



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole**

Dekódování ADS-B signálu

ADS-B signal decoding

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Studijní obor: Komunikační technika

Vedoucí práce: Ing. Pavel Puričer

Filip Šturec

Praha 2016

„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: 26.5.2016

.....
Podpis

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval Ing. Pavlu Puričerovi za vedení této práce, za cenné rady a v neposlední řadě za trpělivost.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektromagnetického pole

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Filip Šturc**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Komunikační technika

Název tématu: **Dekódování ADS-B signálu**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s se systémem ADS-B určeným pro předávání informací v letecké dopravě. Zaměřte se na strukturu zpráv, algoritmus kódování a dekodování dat v rámci ADS-B zprávy. Na základě tohoto studia navrhnete a implementujete detekci a dekodování dat pro případ příjmu s přítomností šumu. Navržené metody implementujte v prostředí Matlab, návrh a implementaci ověřte simulací a testem s reálnými daty.

Seznam odborné literatury:

[1] International Civil Aviation Organization. Manual on the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems. Doc 9684. 3rd edition. 2004. ICAO Secretary General. Montreal, Quebec, Canada.

[2] M. I. Skolnik, Radar Handbook, 3rd edition, McGraw Hill 2008. ISBN 978-0-07-148547-0.

Vedoucí: Ing. Pavel Puričer

Platnost zadání: LS 2016/2017



prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 19. 2. 2016

Anotace:

ADS-B je systém používaný v letecké dopravě pro sledování jednotlivých letadel v leteckém provozu a pro předávání informace mezi jednotlivými letadly a leteckou kontrolou. Na rozdíl od sekundárních radarů tento systém využívá družice k určování polohy. Kromě informace o poloze lze přenášet také informaci o rychlosti, nadmořské výšce, destinaci letu a další.

Tato práce se zabývá strukturou signálu, který je vysílán letadly, dále generováním, dekodováním a detekcí tohoto signálu, a to jak generovaného, tak skutečného změřeného.

Klíčová slova:

ADS-B, sekundární radar, dekodování, detekce, signál, šum, zpracování signálu, MatLab

Summary:

ADS-B is a system being used at air traffic to surveillance of aircrafts and for exchange of information between aircrafts and other aircrafts and between aircrafts and air control. The main difference between ADS-B and secondary radar system is that ADS-B use satellites to determine position of an aircraft. Except of information about position this system is able to transmit information about velocity, altitude, flight destination and others. This thesis is about signal structure, which is broadcasted by aircrafts, generation, decoding and detection of this signal, generated and measured.

Seznam zkratek a symbolů:

ADS-B – Automatic Dependent Surveillance – Broadcast

CRC – Cyclic Redundancy Check

DPSK – Differential Phase-Shift Keying

GPS – Global Positioning System

MLAT – Multilateration

PPM – Pulse Position Modulation

SPI – Special Position Identification

XOR – Exclusive Or

t – reálná proměnná, čas

τ – reálná proměnná, časový posun

Obsah

1) Úvod	9
2) Sekundární radary a ADS-B	10
2.1) Základní princip sekundárních radarů	10
2.2) Popis jednotlivých módů sekundárních radarů	10
2.2.1) Mód A	10
2.2.2) Mód C	11
2.2.3) Mód S – Short squitter	11
2.2.4) Mód S – Extended squitter	13
2.3) Základní popis systému ADS-B	13
2.4) Kontrola parity a cyklické kódy	14
3) Generování odpovědi ADS-B v prostředí MatLab	17
3.1) Generování odpovědi ADS-B bez šumu	17
3.1.1) Popis použitých funkcí	17
3.1.2) Výsledný generovaný signál bez šumu	19
3.2) Dekódování generované odpovědi ADS-B a kontrola parity	20
3.2.1) Popis použitých funkcí	20
3.2.2) Samotné dekodování a kontrola parity	21
3.3) Detekce signálu bez šumu	21
3.3.1) Popis použitých funkcí	22
3.3.2) Detekce signálu posunutého v čase	22
3.4) Generování odpovědi ADS-B se šumem	24
3.4.1) Popis použitých funkcí	24
3.4.2) Generování odpovědi ADS-B se šumem	24
3.5) Dekódování odpovědi ADS-B se šumem	25
3.5.1) Dekódování odpovědi ADS-B s různými amplitudami šumu	25
3.6) Detekce signálu s přidaným šumem	30
4) Aplikace vytvořených metod zpracování signálu na změřené signály	32
4.1) Naměřený signál	32
4.2) Analýza naměřeného signálu	33
4.2.1) Analýza odpovědi a	33
4.2.2) Analýza odpovědi b	33

4.2.3) Analýza odpovědi c.....	34
4.2.4) Analýza odpovědi d.....	34
4.2.5) Analýza odpovědi e.....	34
5) Závěr.....	36
6) Seznam použité literatury.....	37
7) Seznam příloh.....	38
8) Seznam obrázků.....	39

1) Úvod

ADS-B je jedním z představitelů systémů pro sledování leteckého provozu a pro výměnu informací mezi jednotlivými letadly a leteckou kontrolou, společně se systémem sekundárních radarů a MLAT (multilaterace).

Je úzce spojen právě se systémem sekundárních radarů, ze kterého přímo vychází (konkrétně z módu S) a jehož má být nástupcem, ale k jehož plošnému nasazení pravděpodobně nedojde dříve než mezi lety 2020 a 2025. Na rozdíl od systému sekundárních radarů, které používají stanice na zemi k vysílání dotazovacích signálů a následně přijímají odpovědi letadel, ze kterých se dopočítává jejich poloha. Letadla, používající ADS-B, získávají informace o své poloze díky družicím a tuto informaci, spolu s dalšími, jako je informace o rychlosti, nadmořské výšce, destinaci letu atp., vysílají jednou za sekundu. Pro srovnání, informace u sekundárních radarů je přijímána jednou za 4-12 sekund. Signál, který obsahuje zprávu, vysílaný vysílači v letadlech, je přijat na určených pozemních stanicích a odtud je rovnou odeslán a zobrazen na monitorech letecké kontroly.

Další výhodou oproti sekundárním radarům je skutečnost, že si mohou informace vyměňovat i letadla mezi sebou a ne pouze prostřednictvím pozemních stanic, čímž odpadne nutnost vybavovat velké množství pozemních stanic zařízením pro příjem a pro vysílání těchto informací, což je pochopitelně výhodné i z ekonomického hlediska.

Jak již bylo řečeno ADS-B vychází z módu S sekundárních radarů, jedná se o jakési rozšíření rámce signálu módu S o zprávu ADS-B (mode S – extended squitter). Z klasického módu S se dochovala unikátní 24 bitová adresa letadla, čili každé letadlo má přidělenou svou vlastní adresu, kterou vysílá spolu s výše zmíněnými informacemi.

Jako u každého přenosu signálů i zde vznikají problémy spojené se šumem, který se dostává do signálu, s vícecestným šířením atd. V důsledku těchto problémů vznikají v přenosu chyby, které je nutno detekovat a pokud možno je i opravit. K tomu se používají takzvané cyklické kódy, díky kterým se vzniklé chyby odhalí a je-li to možné, i opraví.

Tato práce se zabývá detekcí signálu ADS-B s přítomností šumu a dekodováním dat, tímto signálem přenášených.

Cílem práce je navrhnout a implementovat metody pro detekci a dekodování signálu ADS-B a následně tyto metody ověřit simulací a testem se skutečnými daty.

2) Sekundární radary a ADS-B

Tato kapitola pojednává o obecných principech a zákonitostech systémů sekundárních radarů a ADS-B. V jednotlivých podkapitolách si povíme něco málo o tom, jak vlastně sekundární radary fungují, popíšeme si jednotlivé módy a formu a strukturu signálu, kterou tyto módy používají. Dále si uvedeme i systém ADS-B, který přímo vychází z módu S, a řekneme si, jak se provádí zabezpečení proti chybám, kontrola parity, a to pomocí cyklických kódů.

2.1) Základní princip sekundárních radarů

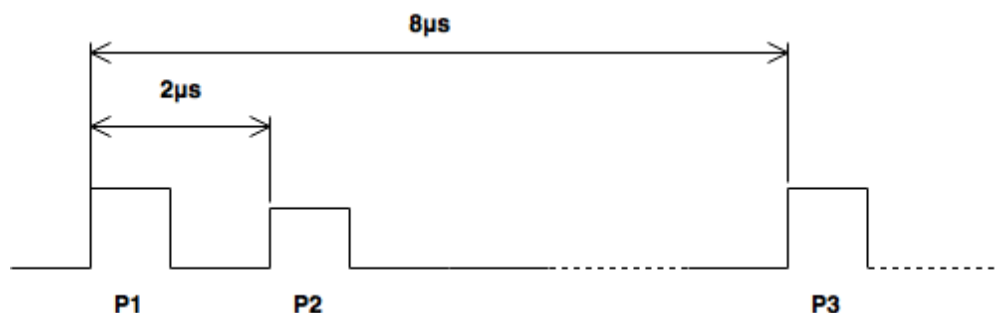
Jedná se o systém, který pracuje s dotazovači, které jsou umístěny na zemi, odpovídači (transpondéry), které jsou umístěny v letadlech a s přijímači sekundárního radaru, které jsou též na zemi.

K dotazování se používá rotující anténa, která v pravidelných intervalech vysílá dotazovací signály (pulzy, které se liší počtem a vzájemnou vzdáleností podle použitého módu), ve formě úzkých svazků, do prostoru a pokaždé, když transpondér zachytí dotazovací signál, odešle zpět kódovanou informaci o letadle, která se může lišit různou délkou i konkrétní informací o letadle v závislosti na použitém módu (módy A/C/S – viz níže). Tuto zprávu přijímá přijímač sekundárního radaru na zemi. Tento proces se opakuje v intervalech 4-12 sekund. [1]

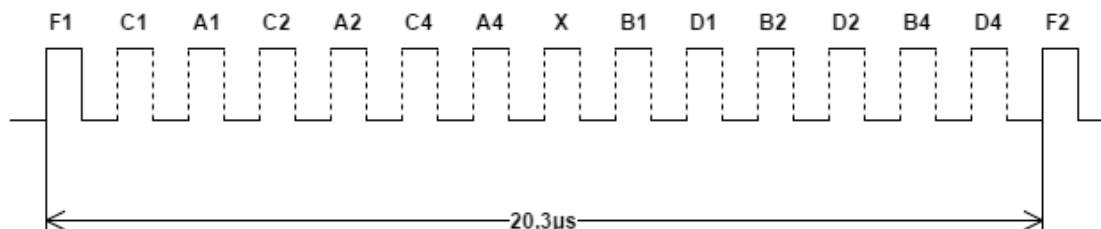
2.2) Popis jednotlivých módů sekundárních radarů

2.2.1) Mód A

U módu A se dotazovací signál vysílá na frekvenci 1030 MHz v podobě tří pulzů P1, P2 a P3, při vzdálenosti prvního a třetího pulzu 8 mikrosekund (Obr. 2.1). Tento dotazovací signál vyvolá odezvu transpondéru ve formě pulzů s délkou signálu 20,3 mikrosekund (Obr. 2.2), která obsahuje jeden ze 4096 kódů (čtyřmístný kód v osmičkové soustavě, čili 4096 možností) pro identifikaci letadla nebo skupinu letadel. Odpověď také může obsahovat SPI (Special Position Identification) pulz, který slouží k lepší identifikaci konkrétního letadla a má podobu pulzu po krátkou periodu (obvykle 18 sekund), tato funkce je spuštěna manuálně pilotem. Další informace, kterou odpověď nese, je okamžitá identifikace letadla, které má problémy navázat radiovou komunikaci, bylo přepadeno nebo má jinou závažnou komplikaci. [1] [4]



Obr. 2. 1 Dotazovací signál módu A



Obr. 2. 2 Odpověď na dotazovací signál módu A

Na obrázku 2. 2 je vidět odezva módu A (viz. Výše). Pulzy F1 a F2 jsou rámcové pulzy. Pulzy A, B, C a D jsou pulzy, které nesou užitečnou informaci.

