



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Olga Baskakova

Možnosti kalibrace množství zaznamenaných zpráv  
na základě 1090ES

Bakalářská práce

**2018**



**K621**..... **Ústav letecké dopravy**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Olga Baskakova**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**B 3710 – LED – Letecká doprava**

Název tématu (česky): **Možnosti kalibrace množství zaznamenaných zpráv na základě 1090 ES**

Název tématu (anglicky): Possibilities of Calibrating the Amount of Recorded Messages Based on 1090 ES

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Příčiny nekompletnosti množství zaznamenaných zpráv na výstupu ADS-B přijímačů
- Teoretický popis metody kalibrace množství zaznamenaných zprávy založený na znalosti množství emitovaných zpráv technologií 1090 ES pro konkrétní letadlo
- Aplikace metody na reálných datech - softwarové řešení v prostředí Matlab
- Ověření navržené metody kalibrace s využitím fúzování reálných záznamů z více přijímačů



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: RTCA DO-260B MOPS for 1090 Extended Squitter ADS-B and TIS-B  
ADS-B Mode S Decoding Guide, dostupné z:  
<https://adsb-decode-guide.readthedocs.io/en/latest/>  
<https://www.mathworks.com/>

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **20. října 2017**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **27. srpna 2018**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu letecké dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Olga Baskakova  
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....24. dubna 2018

### **Poděkování**

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Stanislavu Pleningerovi, PhD., za odborné vedení, užitečné rady a čas, který mi věnoval. Dále děkuji Ing. Tomáši Liptákovi za konzultování bakalářské práce a poskytnuté informace. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu během studia.

### **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

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

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 27. srpna 2018

.....  
Podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Možnosti kalibrace množství zaznamenaných zpráv na základě 1090ES

bakalářská práce  
srpen 2018  
Olga Baskakova

#### ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je teoretické a praktické ověření metody kalibrace přijatých odpovědí od konkrétních letadel na základě znalosti schématu vysílání ADS-B zpráv příslušející technologii ADS-B 1090ES. K tomuto účelu byl vytvořen program, který zjišťuje počet přijatých odpovědí vybraných formátů jedním přijímačem od konkrétního cíle. Dalším programem použitým pro ověření navržené metody kalibrace je program pro rekonstrukci zpráv. Součástí práce je vyhodnocení úspěšnosti metody a prezentace výsledků.

#### ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is the theoretical and practical verification of calibration method of received responses from specific aircraft on the basis of knowledge ADS-B transmission scheme reported in the ADS-B 1090ES technology. For this purpose, was created the program that determines the number of selected formats received responses by one receive from specific aircraft. Another program used to verify the calibration method is the program for message reconstruction. Part of the thesis is an evaluation of the success of the method and presentation of the results.

## KLÍČOVÁ SLOVA

ADS-B, 1090ES, DF Kod, Mod S, SSR, metoda kalibrace

## KEY WORDS

ADS-B, 1090ES, DF Code, Mod S, SSR, calibration method

# Obsah

Seznam zkratek.....	8
1 Úvod .....	10
2 Sekundární radiolokace a technologie ADS-B .....	11
2.1 Sekundární radiolokace .....	11
2.1.1 Módy sekundární radiolokace .....	11
2.1.2 Formát dotazů a odpovědi módů 3/A a módu C.....	12
2.1.3 Mód S.....	13
2.1.4 Struktura dotazů a odpovědí módu S.....	14
2.1.5 Druhy zpráv formátu DF17 .....	19
2.2 ADS-B .....	22
2.2.1. Výhody ADS-B: .....	24
3. Příčiny nekompletnosti množství zaznamenaných zpráv na výstupu ADS-B přijímačů .....	25
3.1. FRUIT (False Replies from Unsynchronised Interrogator Transmissions) .....	25
3.2. Garbling.....	25
4. Aplikace metody na reálných datech – softwarové řešení v prostředí Matlab.....	26
4.1. Úvod.....	26
4.2. Fakultní přijímače.....	26
4.3. Vstupní data .....	26
4.4. Popis pomocných funkcí .....	27
4.5. Sledovaná oblast.....	28
4.6. Zpracování vstupních dat.....	28
4.7. Výstupní proměnné vytvořeného softwaru.....	29
5. Teoretický popis metody kalibrace množství zaznamenaných zpráv založený na znalosti množství emitovaných zpráv technologií 1090 ES pro konkrétní letadlo .....	30
5.1. Technologie 1090ES.....	30
5.2. Metoda kalibrace.....	30
5.3. Postup pro použití metody kalibrace .....	31
5.4. Teoretický popis postupu .....	31
6. Ověření navržené metody kalibrace s využitím fúzování reálných záznamů z více přijímačů	35
6.1. Popis programu.....	35
6.2. Porovnání ztráty zpráv při měření různým počtem přijímačů.....	35

