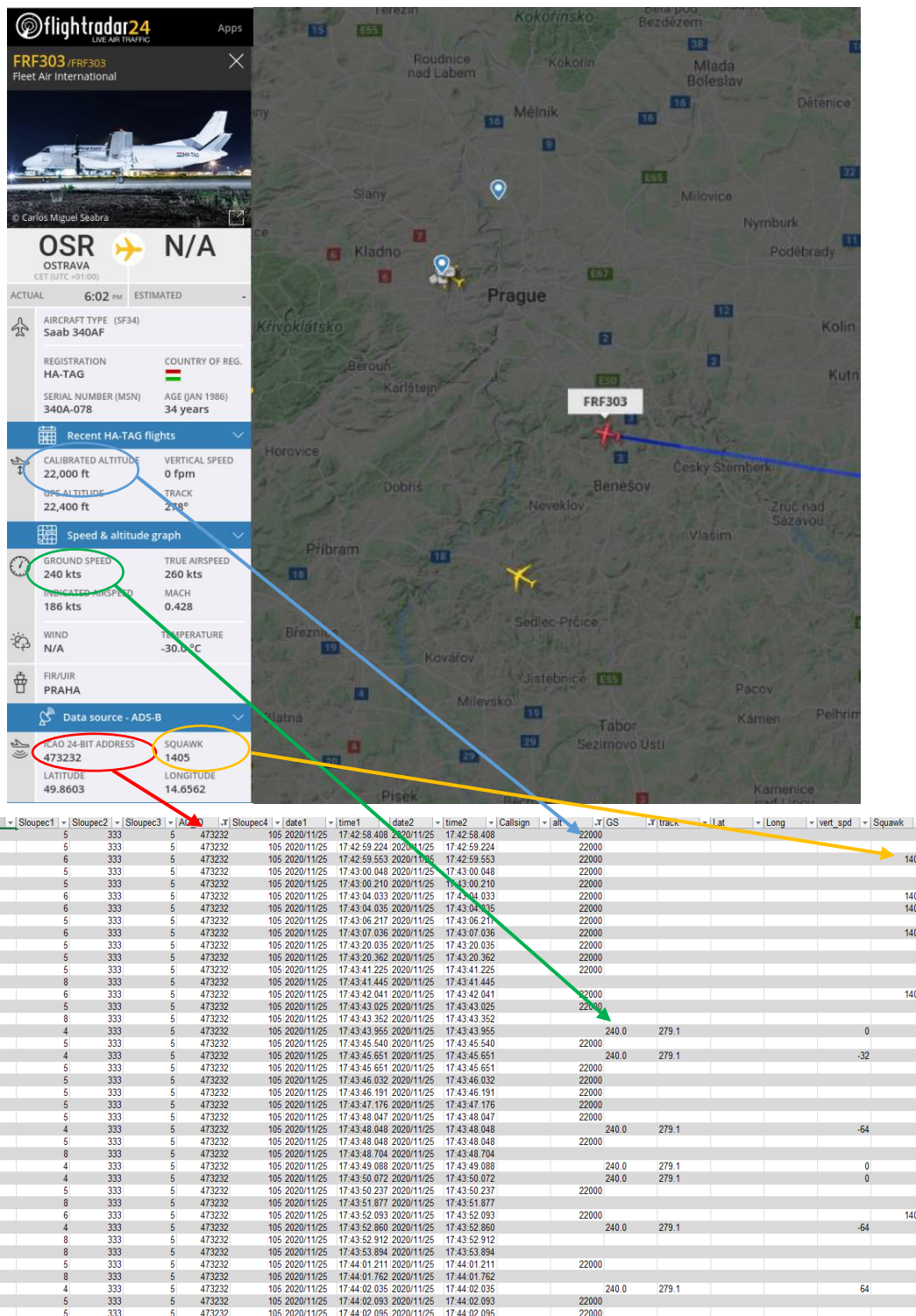


Figure 19: Test pro 3AT (šum+čas), neúspěšnost detekce



4.3. Ukázka dat z FR24

Za pomoci antény, Raspberry Pi a aplikace FR24 je zkonstruována ukázka reálných dat z ADS-B. Slouží pouze k názorné ukázce, jak lze pohlížet na monitorování vzdušného prostoru.



4.4. Vyhodnocení

Předpokládá se synchronnost všech antén na přijímači. Dále zde vzniká otázka, jak by přijatý signál vypadal při mnohocestném šíření a jednalo by se o odraz, či jiný způsob degradace signálu.