2.2.2) Mód C

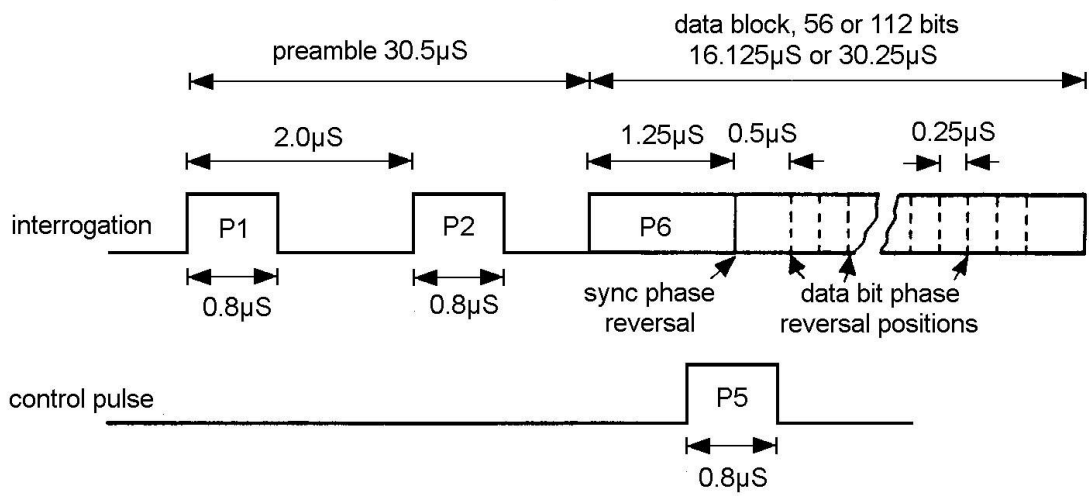
Dotazovací signál módu C se od módu A liší vzdáleností pulzů P1 a P3, u módu C je to 21 mikrosekund. Odezva na dotazovací signál má stejnou délku jako u módu A 20,3 mikrosekund a oproti módu A obsahuje navíc i informaci o barometrické výšce. [1] [4]

2.2.3) Mód S – Short squitter

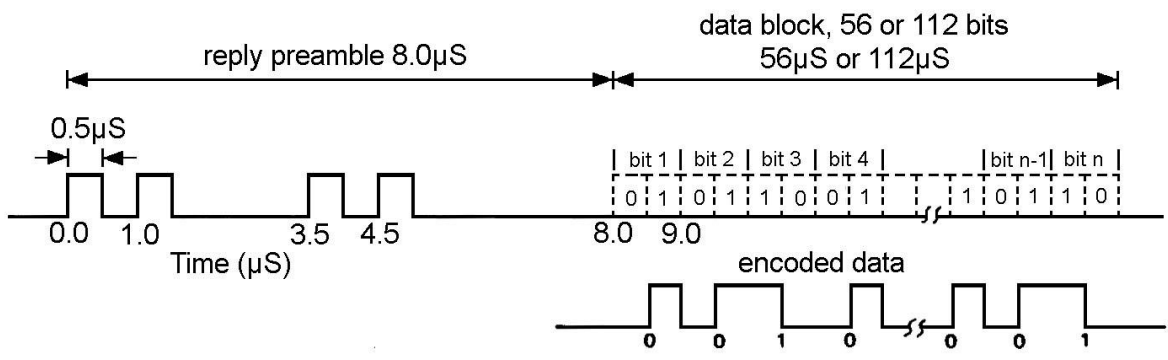
Mód S byl vyvinut jako vylepšení módů A/C, takže dokáže vykonat stejné funkce, jako předchozí módy. Navíc disponuje selektivním dotazovacím signálem za použití unikátní 24 bitové adresy a dvoucestného datového přenosu mezi pozemní stanicí a letadly. Dotazovací signál obsahuje dva dotazovací pulzy P1 a P2 na frekvenci 1030 MHz, které mají šířku 0,8 mikrosekund a jsou od sebe vzdáleny 2 mikrosekundy, následuje synchronizační pulz P6, který má šířku 1,25 mikrosekund a nachází se 3,5 mikrosekundy od náběžné hrany pulzu P1. Za synchronizačním pulzem se nachází nesená data o velikosti 56 bitů a délce 16,125 mikrosekund (Obr. 2.3). Pro dotazovací signál se používá modulace DPSK – diferenciální klíčování fázovým posuvem, datový tok činí 4 Mb/s. [1] [2]

Odpověď na dotazovací signál je na frekvenci 1090 MHz a může obsahovat identifikaci letadla, informaci o nadmořské výšce a další informace, v závislosti na požadavcích. Dotazovací signály a signály na ně odpovídající mají v módu S robustní ochranu proti chybám, což zajišťuje vysokou spolehlivost přenosu. Datový blok má velikost 56 bitů a délku 56 mikrosekund, datový tok činí 1 Mb/s. Používá se zde PPM – pulsní polohová modulace. Průběh signálu je vidět na Obr. 2.4. [2]

56 bitů velká data se skládají z kontrolních bitů (8 bitů), data módu S, tedy data, která nesou užitečnou informaci (24 bitů) a zbytek tvoří paritní bity (24). [2]



Obr. 2. 3 Dotazovací signál módu S



Obr. 2. 4 Odpověď na dotazovací signál módu S

Kontrola 8 bitů	Adresa módu S 24 bitů	Parita 24 bitů
--------------------	--------------------------	-------------------

Obr. 2. 5 Formát zprávy módu S - short squitter

2.2.4) Mód S – Extended squitter

Od módu S – Short squitter se Extended squitter liší rozšířením z 56 bitů na 112 bitů, čímž se samozřejmě zároveň zvětší doba trvání datového bloku z 56 mikrosekund na 112 mikrosekund. Oněch 56 bitů, o které byl rámec prodloužen, obsahuje zprávu ADS – B. [2]

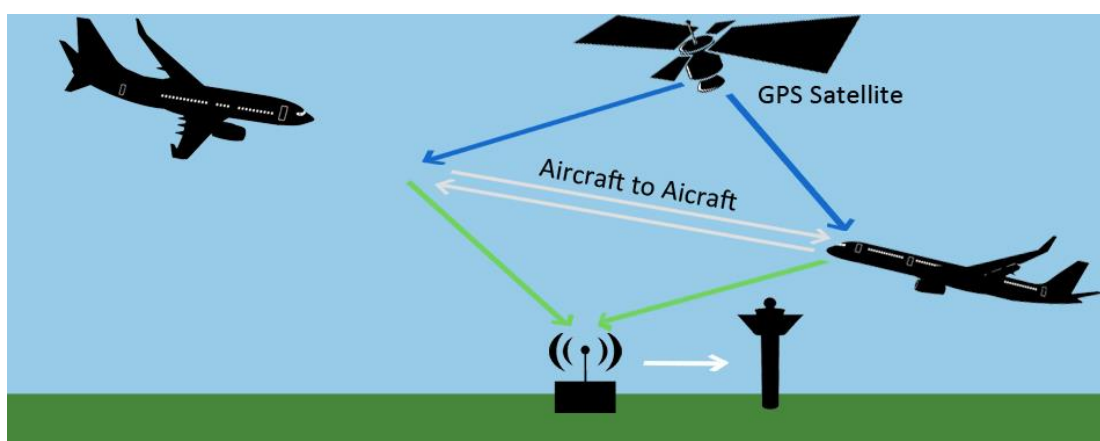
Kontrola 8 bitů	Adresa módu S 24 bitů	Zpráva ADS-B 56 bitů	Parita 24 bitů
--------------------	--------------------------	-------------------------	-------------------

Obr. 2. 6 Formát zprávy módu S - extended squitter

2.3) Základní popis systému ADS-B

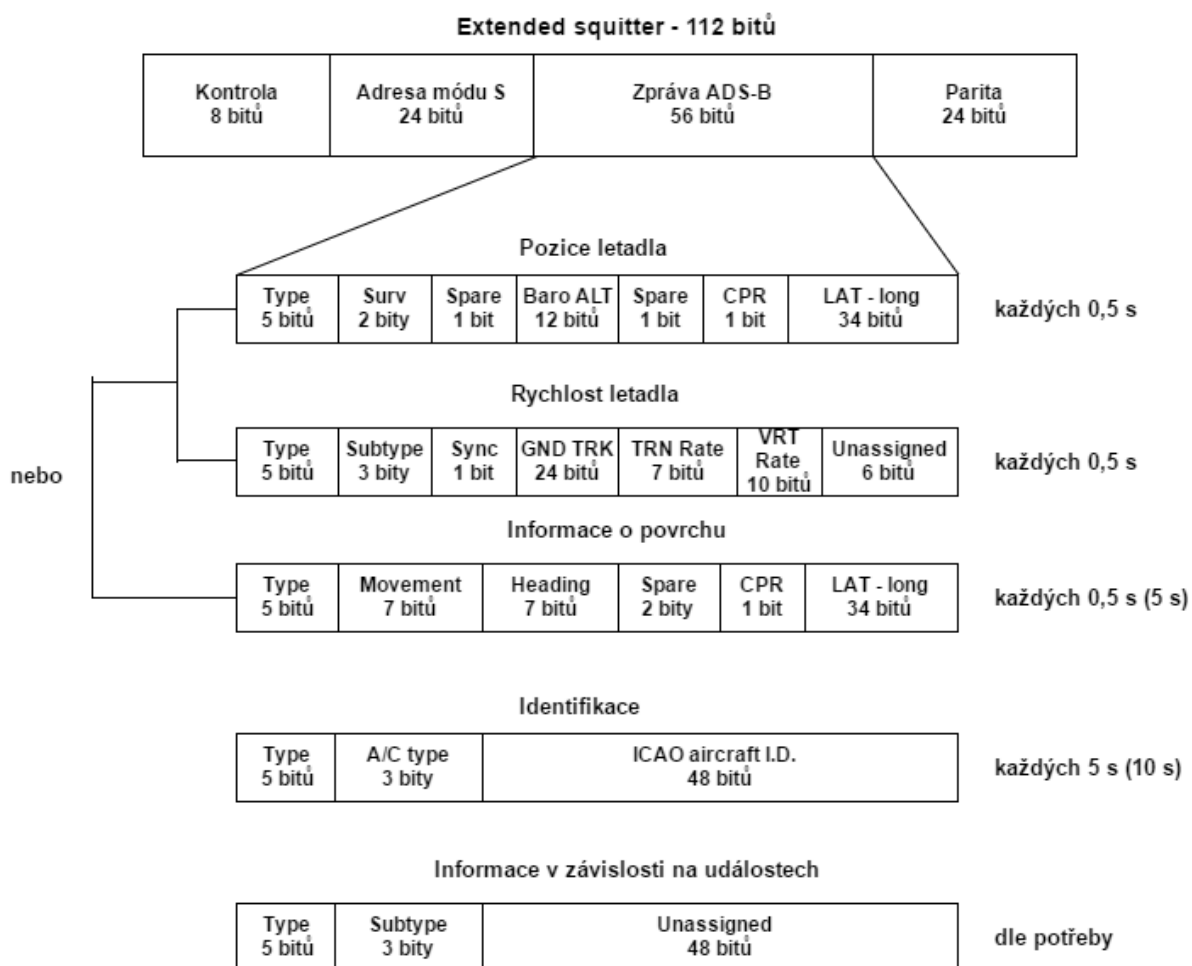
Automatic Dependant Surveillance - Broadcast, neboli ADS-B je poslední technologie používaná v letecké navigaci. Používá transpondéry, kombinované s GPS, pro přenos velmi přesné informace o pozici letadla do kontrolních stanic na zemi a zároveň do ostatních letadel vybavených ADS-B . Tento přenos se nazývá ADS-B out a probíhá dvakrát za sekundu (kompletní informace se přeneše jednou za sekundu) a dosahuje lepší přesnosti než systémy používající radary.

Když signál ADS-B out dorazí k pozemní stanici, tato stanice signál přijme a zpracuje nesenou informaci o letu. Ve stejném čase může tento signál zpracovat i letadlo, které je v dosahu a taktéž zpracovat přenášenou informaci. Z toho plyne, že v místech, kde není v dosahu žádná pozemní stanice, mohou letadla mezi sebou komunikovat nezávisle na těchto stanicích. Viz Obrázek 3.1.[1] [4]



Obr. 2. 7 Diagram funkce ADS-B

Na obrázku 3.2 je detailně zobrazen obsah zprávy ADS-B.