6.3. Aplikace metody kalibrace na datech naměřených jedním přijímačem .....	35
6.4. Aplikace metody kalibrace na datech naměřených fúzováním ze čtyř přijímačů .....	37
6.5. Sledování závislosti mezi ztrátami zpráv různých formátů pomocí korelační analýzy .....	38
6.6. Testování statistické významnosti vypočtených korelačních koeficientů .....	39
7. Hodnocení úspěšnosti metody kalibrace.....	40
8. Prezentace výsledků pro konkrétní vybraná letadla .....	43
9 Závěr .....	47
Seznam příloh .....	49
Použité zdroje.....	50



## Seznam zkratek

ACAS	Airborne Collision Avoidance System / Palubní protisrážkový system
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance Broadcast / Automatické závislé sledování
AP	Adresní parita
AS	Aquisition Squitter / Akviziční squitter
ČR	Česká republika
CRC	Cyclic Redundancy Check
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
DF	Downlink Format / Sestupný formát
ES	Extended Squitter / Rozšířené vysílání
FMS	Flight Management System
FRUIT	False Replies Un-synchronised In Time
GNSS	Global Navigation Satellite System / Globální navigační družicový system
GPS	Global Positioning System / Globální polohový systém
HEX	Hexadecimal / Šestnáctková soustava
IC	Interrogator Code / Kód dotazovače
ICAO	International Civil Aviation Organization / Mezinárodní organizace pro civilní letectví
PI	Parity Field / Identifikace dotazovace
ŘLP	Řízení letového provozu
SPI	Special position indication / Speciální polohový identifikační impuls

SSR	Secondary Surveillance Radar / Sekundární přehledový radar
TC	Type Code / Typový kód
TIS-B	Traffic Information Service – Broadcast
UAT	Universal Access Transceiver
UF	Uplink Format / Formát vzestupného spoje
USA	United States of America / Spojené státy americké
UTC	Universal Time Coordinated / Koordinovaný světový čas
VDL-M4	Very High Frequency Data Link Mode-4

# 1 Úvod

Letecká doprava je nejbezpečnějším a nejrychlejším druhem dopravy. Zájem cestujících o leteckou dopravu roste celosvětově, což vede k neustálému růstu objemu leteckého provozu. Se zvyšující se intenzitou a hustotou letecké dopravy přibývají i nebezpečné situace.

V dnešní době dostávají řídící letového provozu většinou přehledovou informaci o letovém provozu pomocí sekundární radiolokace, která je založena na využití frekvenčního pásma 1030/1090 MHz. Pozemní dotazovači vysílají dotazy na frekvenci 1030 MHz a na frekvenci 1090 MHz dostávají odpovědi s potřebnou informací.

Rozvoj technologií v oblasti navigace vedl ke vzniku systému závislého sledování ADS-B. Systém je založen na schopnosti letadla automaticky a periodicky vysílat informace, které se získávají pomocí signálu GPS. Informace o poloze, rychlosti, identifikační značce a ostatní důležité informace se vysílají všem účastníkům provozu v okolí a řídícím letového provozu.

Sledování letadel je zatíženo chybami, které vedou ke ztrátě informací. Přijímací stanice pak dostává nekompletní data. Pro pochopení problému saturace frekvenčního pásma je potřeba přesně vědět počet vysílaných a přijatých zpráv.