Je-li zkoumání zaměřeno na dekódování signálu pouze s aditivním šumem, lze vidět značné zlepšení, pokud se přidají další antény. Úspěšnost dekódování pro 1 anténu s odstupem SIG/ŠUM = -2 dB je přibližně kolem 50 %. Zatímco pro 2 antény se docílí stejné úspěšnosti (50 %) i při odstupě SIG/ŠUM = cca -5,5 dB. To samé platí pro 3 antény s odstupem SIG/ŠUM = cca -7 dB, stejně tak pro 4 až 5 antén. Z toho lze vyvodit, že s přidáním množství antén se zlepšuje exponenciálně úspěšnost dekódování při horších odstupech SIG/ŠUM.

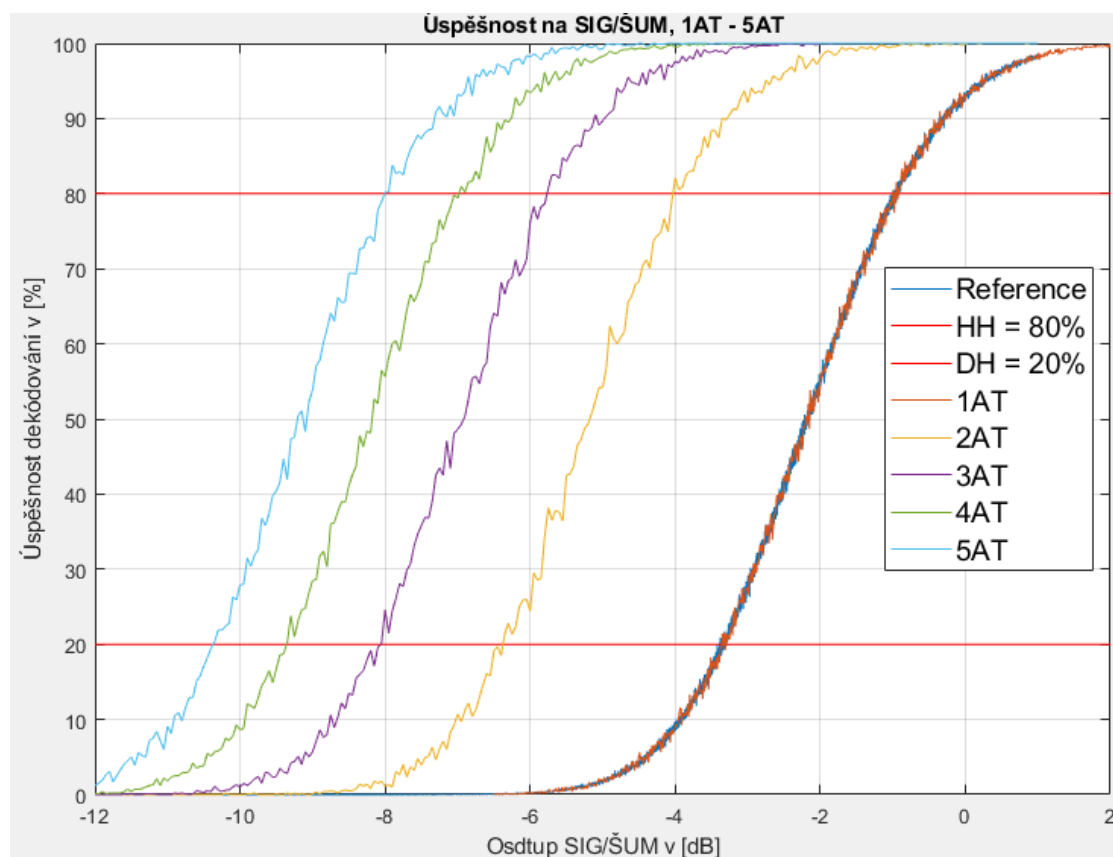


Figure 20: Úsp na SIG/ŠUM, 1 - 5 antén (pouze šum)