Obr. 2. 8 Obsah zprávy ADS-B

2.4) Kontrola parity a cyklické kódy

Chyba, která nastane, kdekoliv v přijímané odpovědi, ovlivní (změní) přijímanou informaci a tyto chyby je třeba odhalit a případně opravit.

K tomu využívá systém ADS – B cyklických polynomů (cyklických kódů) a jejich funkce je následující:

Princip spočívá v generování sekvence paritních bitů pomocí dělení modulo-2 obsahu zprávy předem definovaným generujícím polynomem. Zbytek po tomto dělení je následovně přidán do původní zprávy

a přenesen společně s ní. V důsledku této operace je přenášená zpráva dělitelná beze zbytku generujícím polynomem. [2]

V přijímači je celá zpráva, včetně paritní sekvence vydělena generujícím polynomem. V případě bezchybného přenosu vyjde po tomto dělení nulový zbytek. V případě přenosu s chybami se objeví nenulový zbytek po dělení, jenž může v některých případech posloužit pro detekci a opravu vzniklých chyb.

U ADS-B je do paritní sekvence přidána ještě adresa letadla (součtem modulo-2, XOR). Z toho plyne, že v přijímači už, při bezchybném přenosu a po vydělení zprávy generujícím polynomem, nedostaneme nenulový zbytek po dělení. Protože však známe adresu přidanou do paritní sekvence, která je pevně daná, tak můžeme předem říci, jak bude vypadat zbytek po dělení při bezchybném přenosu.

Matematická formulace by vypadala takto:

Každá sekvence m bitů může být vyjádřena jako modulo-2 polynom řádu $m-1$:

$$C_{m-1}x^{m-1} + C_{m-2}x^{m-2} + \dots + C_1x + C_0 \quad (2.1)$$

kde koeficienty $C_0, C_1, C_2, \dots, C_{m-1}$ jsou „0“ nebo „1“ a + znamená součet modulo-2.

Pokud jsou bity ve zprávě považovány za polynom $M(x)$ a generující polynom za $G(x)$, potom vydělením polynomu $M(x)$ polynomem $G(x)$ získáme kvocient $Q(x)$ a zbytek po dělení $R(x)$:

$$\frac{M(x)}{G(x)} = Q(x) + \frac{R(x)}{G(x)} \quad (2.2)$$

Přidáním zbytku $R(x)$ do zprávy $M(x)$ dostaneme:

$$\frac{M(x) + R(x)}{G(x)} = \frac{M(x)}{G(x)} + \frac{R(x)}{G(x)} = Q(x) + \frac{R(x)}{G(x)} + \frac{R(x)}{G(x)} = Q(x) + \frac{R(x) + R(x)}{G(x)} \quad (2.3)$$

v aritmetice modulo-2 platí, že cokoliv sečtené samo se sebou je rovno nule:

$$\frac{M(x) + R(x)}{G(x)} = Q(x) + \frac{0}{G(x)} = Q(x) + 0 \quad (2.4)$$

Pokud přidáme do zprávy další informaci v podobě polynomu $B(x)$, způsobí to nenulový zbytek po dělení. A to stejný zbytek jako po dělení polynomu $B(x)$ polynomem $G(x)$:

$$\frac{B(x)}{G(x)} = C(x) + \frac{D(x)}{G(x)} \quad (2.5)$$

potom:

$$\frac{M(x) + R(x) + B(x)}{G(x)} = \frac{M(x)}{G(x)} + \frac{R(x)}{G(x)} + \frac{B(x)}{G(x)} = Q(x) + \frac{0}{G(x)} + C(x) + \frac{D(x)}{G(x)} \quad (2.6)$$

tudíž pokud je přijímači znám polynom $B(x)$, pak dokáže rozeznat zprávu bez chyb, pomocí přítomnosti zbytku $D(x)$.

Tato schopnost může být využita pro zajištění toho, aby byla zpráva, přenášená do více než jednoho přijímače, přijata jako bezchybná pouze do jednoho, kterému je určena.

Každý přijímač má vlastní $B(x)$ (adresu) a v závislosti na ní vzniká vlastní $D(x)$.

Pokud je zpráva přijata bez chyb, poté:

$$R(x) = D(x) \quad (2.7)$$

Z toho vyplývá, že součet modulo-2 $R(x) + D(x)$ bude roven nule. Pokud vznikne nenulový součet $S(x)$, indikuje to chybný přenos. [2]

3) Generování odpovědi ADS-B v prostředí MatLab

Tato část se zabývá generováním odpovědi ADS-B signálu, podle specifikací, které jsou uvedeny v předchozích kapitolách, následnou detekcí a dekodováním tohoto signálu, a poté výpočtem parity.

Nejdříve je generován a zkoumán signál v jeho ideální podobě, tedy nezatížený žádným šumem, v dalším kroku je do toho signálu přidávám Gaussovský šum a je sledováno do jaké míry můžeme naši odpověď zatížit šumem, než přestane být možné tento signál detekovat a bez chyb dekodovat.

Vše je realizováno v prostředí MatLab a všechny mnou vytvořené funkce jsou popsány v jednotlivých podkapitolách a zároveň jsou součástí přílohy.

3.1) Generování odpovědi ADS-B bez šumu

3.1.1) Popis použitých funkcí

„ADSB“ - funkce, jejímž výstupem je zakódovaná zpráva ADS-B, včetně preamble a CRC kódu. Úlohou této funkce je vytvořit vektor (o velikosti celkového počtu symbolů, určeného podle vztahu 3.1), ve kterém je umístěn výsledný signál. Její vstupní parametry jsou: vzorkovací perioda, v našem konkrétním případě 50 ns a samotná zpráva, která má být přenesena. Tato funkce ve svém těle volá další a těmi jsou: „preamble“ a „kodovaniadsb“.

Tyto funkce jsou popsány níže.

$$symboly = t_r * f_s \quad (3.1)$$

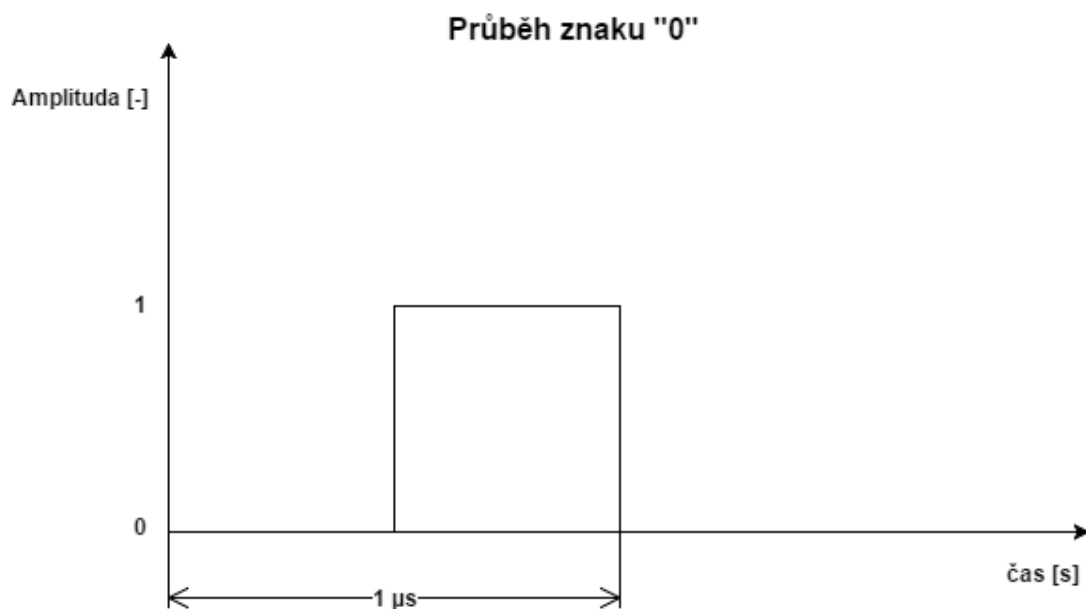
kde t_r je doba trvání jednoho rámce signálu (v našem případě 120 μ s) a f_s je vzorkovací frekvence (v našem případě 20 MHz).

„preamble“ – funkce, jejímž výstupem je preamble odpovědi signálu ADS-B. Tato funkce vytvoří vektor, v němž je uložena preamble signálu s odpovídající polohou a počtem symbolů (počet symbolů na jeden pulz preamble lze spočítat obdobně jako ve vztahu 3.1, s tím rozdílem, že dobu trvání jednoho rámce nahradí doba trvání jednoho pulzu, tedy 0,5 μ s), v závislosti na definované formě preamble a vzorkovací frekvenci. Vstupem této funkce je vzorkovací perioda a v těle této funkce již nejsou volány žádné další.

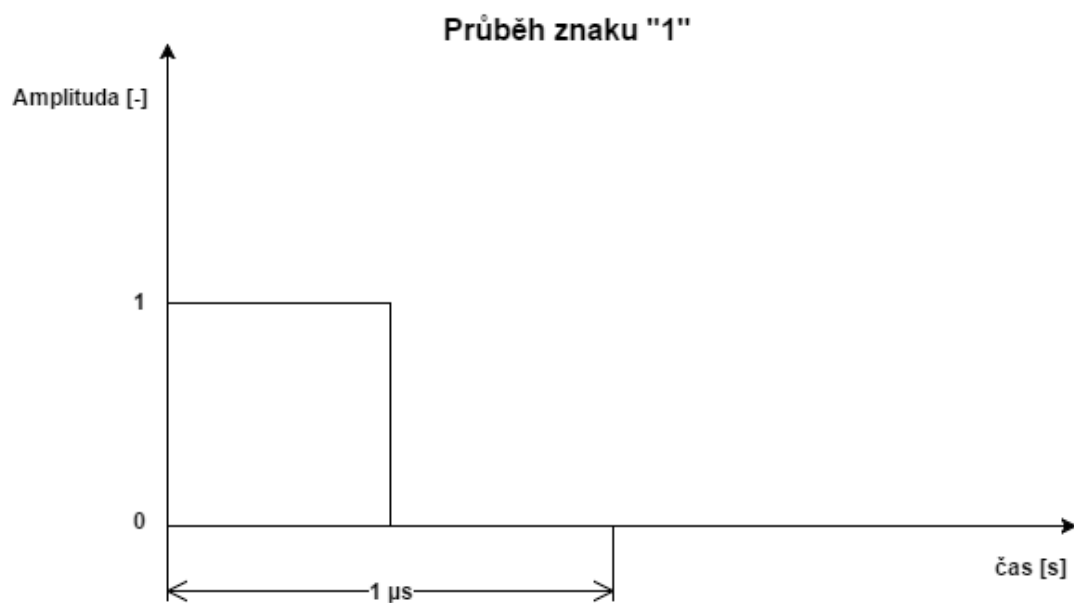
„kodovaniadsb“ – funkce, jejímž výstupem je zakódovaná odpověď ADS-B. Kodování probíhá tak, že jednomu znaku (bitu) odpovídají dva stavy „vysoký“ a „nízký“, v ideálním případě odpovídá nízkému stavu „0“ a vysokému „1“. Chceme-li zakódovat znak „0“ dáme za sebe nízký a vysoký stav, chceme-li zakódovat znak „1“ bude tomu přesně naopak (viz obrázky 3.1 a 3.2). Toto kódování je v dané funkci řešeno následujícím způsobem:

jsou zde vytvořeny dva vektory, jeden reprezentující znak „0“ a jeden reprezentující znak „1“. Délky těchto dvou vektorů jsou opět závislé na době trvání jednoho znaku (1 μ s) a na vzorkovací frekvenci (20 MHz) podobně jako ve vztahu 3.1. V cyklu se prochází celá zpráva, jenž má být zakódována a podle toho, zda je konkrétní bit roven hodnotě „0“ nebo „1“ se dané pozici v signálu přiřadí vektor reprezentující daný znak.

Vstupní parametry funkce jsou vzorkovací perioda a zpráva určená ke kódování. Tato funkce nevolá žádnou jinou.