Cílem této bakalářské práce je ověřit teoreticky a prakticky, zda a jak přesně lze kalibrovat naměřený záznam přijatých odpovědí od konkrétního cíle na základě záznamu zpráv příslušejících technologii ADS-B 1090ES. Výstupem první části je program, který určuje počet zpráv sledovaných formátů od konkrétního letadla. Ve druhé části byl pro analýzu dat použit program pro fúzování zpráv z více přijímačů. Na základě znalosti schématu vysílání ADS-B zpráv lze zjistit pravděpodobnost ztráty zpráv DF17 při sledování letadla jedním přijímačem a systémem z více přijímačů. Předpokladem, který se bude ověřovat, je, že pravděpodobnost ztrát bude stejná i u všech ostatních sledovaných formátů, a proto použitím metody kalibrace lze zpřesnit neúplný záznam přijatých odpovědí.

## 2 Sekundární radiolokace a technologie ADS-B

Intenzita letecké dopravy neustále narůstá a je potřeba zachovávat bezpečnost provozu a zabránit katastrofám. Pomocí přehledových systémů lze zjistit polohu objektu v prostoru, informace o jejich pohybu a další potřebné informace.

Tato kapitola popisuje princip funkce systému sekundárních radarů a systému ADS-B, jejich technické charakteristiky, strukturu dotazů a odpovědí jednotlivých módů.

### 2.1 Sekundární radiolokace

Systém sekundárního radaru se skládá z pozemního dotazovače, pozemního přijímače a palubního zařízení zahrnujícího přijímač / vysílač, který se nazývá odpovídač. Pozemní dotazovač vysílá dotaz na frekvenci 1030 MHz. Palubní odpovídač tento dotaz přijímá a vysílá odpověď obsahující požadovaný údaj na frekvenci 1090 MHz. Pozemní přijímač potom tuto informaci přijímá na frekvenci 1090 MHz. [1]

#### 2.1.1 Módy sekundární radiolokace

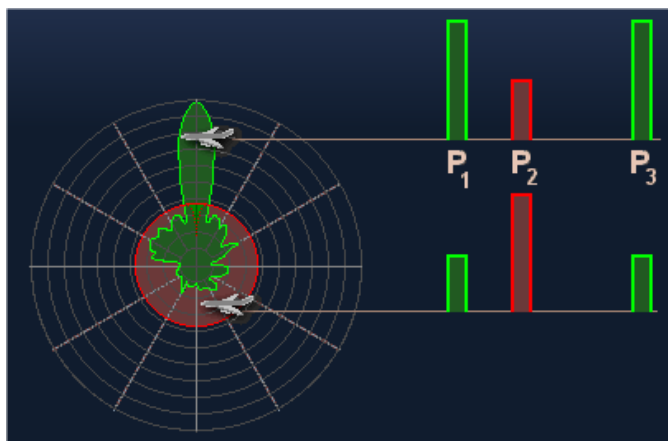
Dotazy pozemního dotazovače mohou mít různý průběh (mód) a odpovídače podle něj předávají radaru různé informace. Civilní módy sekundárního radaru jsou označovány písmeny, vojenské módy se označují čísly. Původně byly definovány čtyři civilní módy. Dnes se z těchto módů používají pouze dva (módy A a C), které se postupně nahrazují módem S. [1]

Systém civilního SSR se obvykle označuje jako režim A/C. Vojenský režim 3 a civilní režim A jsou stejné režimy dotazování, a proto se často označují jako režim 3/A. Mód 3/A vysílá neadresný dotaz pro zjištění čtyřpísmenného kódu, tzv. identifikačního čísla letů, které přiděluje řídicí letového provozu jako čtyřmístné číslo v osmičkové soustavě. Mód C se používá pro přenos informace o výšce letadla. Přenášený údaj je přebírán z barometrického výškoměru a zaokrouhluje se na stovky stop. [2]

Odpovídače na palubě letadla nejsou schopné odpovídat na všechny formáty dotazů. Vojenské transpondéry letadel mají schopnost odpovídat na dotazy vojenských módů a některé i na dotazy módu C. Civilní transpondéry by měly rozpoznávat režimy 3/A a C. [2]

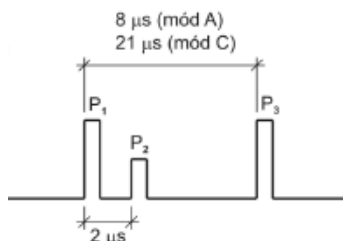
## 2.1.2 Formát dotazů a odpovědi módů 3/A a módu C

Pro správné určení polohy letadla dotazovač sekundárního radaru musí být vybaven dvojicí antén. Hlavní anténa s úzkým hlavním svazkem a potlačovací anténa se širokým diagramem překrývajícím postranní svazky hlavní antény (viz obrázek č.1 ).