Další testy jsou zaměřeny na úspěšnost detekce signálu. V reálném prostředí je sledováno frekvenční pásmo v nepřetržitěm čase, kdy je vyčkáváno na to, až signál s daným typem zprávy s informacemi dorazí. K tomu slouží preamble (viz 4.1.1), která informuje, kde

zpráva začíná. Díky tomu lze hledat v obecném signálu právě hledanou preambuli. Jak je z grafů níže vidět, samotná detekce posouvá hranice a strmost „S“ (hysterezní) křivky. Lze říci, že implementace funkce pro detekci zlepšuje samotné dekódování při horších odstupech SIG/ŠUM, ale na druhou stranu zanáší do celkové úspěšnosti i chybu detekce, která má značný vliv, pokud se úspěšnost dekódování blíží k hranici 70 %, kde začíná volněji saturovat, a tím zhoršuje úspěšnost dekódování při lepších odstupech SIG/ŠUM. Toto zalomení lze regulovat pomocí přísnějších/benevolentnějších kritérií pro detekci signálu, kde v tomto případě jsou to +/- 3 vzorky. Benevolentnější kritéria však vedou k značnému prodloužení času simulace. Z důvodu malé výpočetní kapacity nebyla do této práce zahrnuta.

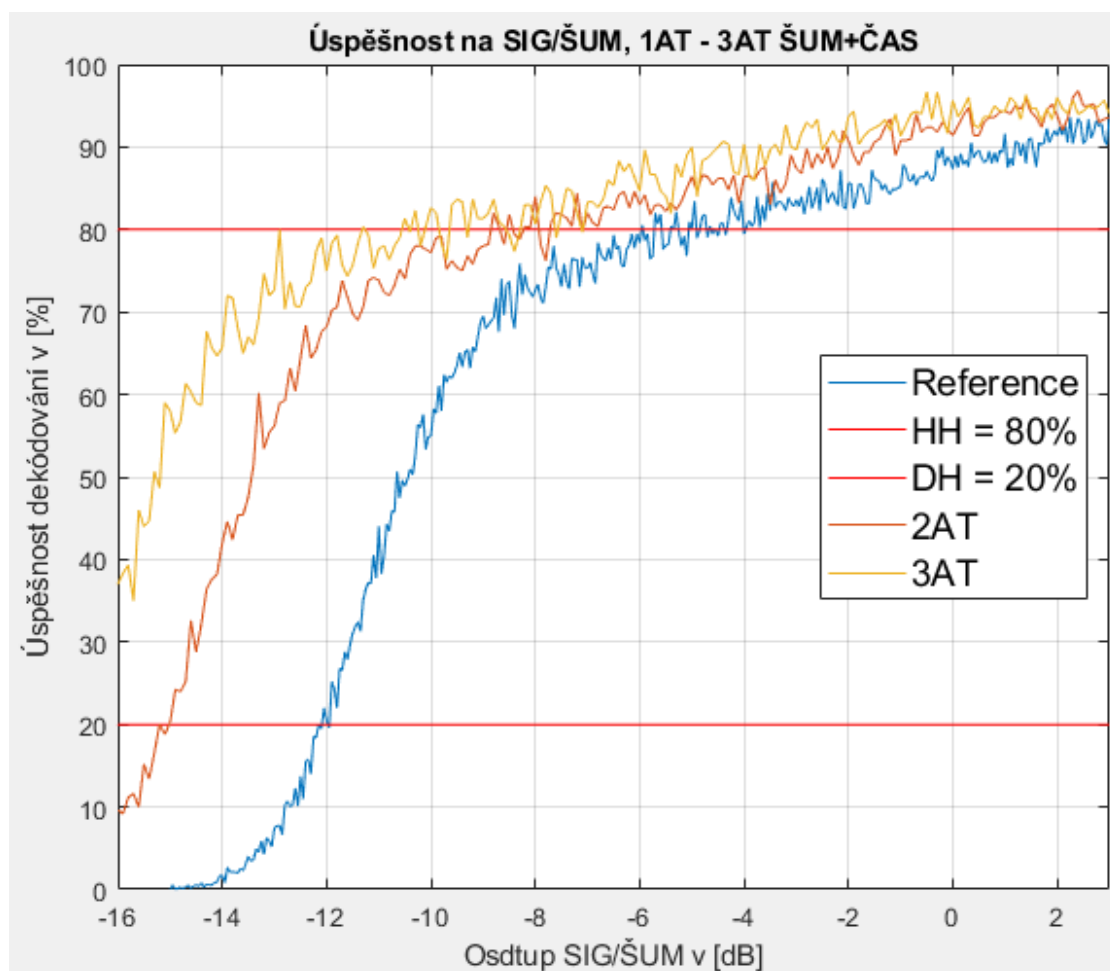


Figure 21: Úspěšnost dekódování pro 1 - 3 AT, šum + čas

Z grafu výše je patrné, že při odstupe SIG/ŠUM = -12 dB pro 1 anténu je úspěšnost dekódování na hranici kolem 20 %. Při použití 2 antén to je odstup SIG/ŠUM = cca -15



dB. A pro 3 antény se křivka posouvá zřetelně vlevo, kde pomocí odhadu oka se dostáváme na odstup SIG/ŠUM = kolem -18 dB.