Obr. 3. 1 Průběh zakódovaného znaku "0"



Obr. 3. 2 Průběh zakódovaného znaku "1"

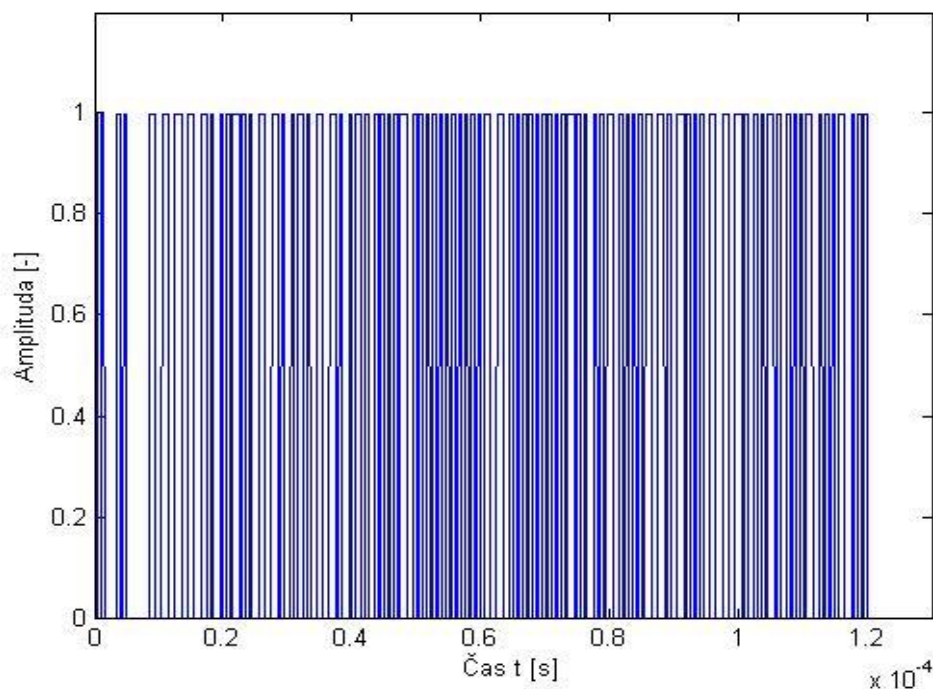
„zprava“ – funkce, která vytvoří obsah zprávy, která má být přenesena a zároveň tuto zprávu zapíše do souboru (zprava_gen.txt). Část zprávy, nesoucí zprávu ADS-B, je zde nahrazena náhodnou sekvencí „0“ a „1“ ve zbytku jsou odpovídající informace (adresa letadla, paritní sekvence). Výpočet paritní sekvence zde obstarává funkce „parsekvence“ (viz níže). Vstupním parametrem je zde pouze adresa letadla. Jak už bylo zmíněno, tato funkce volá funkci „parsekvence“.

„parsekvence“ – tato funkce vrací na výstupu paritní sekvenci, která se přidává do přenášené zprávy. Tuto sekvenci získá tak, že najde zbytek po dělení (modulo-2) přenášené zprávy a generujícího polynomu, a pak provede exkluzivní logický součet (XOR) tohoto zbytku a adresy letadla (viz kapitola 2.4). Vstupními parametry této funkce jsou: přenášená zpráva a adresa letadla. Funkce volaná v těle této funkce je „bindiv“, provádějící operaci dělení modulo-2.

„bindiv“ – výstupem této funkce je zbytek po dělení modulo-2. Vstupními parametry jsou sekvence, které spolu mají být poděleny. V těle této funkce není volána žádná jiná funkce.

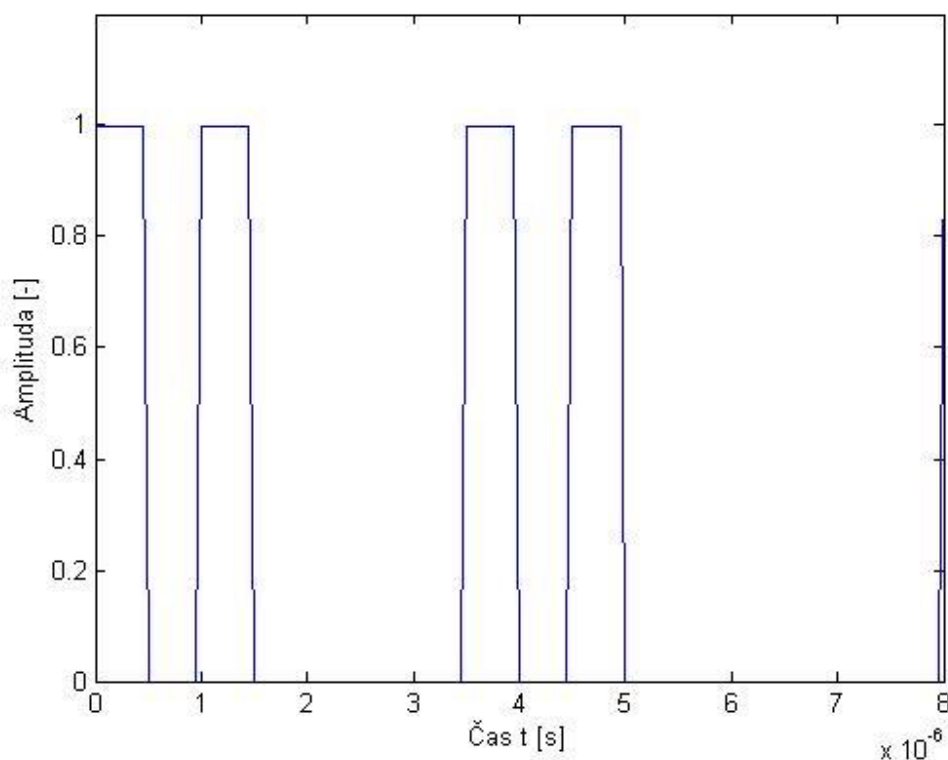
3.1.2) Výsledný generovaný signál bez šumu

Spojením všech výše popsaných funkcí dohromady, viz skript „test_generovani_bez_sumu“, dostaneme generovanou odpověď ADS-B při vzorkovací frekvenci 20 MHz, adrese letadla 63ACD6_{hex} a náhodně generované sekvenci „0“ a „1“, představující přenášenou informaci. Tento signál je zobrazen na obrázku 3.3. Takovýto průběh je vhodný pro představu, jak vlastně odpověď ADS-B vypadá, a pro testování různých algoritmů pro další zpracování těchto typů signálu, nicméně je zřejmé, že skutečný změřený signál se bude od tohoto generovaného podstatně lišit.



Obr. 3.3 Generovaná odpověď ADS-B bez šumu

Na obrázku 3.4 je vidět v detailu preambule signálu.



Obr. 3. 4 Generovaná odpověď ADS-B bez šumu – preambule

3.2) Dekódování generované odpovědi ADS-B a kontrola parity

3.2.1) Popis použitých funkcí

„dekodovaniadsb“ – funkce, na jejímž výstupu je dekodovaná zpráva. Pro případ signálu bez vloženého šumu lze použít algoritmus inverzní k algoritmu funkce „kodovaniadsb“. V cyklu se prochází zakódovaný signál a porovnává se úsek signálu odpovídající jednomu znaku, tedy při vzorkovací frekvenci 20 MHz a době trvání jednoho znaku 1 μ s odpovídá jednomu znaku 20 vzorků. Tento úsek se porovná s vektorem reprezentujícím „0“ a s vektorem reprezentujícím „1“ a podle toho, kterému z těchto dvou vektorů se rovná zkoumaný úsek, se rozhodne, zda na danou pozici přiřadit „1“ či „0“. Je ale zřejmé, že tento algoritmus není použitelný pro případ, kdy je do signálu přidán šum.

Proto je zde použito průměrování, kdy se spočítá střední hodnota segmentu signálu, kterému odpovídá jeden znak, a s touto hodnotou se potom porovná střední hodnota první poloviny tohoto segmentu. Podle toho, zda je střední hodnota první poloviny větší nebo menší se určí, jestli půjde o znak „1“ nebo „0“.

Vstupními parametry této funkce jsou: zpráva určená k dekódování a vzorkovací perioda. Tato funkce nevolá žádné jiné funkce.

„kontrolaparity“ – výstupem této funkce je výsledek po operaci XOR polynomů $R(x)$ a $D(x)$, viz kapitola 2.4. Jak již bylo zmíněno právě v kapitole 2.4, výsledkem této operace musí být sekvence nul. Jinak došlo k chybě v přenosu. Vzhledem k tomu, že zkoumáme generovaný signál, který se nepřenášel a nebyl do něho uměle vložen žádný šum, budeme očekávat, že výsledek, který dostaneme po této operaci, bude vždy nulový. Vstupními parametry jsou: dekódovaná zpráva a adresa letadla. Funkce volá funkci „bindiv“, která již byla popsána v kapitole 3.1.1.

Všechny ostatní funkce, použité pro tuto část práce, již byly popsány.

3.2.2) Samotné dekódování a kontrola parity

Ve skriptu, pojmenovaném „test_dekodovani_bez_sumu“, jsou spojeny funkce popsané výše tak, aby došlo k dekódování signálu a k následné kontrole parity. K dekódování byl použit signál generovaný pomocí funkcí z kapitoly 3.1.1.

Dle očekávání vyšel kontrolní součet jako sekvence nul, tedy bezchybný přenos. Správnost funkce kontrolního součtu jsme si mohli, vzhledem ke znalosti celé zprávy před dekódováním, ověřit ještě porovnáním zprávy po a před dekódováním. Jistě bude zajímavější sledovat kontrolní součet s přítomností šumu a při analýze změřeného signálu v dalších kapitolách, v tomto případě vlastně ani nebyla možnost vzniku chyb (uvažujeme-li správnost algoritmů pro kódování a dekódování).

3.3) Detekce signálu bez šumu

Obecně, u změřených signálů nevíme, kde začíná užitečný signál, který chceme dále zpracovávat. Proto potřebujeme nástroj, který nám umožní tento signál detekovat. V tomto textu již byla několikrát zmíněná preambule signálu, tedy jasně definovaná část signálu (tvarem i délkou), která je pokaždé stejná. Právě preambule hraje v detekci signálu klíčovou roli - jelikož ji pokaždé známe, můžeme postavit detekci na ní.

V našem případě budeme provádět detekci pomocí vzájemné korelační funkce (vztah 3.2). Korelace znamená vzájemný vztah, podobnost. Pokud posuneme signál $s_1(t + \tau)$ o takové τ , že se budou oba signály, alespoň částečně, překrývat, dostaneme nenulovou hodnotu korelační funkce, pokud tedy signál posuneme o takové τ , ve kterém se budou signály přesně překrývat, dostaneme maximum korelační funkce.[3]

V prostředí MATLAB existuje implementovaná funkce pro korelační funkci a t funkce „xcorr“ a právě tuto funkci budeme používat.

$$R_{12}(\tau) = \sum_{-\infty}^{+\infty} s_1(t + \tau)s_2^*(t) \quad (3.2)$$

kde $s_1(t + \tau)$ je preambule posouvaná o τ , $s_2(t)$ je zkoumaný signál a kde $\tau \in \mathbb{Z}$.

3.3.1) Popis použitých funkcí

„posunvcase“ – funkce sloužící pro posun signálu v čase. Funkce vezme zakódovaný signál a posune ho o náhodnou hodnotu v časové ose. Tato funkce slouží jen jako nástroj pro testování detekce signálu. Vstupními parametry jsou: kódovaný signál, požadovaná délka signálu a vzorkovací perioda.

„detekce“ – funkce, která dokáže najít začátek signálu a rovnou i jako výstupní parametr vrátit hledanou část signálu.

Prvním krokem je výpočet vzájemné korelační funkce zkoumaného signálu a preamble (xcorr). V této funkci se pak najde maximální hodnota. Bohužel, vzhledem k tomu, jak vypadají kódovaná data, a k pozdějšímu přidání šumu, nelze rovnou toto maximum považovat za to správné, námi hledané.