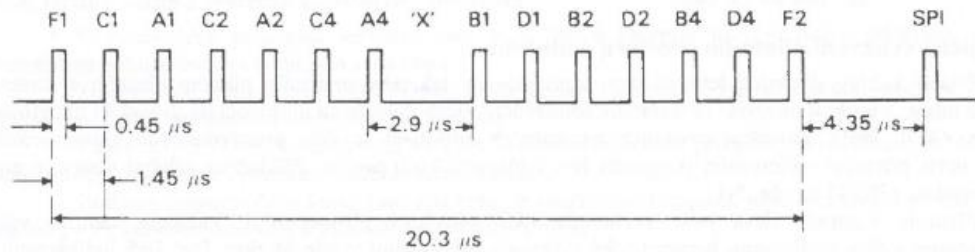
Obrázek 1: Vyzařovací charakteristika hlavní a potlačovací antény [3]

Pozemní zařízení vysílá dotaz, který je složen ze tří pulzů šířky  $0,8 \pm 0,1$  ms. Formát dotazu SSR se určuje pomocí časového odstavu mezi pulzy P1 a P3, které jsou vysílány hlavní anténou a mají být alespoň o 9 dB silnější než všesměrový impuls P2 vyslaný potlačovací anténou. Porovnáním amplitud signálů může přijímač zjistit, jestli přijatý dotaz je z hlavního nebo z postranního svazku. Je-li  $P1 > P2 + 9$  dB, přijímač odpoví. Je-li  $P1 < P2 - 9$  dB, ignoruje. Pokud je  $P2 < P1 < P2 + 9$  dB, přijímač může, ale nemusí odpovědět. Pokud je časová vzdálenost pulzu P1 a P3 je  $8 \mu\text{s} (\pm 0.2) \mu\text{s}$ , jedná se o mód A. Mód C je charakterizován časovou vzdáleností  $21 \mu\text{s} (\pm 0.2) \mu\text{s}$ . [4][5] Průběh signálů dotazu módu A/3 a módu C je znázorněn na obrázku 2.



Obrázek 2: Průběh dotazu módu A/3 a módu C [6]

Formát odpovědi SSR sestává z několika pulzů šířky  $0.45 \mu\text{s}$  ( $\pm 0.1 \mu\text{s}$ ). Pulzy F1 a F2 jsou bránové a jsou od sebe vzdálené  $20.3 \mu\text{s}$ , přičemž impulz F1 je vždy na začátku a F2 na konci zprávy. Impulzy, které se nachází mezi F1 a F2 slouží k předání požadované informace na konkrétní dotazování. Speciální polohový identifikační impuls (SPI) se vysílá jako doplněk k informačním impulsům výhradně na základě zásahu pilota. Odpověď módu C má stejný průběh jako odpověď módu 3/A, ale bit D1 je trvale 0. [2][7] Průběh odpovědi módu 3/A je znázorněn na obrázku 3.



Obrázek 3: Struktura odpovědi módu 3/A [6]