V následujícím grafu níže je vidět, že při použití 2 a více antén se neúspěšnost detekce při velkých odstupech SIG/ŠUM snížila více jak o 30 %. A kolem -8 dB se dostáváme do oblasti saturace.

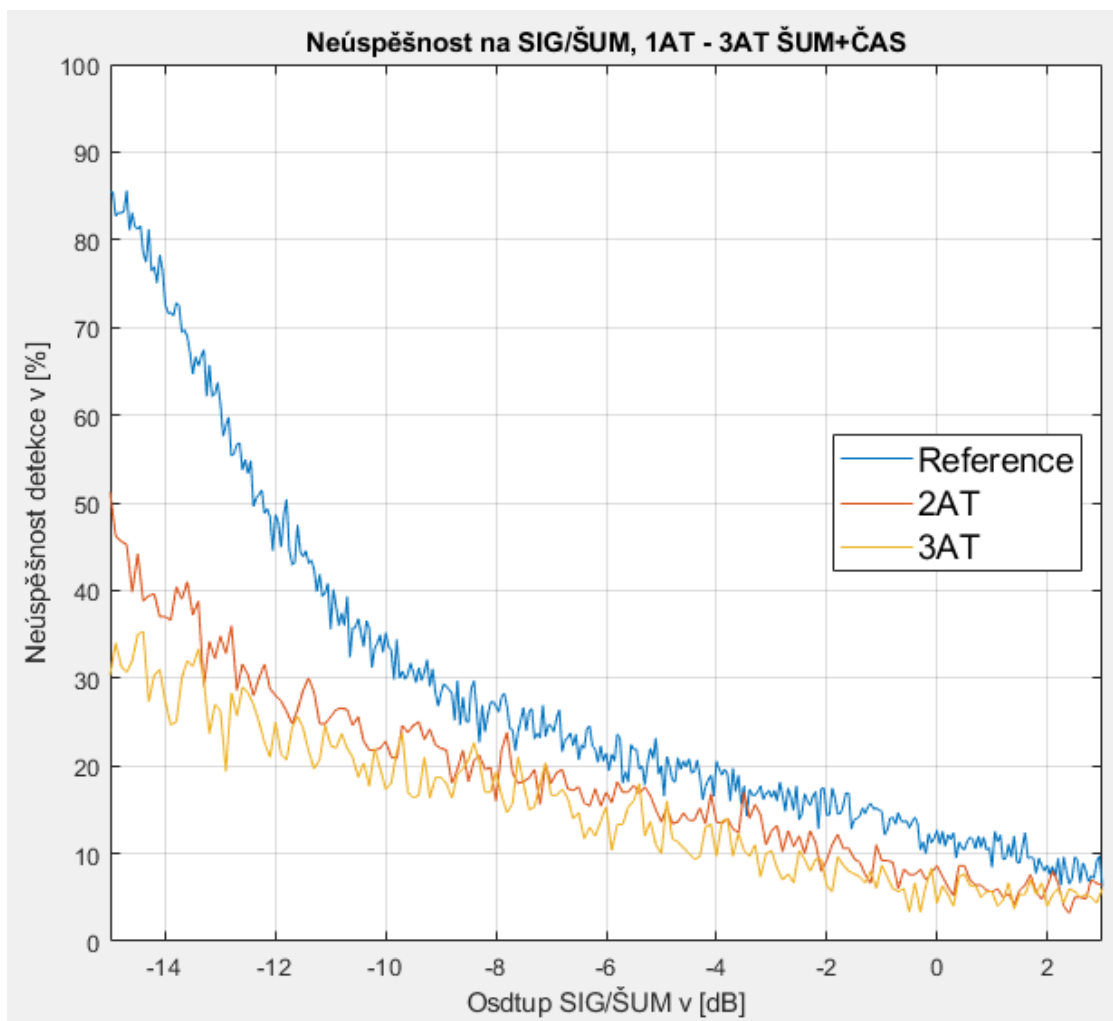


Figure 22: Neúspěšnost detekce pro 1 - 3 AT, šum + čas

5. Závěr

Cílem této diplomové práce s názvem Vícekanálový příjem a zpracování ADS-B signálů bylo porozumění navigačním, komunikačním a přehledovým systémům, jako velkému komplexnímu celku, který je využíván pro bezpečné sledování a navigování ve vzdušném prostoru, bez kterého se moderní letectví neobejde. Dále pak bližší porozumění systému ADS-B, který je stále více implementován do moderních letadel a je podroben přísným standardům. Dále pak pochopení šíření rádiových vln v prostoru, na které působí okolní vlivy rušivým faktorem a metody zpracování takto degradovaného signálu. Pomocí těchto znalostí sestrojím softwarové rádio, které bude simulovat ADS-B zprávu s rušivými elementy a aplikovat na tento signál SIMO/MIMO metody.

Tento ADS-B signál je konstantně vysílán a může se šířit i obtížným prostředím a tím degradovat výsledný signál na přijímači. To vede k znehodnocení informace (zprávy), až do stavu špatného dekódování či dokonce samotnému neúspěchu detekce. Proto je v této práci použita metoda MIMO, konkrétně (MISO = Multiple Input – Single Output), která je typická svým provedením v podobě jedné antény na vysílači a vícero antén na přijímači. Toto uspořádání vede ke zlepšení signálu na příjmu. V případě bílého šumu lze tyto signály sečíst, tím potlačit šum a zesílit hledaný ADS-B signál.

Výsledkem zkoumání provedeným v praktické části práce je to, že se s každou přidanou anténou se zlepšuje detekce signálu a jeho dekódování. Je nutné však brát v úvahu, že se nejedná o přímou úměru, takže s každou přidanou anténou zisk na úspěšnosti klesá.

Pokud by se mělo jednat o nízkonákladovou implementaci pro sledování vzdušného prostoru, lze říci, že takto řešený systém by mohl v budoucnu zastoupit jiné systémy.

Uvedené v tabulce jsou pouze orientační.

Tato práce může sloužit jako podklad pro další zkoumání, rozšiřování tohoto modelu pro simulace a dále pak k testování reálných dat.