Tento problém je vyřešen cyklem, který postupně prochází hodnoty, které se blíží hodnotě nalezeného maxima, je určen práh a posuzují se maxima, která jsou nad prahem. Tento práh se s každou iterací snižuje. Nejprve se snižoval pouze o 1, protože u generovaného signálu, kde u preamble i u vlastního signálu byla nejvyšší hodnota 1, bylo maximum korelační funkce relativně malé, takže neproběhlo tolik iterací a algoritmus probíhal v rozumných časech. Ovšem u změřeného signálu byla maxima mnohem větší a proto se práh při každé iteraci zmenší o 10% nalezeného maxima korelační funkce krát i-tá iterace.

Zda se jedná o správné maximum, se přijde následovně: jelikož víme, jak daleko od preamble by měla být adresa letadla, kterou známe, můžeme najít úsek signálu odpovídající vzdálenosti a délce adresy, dekodovat ho a porovnat se známou adresou, pokud jsou si tyto dvě sekvence rovny, našli jsme maximum a pokud ne, pokračuje cyklus dál.

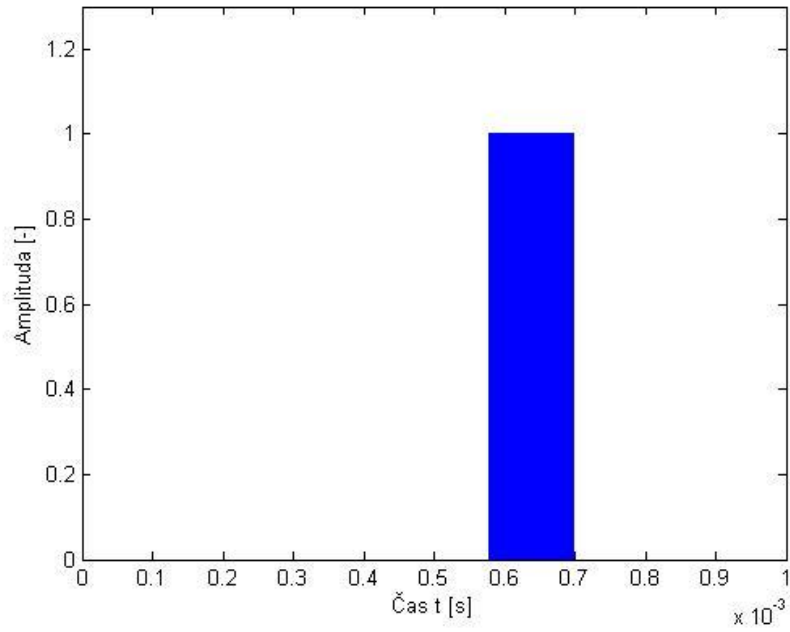
„dekodovaniadsb2“ – jedná se o modifikaci funkce „dekodovaniadsb“, největším rozdílem je samotný způsob dekodování. Oproti původní verzi, se zde již nedělá střední hodnota, ale pouze součet první a druhé poloviny segmentu signálu, který reprezentuje jeden bit a následné porovnání těchto dvou signálů. Jestliže je tedy první polovina menší než druhá, jedná se o znak „0“ a naopak, je-li první polovina větší než druhá, jedná se o znak „1“.

Další funkce použité pro tuto kapitolu už byly dříve popsány.

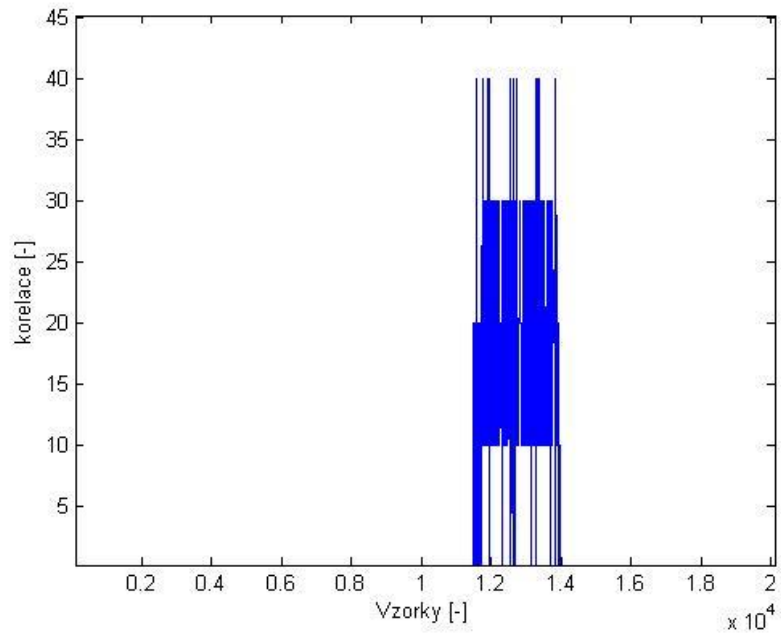
3.3.2) Detekce signálu posunutého v čase

V této části práce nastaly asi největší problémy, kvůli kterým bylo třeba přehodnotit postupy v jednotlivých funkcích, a to hlavně z důvodu množství dat, které musí být zpracovány. Asi nejvíce se to projevilo na funkci „dekodovaniadsb“, která je použita ve funkci „detekce“, a kvůli které trvala detekce odpovědi ADS-B v signálu o délce 1 ms více jak hodinu a poté byla bez úspěšného výsledku přerušena. Díky modifikaci algoritmů jsme se dostali na dobu trvání úspěšné detekce přibližně 4 minuty, při délce celého signálu 0,2 sekundy. Takže tyto problémy vedly k vylepšení algoritmu, alespoň co se analýzy bez šumu týká.

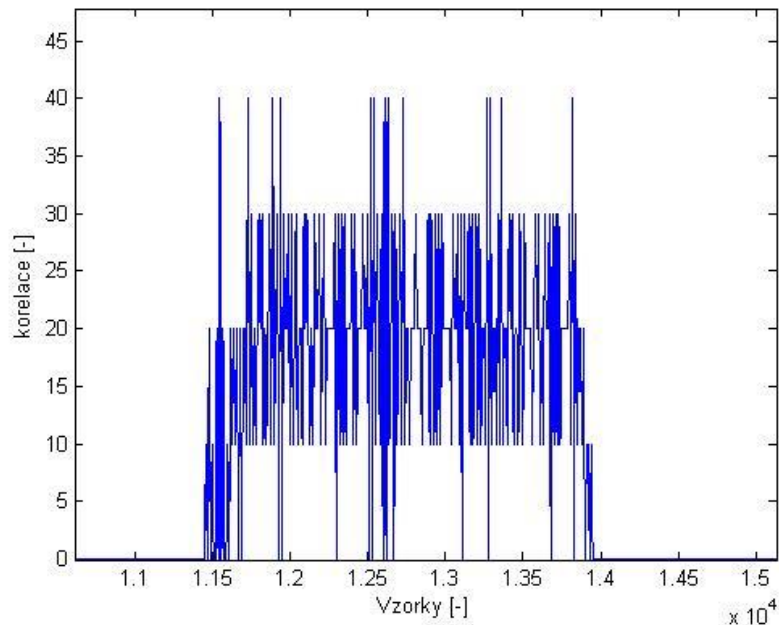
Na obrázku 3.5 je znázorněn průběh signálu, který je posunutý v čase, celková doba signálu je 1 ms a na obrázku 3.6 je zobrazena korelační funkce preamble a odpovědi ADS-B posunuté v čase. Na obrázku 3.7 je tato funkce znázorněna v detailu. Na vodorovné ose jsou vzorky signálu a na svislé ose je míra korelace daných signálů. Na grafu je vidět hned několik maxim korelační funkce, jak bylo zmíněno již v kapitole 3.3.1. Funkce pro detekci jsou volány ve skriptu: „test_detekce_bez_sumu“.



Obr. 3. 5 Odpověď ADS-B posunutá v čase



Obr. 3. 6 Korelační funkce



Obr. 3. 7 Korelační funkce - detail

3.4) Generování odpovědi ADS-B se šumem

3.4.1) Popis použitých funkcí

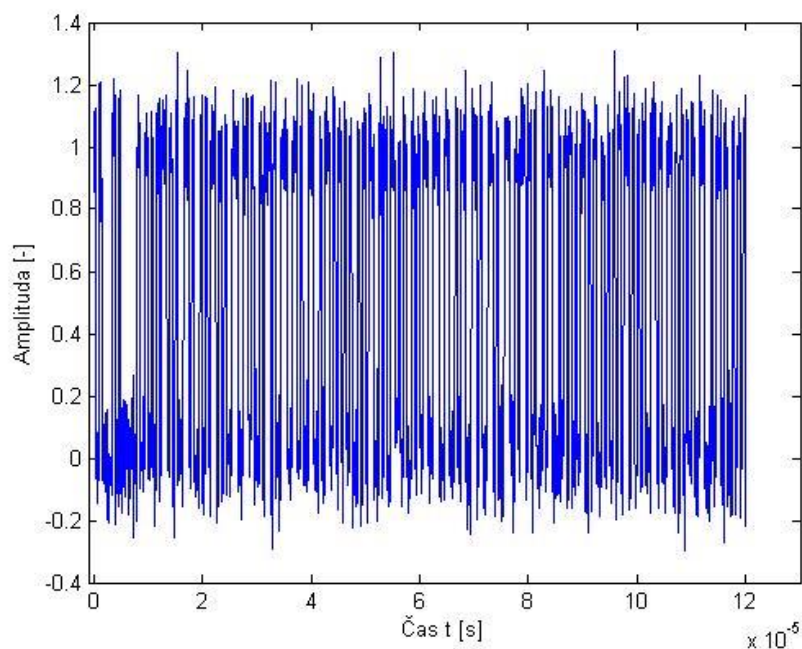
„pridanisumu“ – jak napovídá název, tato funkce slouží k přidání šumu do signálu. Funguje tak, že vytvoří vektor o stejné délce jako signál, do kterého chceme vložit šum, a tento vektor naplní náhodnou sekvencí hodnot s Gaussovským rozložením, který se poté ještě přenásobuje koeficientem, který určuje, jaký rozdíl bude mezi odstupem signálu a šumu. Výsledný vektor už se pak jenom sečte se signálem.

Vstupními parametry jsou: signál, do kterého přidáváme šum a koeficient, kterým přenásobujeme hodnoty šumu.

Další funkce použité pro tuto kapitolu už byly dříve popsány.

3.4.2) Generování odpovědi ADS-B se šumem

V této kapitole vlastně jen použijeme funkce z kapitol 3.1.1 a 3.4.1 a vytvoříme tak zašuměný signál, jehož šumovou úroveň budeme moci dále měnit, a v závislosti na ní v dalších kapitolách sledovat dekódování a detekci takového signálu. Na obrázku 3.8 můžeme vidět signál s přidaným šumem s koeficientem 0,1. Funkce jsou volány ve skriptu: „test_generovani_se_sumem“.



Obr. 3. 8 Odpověď ADS-B s přidaným šumem

3.5) Dekódování odpovědi ADS-B se šumem

V této kapitole se budeme zabývat dekodováním odpovědi ADS-B s přidaným šumem a sledováním vznikajících chyb, v závislosti na zvětšující se amplitudě šumu. Budeme zde používat jen funkce, které už byly popsány výše.

Všechny testy se provádí pomocí skriptu „test_dekodovani_se_sumem“, ve kterém jsou volány všechny potřebné funkce.

3.5.1) Dekódování odpovědi ADS-B s různými amplitudami šumu

Pro každý zkoumaný poměr signálu a šumu se bude provádět 100 pokusů a bude se sledovat počet případů, kdy dojde k chybnému dekodování a kdy k dekodování vůbec nedojde.