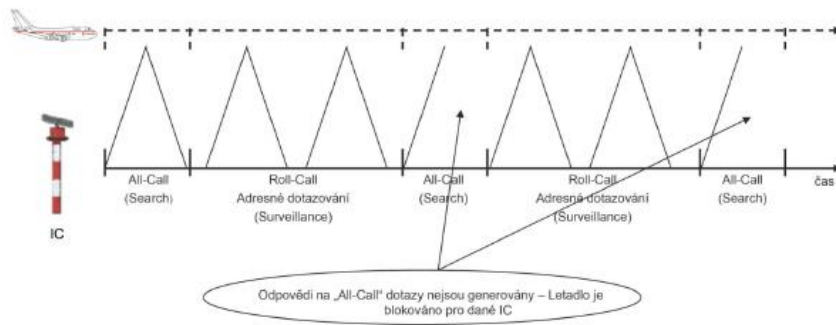
### 2.1.3 Mód S

Jednou z příčin zavedení módu S je nedostatek kódu módu A. Pomocí kódu může řídicí identifikovat letadlo, skupinu letadel nebo typ letu. Existuje 4096 kódů, ale tato nabídka je nedostačující. Existuje možnost, že v jednom čase budou mít dvě různá letadla stejný identifikační kód. [8]

Mód S je charakterizován dvěma typy dotazů. Prvním je dotaz všeobecný, který je vysílán v tzv. All Call periodě. Na všeobecný dotaz standardní odpovídač A/C odpovídá identifikací a tlakovou výškou, odpovídač S vyšle jako odpověď svoji ICAO adresu. Druhým typem je dotaz adresný, který je vysílán v tzv. Roll Call periodě. Adresný dotaz je určen pro konkrétní letadlo, jehož adresa je známá z odpovědi na všeobecný dotaz. Standardní odpovídač na tento dotaz neodpovídá, čímž se snižuje zatížení dotazovače vysokým počtem nežádoucích neadresných odpovědí. [9]

Každý odpovídač (letadlo) a dotazovač má unikátní identifikaci. Odpovídači je přiřazena ICAO adresa letadla o délce 24 bitů. Identifikací dotazovače je tzv. Interrogator Code (IC), který je obsažen v každém dotazu. [10]

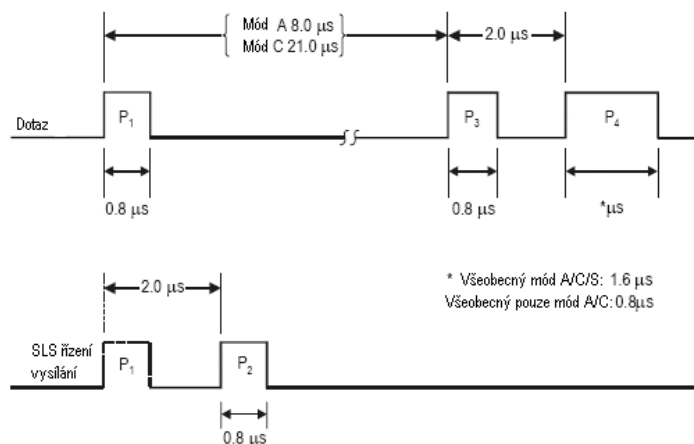
V první fázi pozemní dotazovač vysílá všeobecné dotazy všem letadlům, které se nachází v oblasti jeho pokrytí. Po přijetí všeobecného dotazu odpovídač na palubě vyšle odpověď, která zahrnuje 24 bitovou ICAO adresu letadla a IC dotazovače. Po dekódování odpovědi pozemní dotazovač určí adresu letadla, kterému bude vysílat selektivní dotazy. Každý selektivní dotaz by měl obsahovat příkaz blokování, který umožňuje, aby odpovídač ignoroval všeobecné dotazy s IC dotazovače po dobu 18 sekund. Tím dochází k potlačení odpovědí na všeobecné dotazy po celou dobu letu v oblasti pokrytí daného dotazovače. [9][11]



Obrázek 4: All Call a Roll Call perioda [6]