Seznam zdrojů

1. Pleninger, Stanislav. campuscvut. *my.sharepoint*. [Online] <https://campuscvut-my.sharepoint.com/>.
2. Sky brary. [Online] https://www.skybrary.aero/index.php/File:PSR_1.png.
3. ČR, MINISTERSTVO DOPRAVY. Aeronautical Information Management. *AIM.rlp*. [Online] https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-10/L-10iv/data/print/L10-iv_cely.pdf.
4. Bertok, Tibor. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. [Online] https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=68618&aid_redir=1.
5. Moderní Letecká Navigace. *airnav.eu*. [Online] <http://www.airnav.eu/index.php>.
6. Puričér, Pavel. DSpace. *ČVUT DSpace*. [Online] https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/85526/F3-D-2019-Puricer-Pavel-PhD%20Thesis_Pavel_Puricer.pdf?sequence=-1&isAllowed=y.
7. Šturc, Filip. Dspace. *dspace.cz*. [Online] <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/65307/F3-BP-2016-Sturc-Filip-Dekodovani%20ADS-B%20signalu.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
8. radartutorial. <https://www.radartutorial.eu/01.basics/!rb02.en.html>.
<https://www.radartutorial.eu/01.basics/!rb02.en.html>. [Online]
<https://www.radartutorial.eu/01.basics/!rb02.en.html>.
9. RadarTutorial. [Online] https://www.richardsonrfpd.com/docs/rfpd/Radar_Tutorial_Book2.pdf.
10. Umlauf, Lukáš. *Dspace*. [Online] https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63960/F6-DP-2015-Umlauf-Lukas-Diplomova_prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
11. Nepovím, Miroslav. *dk.upce.cz*. *dk.upce*. [Online] https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/68060/NepovimM_GeneratorSignalu_JP_2017.pdf?sequence=3&isAllowed=y.
12. Tisoň, David. *dk.upce*. [Online] https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/68074/TisonD_Merenivykonu_MP_2017.pdf?sequence=3&isAllowed=y#:~:text=Radiokomunikace%20je%20jedna%20z%20v%C3%BDkonem%20kter%C3%BD%20p%C5%99ijme%20p%C5%99ij%C3%A4ma%20C4%8D.&text=Zisk%20p%C5.
13. electronics-notes. *Electronics Notes*. [Online] <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/mimo/iso-simo-miso-mimo.php>.