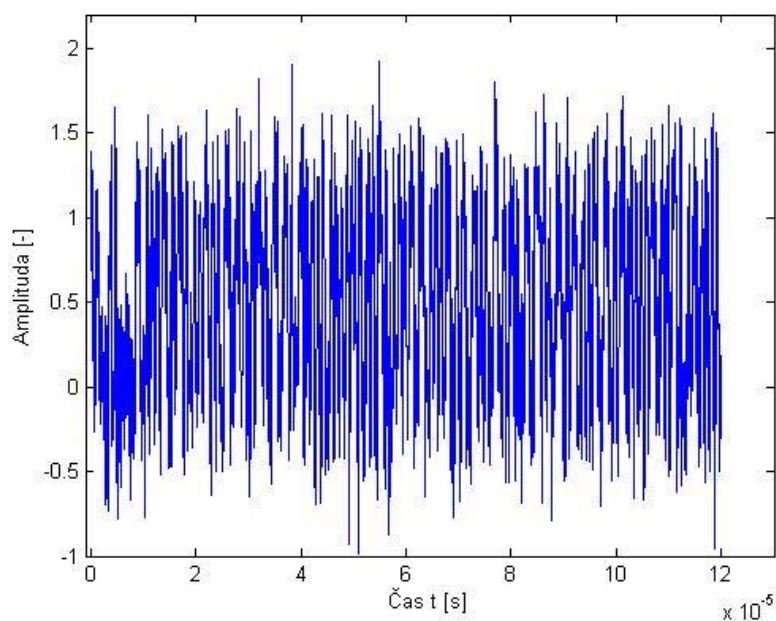
3.5.1.1) Dekódování s hodnotou koeficientu 0,1

Na obrázku 3.8 je vidět jeden z měřených průběhů tohoto signálu. Je zřejmé, že se od ideálního průběhu liší, nicméně je zde pořád snadno rozpoznatelný tvar, který očekáváme.

Signál, zatížený takovýmto šumem byl bez problému dekodován ve všech provedených pokusech.

3.5.1.2) Dekódování s hodnotou koeficientu 0,3

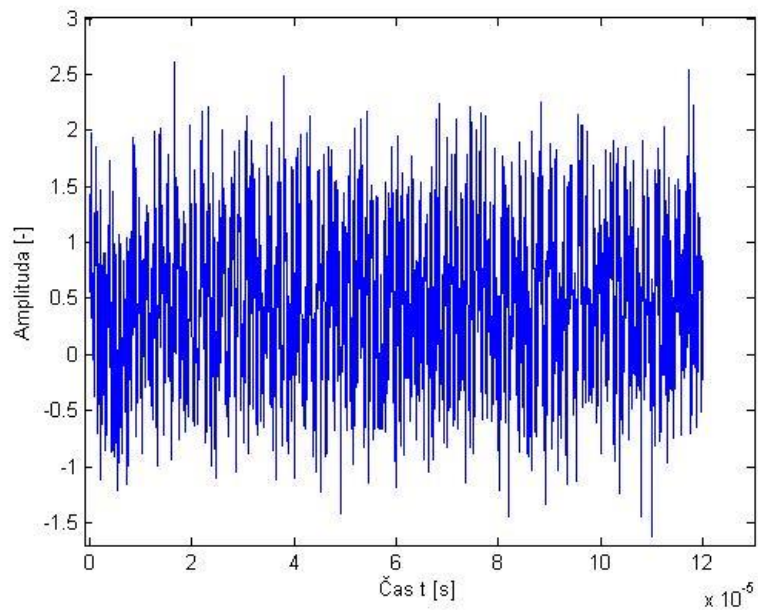
Průběh tohoto signálu je zobrazen na obrázku 3.9. Na obrázku je vidět, že oproti předchozímu případu jsou hodnoty šumu vyšší, nicméně jsou stále relativně dobře rozlišitelné jednotlivé pulzy a dekodování tohoto signálu proběhlo opět, ve všech případech, bez problému.



Obr. 3. 9 Odpověď signálu ADS-B s přidaným šumem koeficient 0,3

3.5.1.3) Dekódování s hodnotou koeficientu 0,5

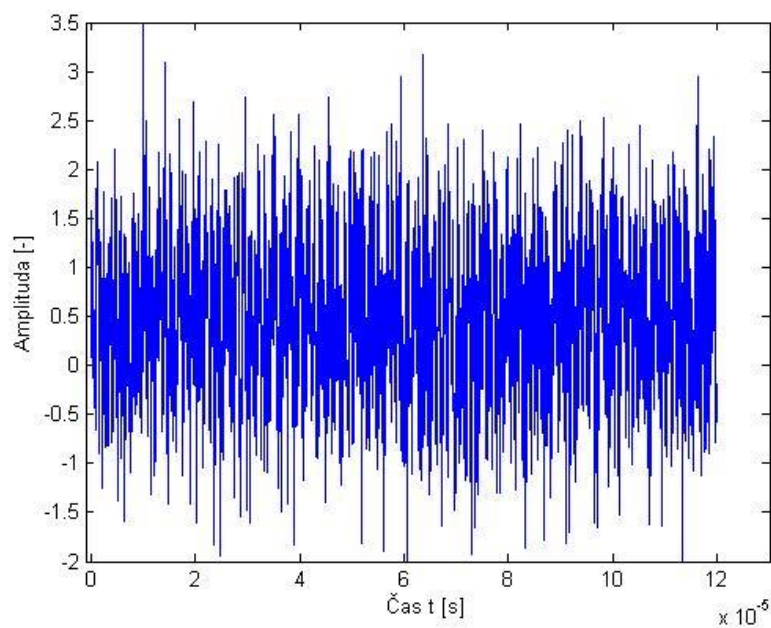
Grafické znázornění signálu s přidaným šumem s koeficientem 0,5 je vidět na obrázku 3.10. Kromě zvýšené amplitudy v důsledku součtu užitečného signálu a šumu zde opět není vidět zásadní rozdíl oproti předchozímu případu a opět se nám podařilo úspěšně dekodovat signál a správnost ověřit pomocí paritní kontroly ve všech případech.



Obr. 3. 10 Odpověď signálu ADS-B s přidaným šumem koeficient 0,5

3.5.1.4) Dekódování s hodnotou koeficientu 0,7

Při zvýšení koeficientu, jenž upravuje hodnoty šumu, na hodnotu 0,7 jsme již dostali chyby při dekódování. A to konkrétně 9 chyb ze 100 měření, čili máme 9% chybovost. Průběh je vyobrazen na obrázku 3.11.

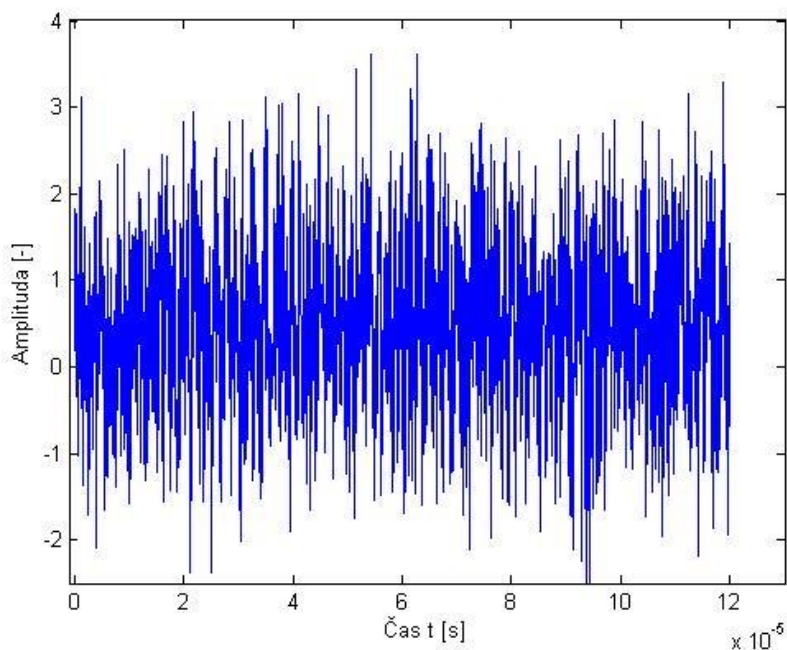


Obr. 3. 11 Odpověď signálu ADS-B s přidaným šumem koeficient 0,7

Jak je na grafu vidět, rozkmit hodnot už je zde mnohem výraznější než jak tomu bylo u předchozích případů. Což se také samozřejmě podepsalo na chybách vzniklých při dekódování.

3.5.1.5 Dekódování s hodnotou koeficientu 0,8

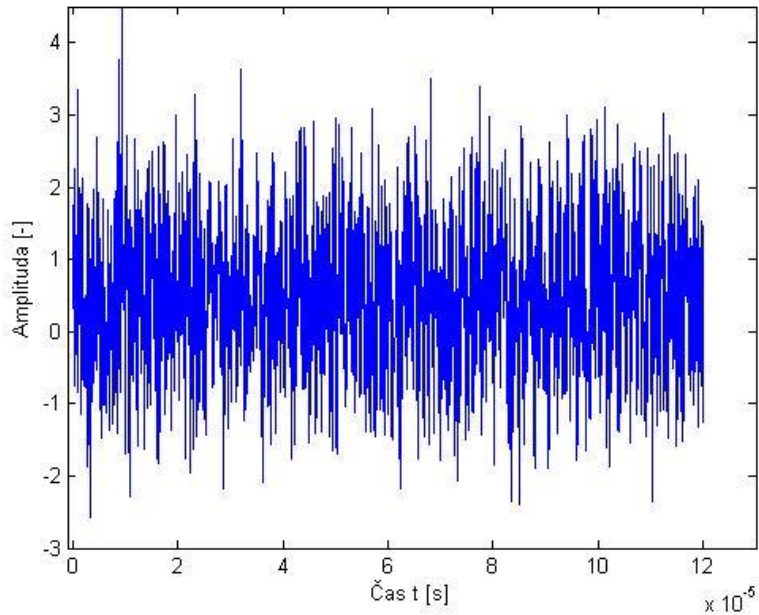
Při tomto testování jsme dostali 24 chybných vyhodnocení dekódování. Z obrázku je patrné, že v signálu stále ještě dokážeme najít tvar, který bychom očekávali, ale v některých místech už jsou odchylky velmi výrazné.



Obr. 3. 12 Odpověď signálu ADS-B s přidaným šumem koeficient 0,8

3.5.1.6 Dekódování s hodnotou koeficientu 0,9

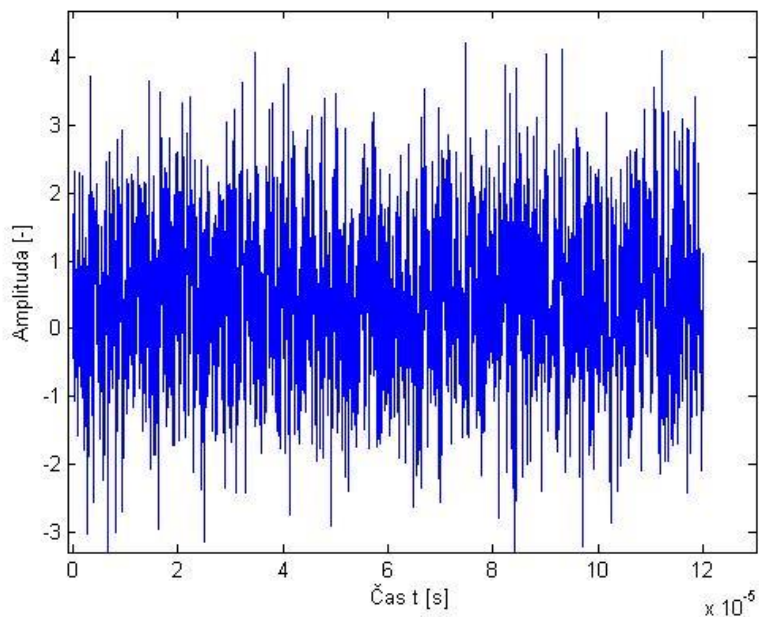
Při zkoumání tohoto signálu jsme zjistili 60 chybných vyhodnocení. Při pohledu na obálku signálu je zřejmé, že se začíná výrazně lišit od signálu, ke kterému byl přidán šum.



Obr. 3. 13 Odpověď signálu ADS-B s přidaným šumem koeficient 0,9

3.5.1.7 Dekódování s hodnotou koeficientu 1,1

Při měření s tímto koeficientem, došlo k chybnému dekódování v 91 případech. Což už je samozřejmě pro



Obr. 3. 14 Odpověď signálu ADS-B s přidaným šumem koeficient 1,1

použití v letecké dopravě nepoužitelné.