## 2.1.4 Struktura dotazů a odpovědí módu S

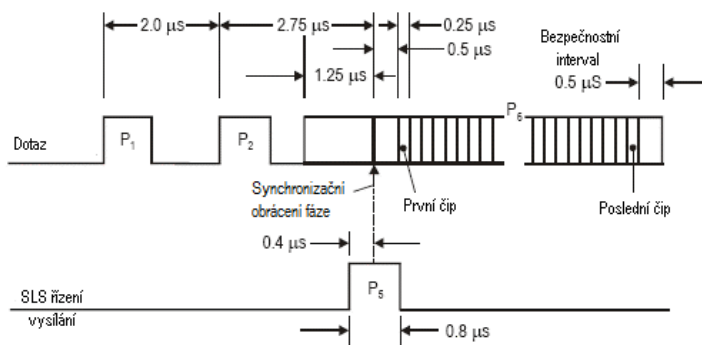
Všeobecné dotazy, které obdrží všechna letadla, se skládají z pulzů P1, P3, P4 a kontrolního pulzu P2. Pulz P2 je vždy ve vzdálenosti 2  $\mu\text{s}$  od pulzů P1. Vzdálenost mezi P1 a P3 se určuje na základě toho, zda se jedná o mód A (8  $\mu\text{s}$ ) nebo mód C (21  $\mu\text{s}$ ). Délka pulzu P4 určuje, o jaký dotaz se jedná, 0,8  $\mu\text{s}$  u dotazu All Call short nebo 1,6  $\mu\text{s}$  u dotazu All Call long. Odpovídače módu S odpovídají jenom na All Call long dotazy zprávou se svojí adresou. Odpovídače jiných módů odpovídají na všechny přijaté dotazy. [7]



**Obrázek 5: Průběh všeobecného dotazu módu S [7]**

Selektivní dotaz módu S má charakter datové zprávy. Je vysílán na stejné frekvenci jako módy A a C. Struktura dotazů je navržena tak, aby odpovídače nepodporující mód S vyhodnotily selektivní dotaz jako neplatný a ignorovaly.

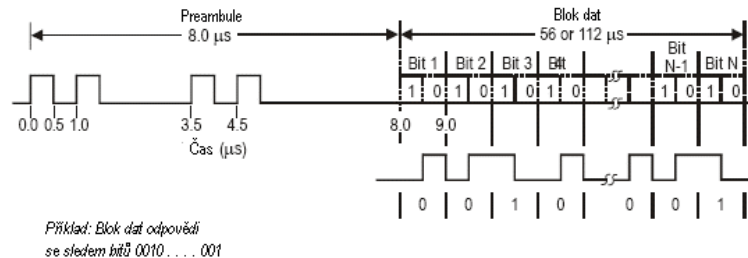
Preamble selektivního dotazu je tvořena impulzy P1 a P2 s délkou 0,8  $\mu$ s. Impulz P6 obsahuje datovou zprávu trvající 16,25  $\mu$ s (56 bitů) nebo 30,25  $\mu$ s (112 bitů). Pro synchronizaci odpovídače je ve vzdálenosti 1,25  $\mu$ s od náběžné hrany impulzů P6 referenční fázová změna. Po 0,5  $\mu$ s následují jednotlivé datové bity. Impulz P5 je vysílán potlačovací anténou. Pokud je amplituda impulzu z hlavního laloku větší než impulz z potlačovací antény, odpovídač přijme dotaz a vyšle odpověď. Pokud je dotaz přijat postranním lalokem hlavní antény, je amplituda potlačovacího impulzu větší a znemožní tak vyhodnocení synchronizační změny fáze. V tomto případě odpovídač na dotaz neodpoví. [1][7]



**Obrázek 6: Průběh selektivního dotazu módu S [13]**



Stejně jako selektivní dotaz se odpověď módu S skládá z preamble a bloků dat. Preamble obsahuje 4 pulzy délky 0,5  $\mu$ s. Datová zpráva je ve vzdálenosti 8  $\mu$ s od náběžné hrany prvního pulzu preamble a obsahuje 56 nebo 112 intervalů (bitů) po 1  $\mu$ s. [1][7]



**Obrázek 7: Odpověď módu S [13]**

Datová zpráva dotazu a odpovědi módu S musí obsahovat dvě hlavní pole. Na začátku zprávy je deskriptor. Toto 5 bitové pole slouží k definování formátu vysílání. Deskriptor je určen pro pole UF (formát vzestupného spoje) nebo DF (formát sestupného spoje). Posledních 24 bitů zprávy je vždy vyhrazeno pro součet kontrolní parity a adresy dotazovaného odpovídáče a označuje se AP (adresní parita) nebo PI (parita identifikace dotazovače). Po přijetí dotazu odečte transpondér od posledních 24 bitů svoji adresu. Pokud je výsledek nulový, dotaz je adresován správně a zpráva je přijata bez chyby. [1][7]

Pro tuto práci jsou důležitě formáty sestupného spoje (DF) módu S. Přehled všech formátů odpovědí je uveden na obrázku. Jednotlivé zkratky segmentu zpráv jsou popsány v tabulce 1.