14. Noskievič, Tomáš. DSpace. *ČVUT DSpace*. [Online]
<https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/83420/F6-DP-2019-Noskivic-Tomas-DPverze24MAY.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>.
15. Agarwal, Tarun. EDGEFX.in. [Online] <https://www.edgefx.in/multiple-input-and-multiple-output-mimo-wireless-communications/>.
16. Saglam, Halil Derya. core.ac.uk. *core.ac.uk*. [Online]
<https://core.ac.uk/download/pdf/36695047.pdf>.
17. Almahri, Abdullah G. etda. [Online]
https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/9334.
18. Bueno, Raúl Vicen. core.ac.uk. *core.ac.uk*. [Online]
<https://core.ac.uk/download/pdf/58909688.pdf>.
19. Esipa. Esipa. [Online] <https://esipa.cz/sbirka/sbsrv.dll/sb?DR=SB&CP=32020R0469>.

Seznam použitých zkratek

ATC = Air Traffic Controller

PBN, PBC, PBS = Performance Based – Navigation, Communications, Surveillance

ARK/ADF = Automatický RadioKompas / Automatic Direction Finder

SSB/DSB-AM = Single/Double SideBand-Amplitude Modulation

TDM/PCM = Time Division Multiplex/Pulse-Code Modulation

VoIP = Voice over Internet Protocol

AT = Anténa

Seznam obrázků

Obrázek 1: CNS přehled [1]	Chyba! Záložka není definována.
Obrázek 2: CNS diagram [1]	- 7 -
Obrázek 3: Princip NDB [2]	- 9 -
Obrázek 4: Princip DME [2]	- 10 -
Obrázek 5: Princip VOR [2]	- 11 -
Obrázek 6: Princip TACAN [2]	- 12 -
Obrázek 7: Princip ILS [2]	- 13 -
Obrázek 8: Princip PSR [3]	- 20 -
Obrázek 9: SSR All-Call/Roll-Call perioda [1]	- 21 -
Obrázek 10: SSR Mode A/C [1]	- 22 -
Obrázek 11: Princip SSR [4]	- 24 -
Obrázek 12: Princip ADS-B	- 29 -
Obrázek 13: Mode S - Extended Squitter [1]	- 30 -
Obrázek 14: Spektrum [5]	- 31 -
Obrázek 15: Princip antény vysílač/přijímač [5]	- 32 -

Seznam grafů a schémat

Figure 1: Schéma formátu SISO [13]	- 37 -
Figure 2: Schéma formátu SIMO [13]	- 37 -
Figure 3: Schéma formátu MISO [13]	- 39 -
Figure 4: Schéma formátu MIMO [13]	- 40 -
Figure 5: Formát Mode S - ES	- 42 -
Figure 6: ADS-B/OUT	- 42 -
Figure 7: ADS-B OUT/IN - porovnání ID letadla	- 45 -
Figure 8: ADS-B/OUT - se šumem	- 46 -
Figure 9: ADS-B/OUT - s čas. posunem	- 47 -
Figure 10: ADS-B/OUT - Obecný signál (šum + čas. posun)	- 48 -
Figure 11: FCE xcorr (preambl, signal)	- 49 -
Figure 12: ADS-B OUT, IA, IN	- 50 -
Figure 13: Úspěšnost dekódování pro 1AT ŠUM	- 51 -
Figure 14: Úspěšnost dekódování pro 1AT ŠUM+ČAS	- 52 -
Figure 15: Neúspěšnost detekce pro 1AT ŠUM+ČAS	- 53 -
Figure 16: Kombinovaný test pro 2AT, úspěšnost dekódování	- 54 -
Figure 17: Kombinovaný test pro 2AT, neúspěšnost detekce	- 54 -
Figure 18: Test pro 3AT (šum+čas), úspěšnost dekódování	- 55 -
Figure 19: Test pro 3AT (šum+čas), neúspěšnost detekce	- 55 -
Figure 20: Usp na SIG/ŠUM, 1 - 5 antén (pouze šum)	- 57 -

Figure 21: Úspěšnost dekodování pro 1 - 3 AT, šum + čas..... - 58 -
Figure 22: Neúspěšnost detekce pro 1 - 3 AT, šum + čas..... - 59 -

Seznam tabulek

Tabulka 1: Downlink formáty Mode S..... - 23 -
Tabulka 2: Kategorizace radiových vln..... - 31 -
Tabulka 3: Koeficienty útlumu - 35 -
Tabulka 4: Orientační cenová relace [4] **Chyba! Zložka není definována.**

Seznam příloh

Matlab, simulace ADS-B