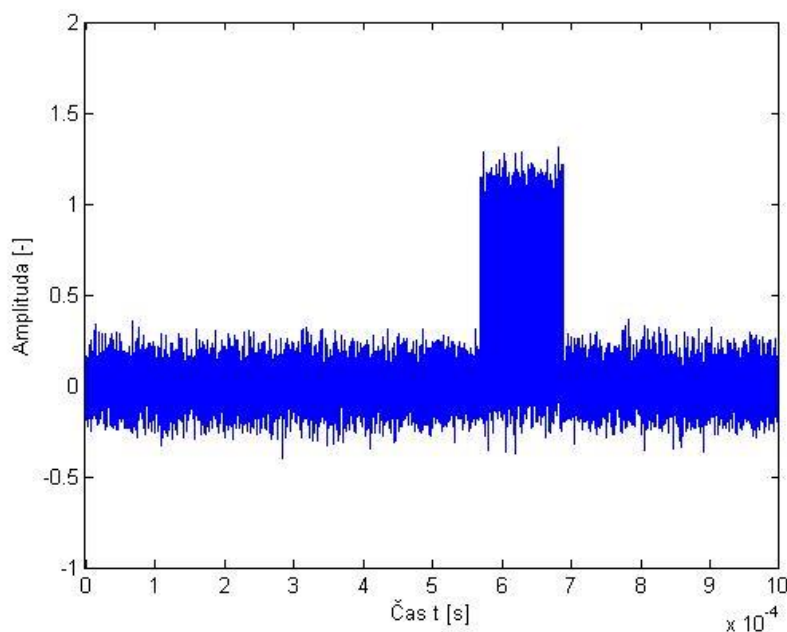
Testování signálu s vyšší amplitudou přidaného šumu už prakticky nemá smysl.

3.6) Detekce signálu s přidaným šumem

Tato část práce se zabývá detekováním generovaného signálu s přidaným šumem. Pro tento účel použijeme metody a algoritmy z předchozích kapitol, pro detekci signálu bez šumu (kapitola 3.3.2).

Na obrázku 3.15 je vidět průběh signálu, který je posunut v čase a do kterého je přidán šum.

Funkce jsou volány ve skriptu: „test_detekce_se_sumem“.

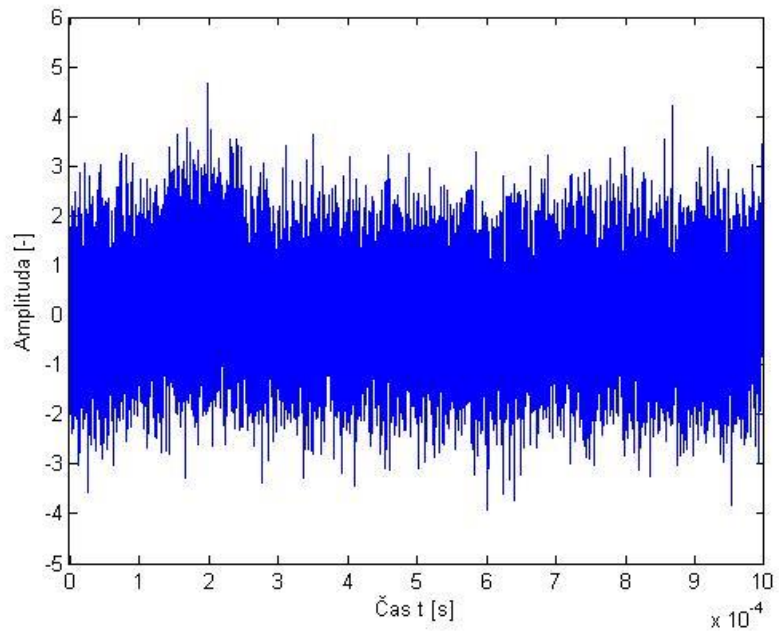


Obr. 3. 15 Signál posunutý v čase s přidaným šumem

Signál na tomto obrázku byl bez problému detekován a bezchybně dekódován. Problém při detekci zašuměného signálu nastává už kvůli metodě, kterou pro detekci používáme. Jak jsme si ukázali v předchozí kapitole (3.5.1), s narůstajícím šumem je čím dál obtížnější dekódovat daný signál. A protože, jak je popsáno v kapitole 3.3.1, pro nalezení začátku signálu potřebujeme dekódovat tu část signálu, kde se nachází adresa letadla. Když tedy, v důsledku velkého šumu, nastane chyba v dekódování části signálu, kde je právě tato informace, porovnání neproběhne správně a funkce začne zkoumat další části signálu a nenajde místo, kde signál doopravdy začíná.

Pokud bychom zkoumali detekci podobně, jako jsme sledovali dekódování v závislosti na zvětšování šumu, došli bychom k závěru, že signál lze detekovat do podobných úrovní šumu, do kterých bylo možné tento signál dekódovat.

Na obrázku 3.16 je signál, který už nebylo možné detekovat.



Obr. 3. 16 Signál posunutý v čase s přidaným šumem, nedetekovatelný

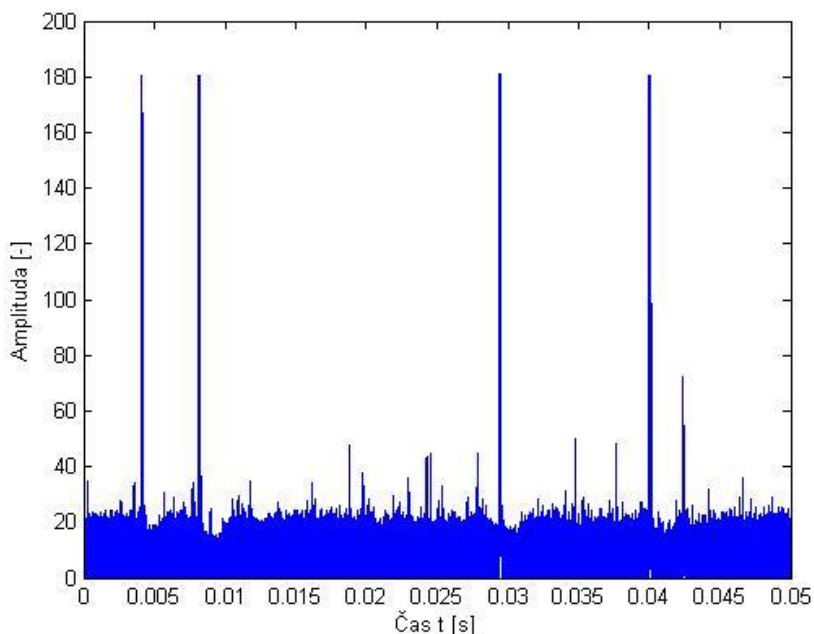
4) Aplikace vytvořených metod zpracování signálu na změřené signály

V této části práce se pokusíme aplikovat vytvořené funkce na skutečné změřené signály a pokusíme se o jejich detekci, dekodování a následně i o výpočet kontrolního součtu, pro ověření správnosti přenosu.

Asi je nutné předem zmínit, že v případě skutečného signálu, vznikají u přenosu komunikačním kanálem, kromě šumu i jiné komplikace, jako je například vícecestné šíření, které vzniká v důsledku odrazů užitečného signálu od překážek nebo problémy s úrovní signálu. Problém totiž nemusí nastat jen v případě, kdy je úroveň signálu příliš malá a užitečný signál se tak „utopí“ v šumu, ale i v opačném případě, kdy přijde do přijímače signál naopak moc silný, Přijímač se pak dostává do saturace a nevyhodnotí korektně přijatý signál.

4.1) Naměřený signál

Budeme zde zkoumat signál, o délce 0,05 sekund, změřený se vzorkovací frekvencí 20 MHz. V tomto signálu by se mělo nacházet 5 odpovědí ADS-B od dvou různých letadel s adresami (v hexadecimální soustavě) : 49F0DE a 49F0E1 . Průběh celého signálu je vyobrazen na obrázku 4.1.



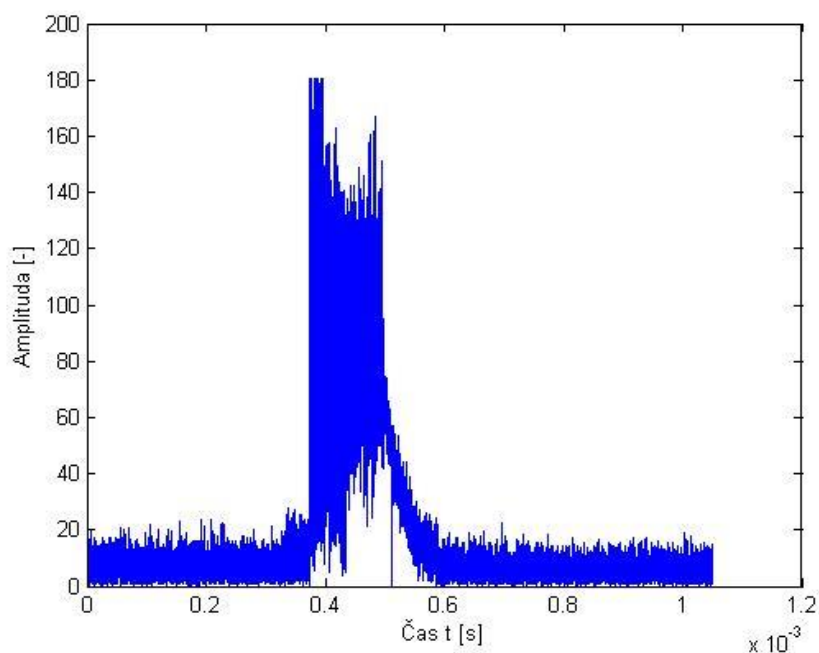
Obr. 4. 1 Průběh naměřeného signálu s odpověďmi ADS-B

4.2) Analýza naměřeného signálu

V tomto kroku se budeme snažit detekovat a později i dekodovat jednotlivé odpovědi obsažené ve změřeném signálu. Postupovat budeme tak, že si rozdělíme signály na 5 částí, kde každá z nich bude obsahovat jednu odpověď, nazveme je třeba odpověď a, b, c, d a e. Tyto části pak budeme, každou zvlášť zkoumat.

4.2.1) Analýza odpovědi a

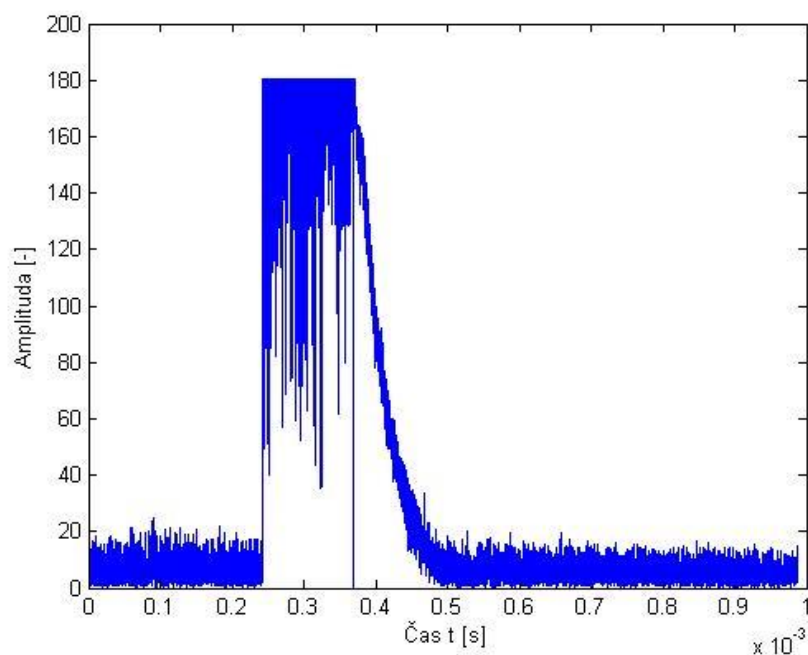
Průběh signálu a vidíme na obrázku 4.2. Zaměříme-li se na začátek užitečného signálu, můžeme si všimnout, že úroveň užitečného signálu, kterou přijal přijímač, byla moc vysoká, a tudíž se přijímač dostal do saturace. Přesto se podařilo tento signál detekovat a dekodovat. Kontrolní součet ale vyšel nenulový, což znamená, že nedošlo k bezchybnému přenosu. Z obrázku je vidět, že by neměl být problém v odstupě signálu od šumu. Proto bych zde vzniklou chybu přisoudil saturaci a vícecestnému šíření.