Formát	DF										
0	00000	VS:1	CC:1	1	SL:3	2	Rt:4	2	AC:13	AP:24	...krátké sledování letadlo-letadlo (ACAS)
1	00001	27 nebo 83								P:24	...vyhrazeno
2	00010	27 nebo 83								P:24	...vyhrazeno
3	00011	27 nebo 83								P:24	...vyhrazeno
4	00100	FS:3	DR:5	LM:6	AC:13	AP:24	...sledování, odpověď výšky				
5	00101	FS:3	DR:5	LM:6	ID:13	AP:24	...sledování, odpověď identifikace				
6	00110	27 nebo 83								P:24	...vyhrazeno
7	00111	27 nebo 83								P:24	...vyhrazeno
8	01000	27 nebo 83								P:24	...vyhrazeno
9	01001	27 nebo 83								P:24	...vyhrazeno
10	01010	27 nebo 83								P:24	...vyhrazeno
11	01011	CA:3	AA:24	PI:24	...odpověď na všeobecný dotaz						
12	01100	27 nebo 83								P:24	...vyhrazeno
13	01101	27 nebo 83								P:24	...vyhrazeno
14	01110	27 nebo 83								P:24	...vyhrazeno
15	01111	27 nebo 83								P:24	...vyhrazeno
16	10000	VS:1	2	SL:3	2	Rt:4	2	AC:13	MV:56	AP:24	...dlouhé sledování letadlo-letadlo (ACAS)
17	10001	CA:3	AA:24	ME:56	PI:24	...roziřený dotazovací signál					
18	10010	CF:3	AA:24	ME:56	PI:24	...roziřený dotazovací signál/ne odpověď					
19	10011	AF:3	104	...vojenský roziřený dotazovací signál							
20	10100	FS:3	DR:5	UM:6	AC:13	MB:56	AP:24 DP:24	...Comm-B, odpověď výšky (viz poznámka 5)			
21	10101	FS:3	DR:5	UM:6	ID:13	MB:56	AP:24 DP:24	...Comm-B, odpověď identifikace (viz poznámka 5)			
22	10110	27 nebo 83								P:24	...vyhrazeno pro vojenské využití
23	10111	27 nebo 83								P:24	...vyhrazeno
24	11	1	KE:1	ND:4	MD:80	AP:24	...Comm-D (ELM)				

Obrázek 8: Přehled dotazů módu S a formátů sestupného spoje [7]

**Tabulka 1: Defenice polí [7]**

AA	Aircraft Address, ICAO adresa letounu, použití v DF11 a DF17. (24 bitů)
AC	Altitude code, výška (13 bitů)
AP	Adresně paritní pole (24 bitů)
CA	Capability – úroveň odpovídače (3 bity)
CC	Crosslink capability (1 bit)
DF	Downlink formát - první pole 5-ti bitů u všech zpráv (5 bitů)
DR	Downlink requests (5 bitů)
FS	Flight status A/C (3 bity)
ID	Identifikace nastavována pilotem – 4096 možností (13 bitů)
KE	Definuje obsah polí ND a MD Comm-D odpovědí (1 bit)
MB	Zpráva odeslána dotazovači, část Comm-B odpovědi (56 bitů)
MD	Comm-D pole (80 bitů)
ME	Extended squitter message – vlastní ADS-B zpráva DF 17 (56 bitů)
MV	Část dlouhé odpovědi při sledování „vzduch-vzduch“ (56 bitů)
ND	Informace pro číslo segmentu pro Comm-D (4 bity)
PI	Paritní pole (24 bitů)
RI	Informace pro TCAS – obsahuje informace o úrovni TCAS a o přibližné hodnotě rychlosti (4 bity)
SL	Level citlivosti TCAS (3 bity)
UM	Status odpovídače (dotazovače) (6 bitů)
VS	Indikace stavu letounu na zemi (1), ve vzduchu (0) (1bit)

Rozeznáváme 25 různých formátů sestupného zdroje (DF) módu S. V závislosti na DF kódu, zprávy se liší strukturou a účelem. V současnosti se v letectví používá především několik DF formátů zpráv [2][12]:

DF0: Krátký typ zpráv, komunikace vzduch-vzduch systému ACAS.