Obr. 4. 2 Průběh odpovědi a

4.2.2) Analýza odpovědi b

Na to, jak vypadá signál druhé testované části, se můžeme podívat na obrázku 4.3. Z obrázku je patrné, že zde bude zásadním problémem příliš vysoká úroveň signálu, v důsledku čehož se tento signál nepodařilo detekovat.



Obr. 4. 3 Průběh odpovědi b

4.2.3) Analýza odpovědi c

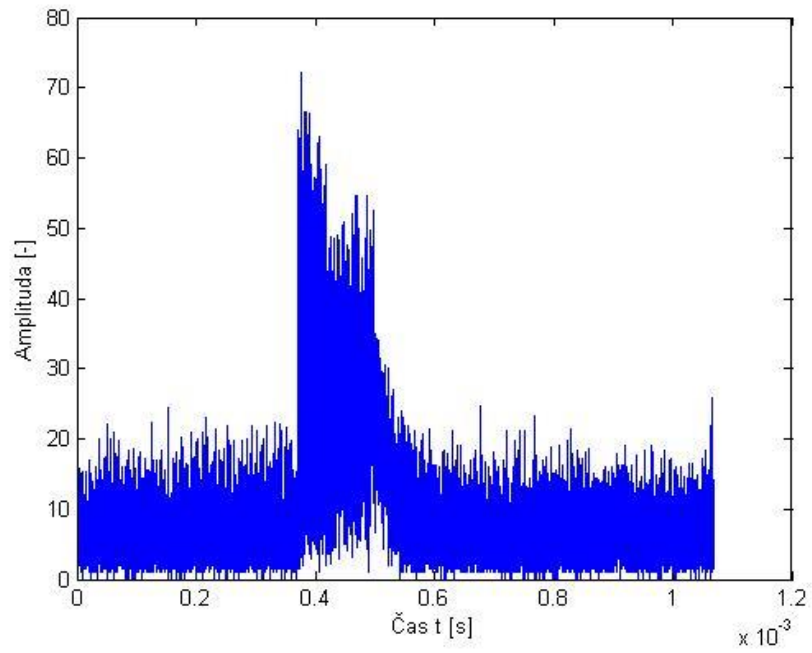
V případě odpovědi c jsme dostali téměř totožný výsledek jako v přechodím bodě a z důvodu příliš vysoké úrovně signálu se nepodařilo signál detekovat. Průběh byl téměř shodný, jako tomu bylo na obrázku 4.3. Průběh tohoto signálu lze najít v příloze.

4.2.4) Analýza odpovědi d

V tomto bodě jsme získali kombinaci předchozích dvou průběhů. Signál sice nebyl tak, silný jako tomu bylo u odpovědi b, nicméně byl přijímač také výrazně saturován ani nyní se signál nepodařilo detekovat. Po pokusu najít tento signál „ručně“ a zkusit ho dekodovat vyšel kontrolní součet opět nenulový, což znovu poukazuje na chyby při přenosu. Průběh tohoto signálu lze najít v příloze.

4.2.5) Analýza odpovědi e

Jak můžeme vidět na obrázku 4.4, tento signál nebyl jako jediný moc silný a nedošlo tak k saturaci přijímače. Nicméně ani v tomto případě nedošlo k zcela bezchybnému přenosu, což lze v tomto případě přisoudit menšímu odstupů signálu od šumu a opět vícecestnému šíření.



Obr. 4. 4 Průběh odpovědi e

Testování naměřeného signálu lze dohledat ve skriptu „test_zmereny_signal“.

5) Závěr

Cílem této práce bylo seznámit se se systémem ADS-B, především s algoritmem kódování/dekódování dat v rámci ADS-B zprávy a na základě těchto poznatků navrhnout a implementovat metody pro detekci a dekódování dat, pro případ příjmu s přítomností šumu.

Poznatky, nastudované z doporučené literatury, jsou shrnuty v druhé kapitole této práce. Nejprve jsou zde shrnuty základní informace o sekundárním radaru a jeho jednotlivých módech. Následuje úvod do systému ADS-B a jeho struktura. V závěru této kapitoly je popsána metoda pro detekci chyb při přenosu v podkapitole, zabývající se cyklickými kódy.

Třetí kapitola se zabývá praktickou částí práce. Nejprve bylo nutné vytvořit uměle generovaný signál, podle specifikací uvedených ve druhé kapitole, na němž se později mohly testovat navržené metody pro detekci, dekódování a následné kontroly bezchybného přenosu, a to nejprve bez přidaného šumu, později i s ním.

Na signálu bez šumu bylo třeba dosáhnout bezchybného přenosu, což se podařilo, a poté tyto metody otestovat i na signálu, zatíženém šumem. Po přidání šumu bylo ovšem nutné tyto metody modifikovat, jak je to popsáno v podkapitole 3.3.1. Pokud byl zkoumaný signál bez šumu a byl relativně krátký, vše probíhalo bez problému, ale pokud se jednalo o delší časový úsek, narostl počet vstupních dat a ukázalo se, že navržené metody nejsou pro takový objem ideální (bylo dosaženo velmi dlouhé výpočetní doby nebo se signál vůbec nepodařilo detekovat a dekódovat). I tento problém se, právě modifikací metod, podařilo odstranit. Následovalo otestování detekce a dekódování, v závislosti na narůstajícím šumu, všechny poznatky a výsledky jsou okomentovány v kapitole 3.5 a 3.6.

Ve čtvrté kapitole přišlo na řadu testování metod na naměřeném signálu. Jak je zmíněno hned v úvodu této kapitoly, v případě skutečného signálu se musíme vypořádat, kromě šumu, i s dalšími problémy, jako je například příliš velká úroveň vstupního signálu a následná saturace rádiového přijímače a přítomnost vícecestného šíření. To ovšem není cílem této práce. Při aplikaci navržených metod na skutečný signál se některé ze zkoumaných signálů nepodařilo detekovat, a to právě především z důvodu příliš velké úrovně signálu. Pokud ovšem nebyla saturace tak značná, podařilo se detekovat i mírně přebuzený signál. U žádného z testovaných průběhů však nedošlo k bezchybnému přenosu, což způsobilo nenulovost kontrolní součtu. V jednom z případů byla pravděpodobně na vině saturace přijímače, v případě druhém byla naopak poměrně nízká úroveň signálu oproti šumu, případně mohlo chyby způsobit vícecestné šíření signálu.

Jelikož se u generovaného signálu, do určité úrovně šumu, vždy podařilo dosáhnout bezchybného přenosu, můžeme předpokládat, že nešlo o chybně navržené metody, ale právě o výše zmíněné znehodnocení užitečného signálu.

Vzhledem k výsledkům by jistě bylo zajímavé v této práci pokračovat a zaměřit se, kromě detekce chyb, také na jejich následné opravení, a to nejen z hlediska velkého přidaného šumu, ale také z hlediska chyb, vzniklých vícecestným šířením signálu.

6) Seznam použité literatury

[1] *Multilateration & ADS-B: Executive Reference Guide* [online]. [cit. 2016-05-22].
Dostupné z: <http://www.multilateration.com/downloads/MLAT-ADS-B-Reference-Guide.pdf>

[2] *ICAO 9684 Manual of the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems (Doc 9684)*. Third Edition. 2004. ISBN 929194333.

[3] VEJRAŽKA, František a Zdeněk HRDINA. *Signály a soustavy*. Dotisk 3. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-00450-3.

[4] *GPS - Squitter: System Concept, Performance and Development Program* [online]. Lincoln laboratory, MIT, 1994 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z:
https://www.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol07_no2/7.2.8.gpssquitter.pdf

[5] BEASLEY, Barry. *EETimes* [online]. [cit. 23.5.2016]. Dostupný na WWW:
http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1280004

[6] ALLEN, Chet. *Smyrna Air Center* [online]. [cit. 23.5.2016]. Dostupný na WWW:
<http://www.smyrnaaircenter.com/2012/09/ads-b-the-basics>

7) Seznam příloh

Obsah přiloženého CD

Obsahem přiloženého CD je změřený signál, uložen v souboru .txt.

Dále se na CD nachází jednotlivé okomentované funkce a skripty vytvořené v MatLabu.

Funkce jsou rozděleny do jednotlivých složek (podle kapitol), aby bylo možné je rovnou spouštět.

- 1) 315_365.txt – naměřené hodnoty signálu
- 2) ADSB.m – funkce pro vytvoření kompletní, zakódované zprávy ADS-B
- 3) bindiv.m – funkce pro binární dělení
- 4) kodovaniadsb.m – funkce pro kódování zprávy ADS-B
- 5) parsekvence.m – funkce pro vytvoření paritní sekvence
- 6) preamble.m – funkce pro vytvoření preamble signálu
- 7) test_generovani_bez_sumu.m – skript pro testování generování signálu bez šumu
- 8) zprava.m – funkce pro vytvoření zprávy ADS-B
- 9) dekodovaniadsb.m - funkce pro dekodování zprávy ADS-B
- 10) dekodovaniadsb2.m – modifikovaná funkce pro dekodování zprávy ADS-B
- 11) kontrolaparity.m - funkce pro kontrolu parity
- 12) test_dekodovani_bez_sumu.m – skript pro testování dekodování bez šumu
- 13) detekce.m – funkce pro detekci zprávy ADS-B
- 14) posunvcase.m - funkce pro posun signálu v čase
- 15) test_detekce_bez_sumu.m – skript pro testování detekce signálu bez šumu
- 16) pridanisumu.m – funkce pro přidání šumu do signálu
- 17) test_generovani_se_sumem.m - skript pro testování generování signálu se šumem
- 18) test_dekodovani_se_sumem.m - skript pro testování dekodování signálu se šumem
- 19) test_detekce_se_sumem.m - skript pro testování detekce signálu se šumem
- 20) test_zmereny_signal.m - skript pro testování změřeného signálu

8) Seznam obrázků

Obr. 2. 1 Dotazovací signál módu A	10
Obr. 2. 2 Odpověď na dotazovací signál módu A	11
Obr. 2. 3 Dotazovací signál módu S [5]	12
Obr. 2. 4 Odpověď na dotazovací signál módu S [5]	12
Obr. 2. 5 Formát zprávy módu S - short squitter	12
Obr. 2. 6 Formát zprávy módu S - extended squitter	13
Obr. 2. 7 Diagram funkce ADS-B [6]	13
Obr. 2. 8 Obsah zprávy ADS-B	14
Obr. 3. 1 Průběh zakódovaného znaku "0"	18
Obr. 3. 2 Průběh zakódovaného znaku "1"	18
Obr. 3. 3 Generovaná odpověď ADS-B bez šumu	19
Obr. 3. 4 Generovaná odpověď ADS-B bez šumu – preamble	20
Obr. 3. 5 Odpověď ADS-B posunutá v čase	23
Obr. 3. 6 Korelační funkce	22
Obr. 3. 7 Korelační funkce – detail	23
Obr. 3. 8 Odpověď ADS-B s přidaným šumem	24
Obr. 3. 9 Odpověď signálu ADS-B s přidaným šumem koeficient 0,3	25
Obr. 3. 10 Odpověď signálu ADS-B s přidaným šumem koeficient 0,5	26
Obr. 3. 11 Odpověď signálu ADS-B s přidaným šumem koeficient 0,7	26
Obr. 3. 12 Odpověď signálu ADS-B s přidaným šumem koeficient 0,8	27
Obr. 3. 13 Odpověď signálu ADS-B s přidaným šumem koeficient 0,9	28
Obr. 3. 14 Odpověď signálu ADS-B s přidaným šumem koeficient 1,1	28
Obr. 3. 15 Signál posunutý v čase s přidaným šumem	29
Obr. 3. 16 Signál posunutý v čase s přidaným šumem, nedetekovatelný	30
Obr. 4. 1 Průběh naměřeného signálu s odpověďmi ADS-B	32
Obr. 4. 2 Průběh odpovědi a	33
Obr. 4. 3 Průběh odpovědi b	34
Obr. 4. 4 Průběh odpovědi e	35