DF4: Krátký typ zpráv, informace o výšce letounu.

DF5: Krátký typ zpráv, informace o identitě letounu.

DF11: Krátká odpověď na všeobecný dotaz. Acquisition squitter.

DF16: Dlouhý typ zpráv, komunikace vzduch-vzduch systému ACAS.

DF17: 1090 Extended squitter, používá se pro systém ADS-B, rozšířená odpověď na všeobecný dotaz.

DF18: TIS-B zprávy.

DF19: Zprávy, které jsou využívány pro vojenské účely.

DF20: Dlouhý typ zpráv, stejně jako u zprávy formátu DF4 informace o výšce letounu, ale navíc má datové pole, do kterého je kódován příslušný BDS registr.

DF21: Dlouhý typ zpráv, stejně jako u zprávy formátu DF5 informace o identitě letounu, ale navíc má datové pole, do kterého je kódován příslušný BDS registr.

DF22: Zprávy, které jsou využívány pro vojenské účely.

### 2.1.5 Druhy zpráv formátu DF17

Zprávy formátu DF17 se rozdělují na několik druhů podle Type kódů (TC). Type kód je definován prvními 5 bity datové zprávy. Informace ve zprávách dle jednotlivých TC je popsána v tabulce 2.

**Tabulka 2: Type kody zpráv DF17 [13]**

TC	Typ zprávy
0	"Airborne position" nebo "Surface position" zpráva
1-4	"Aircraft identification" zpráva
5-8	"Surface position" zpráva
9-18	"Airborne position" zpráva
19	"Airborne velocities" zpráva
20-22	"Airborne position" zpráva
23-31	Rezervované pro jiné účely

### 2.1.5.1 “Airborne Position” zpráva

Definuje zeměpisnou délku a šířku letadla, barometrickou nadmořskou výšku, výšku odvozenou z GPS a surveillance status. Zpráva se vysílá náhodně v intervalu 0,4-0,6s, pokud je letadlo ve vzduchu. [13][14]

Tabulka 3: Zprava “Airborne Position” [13]

Bit zprávy	33-37	38-39	40	41-52	53	54	55-71	72-88
ME bit	1-5	6-7	8	9-20	21	22	23-39	40-56
Pole	TYPE Code	Surveillance Status	NIC Supplement-B	Altitude	Time	CPR Format	CPR Encoded Latitude	CPR Encoded Longitude
Počet bitů	[5]	[2]	[1]	[12]	[1]	[1]	[17]	[17]

### 2.1.5.2 “Surface Position” zpráva

Definuje zeměpisnou délku a šířku letadla, informace o pohybu a směru letadla na zemi. Zpráva se vysílá náhodně v intervalu 0,4-0,6s pokud se letadlo pohybuje na zemi. V intervalu 4,8-5,2s, pokud letadlo stojí na zemi. [13][14]

Tabulka 4: Zprava “Surface Position” [13]

Bit zprávy	33-37	38-44	45	46-52	53	54	55-71	72-88
ME bit	1-5	6-12	13	14-20	21	22	23-39	40-56
Pole	TYPE Code	Movement	Heading/Ground Track Status	Heading/Ground Track	Time	CPR format	CPR Encoded Latitude	CPR Encoded Longitude
Počet bitů	[5]	[7]	[1]	[7]	[1]	[1]	[17]	[17]

### 2.1.5.3 “Aircraft Identification and Category” zpráva

Identifikuje letadla nebo vozidla na zemi. Zprávy se vysílají náhodně v intervalu 4,8-5,2s letadlem ve vzduchu a letadlem nebo vozidlem pohybujícím se na zemi. V intervalu 9,6-10,4s letadlem nebo vozidlem stojícím na zemi. [13][14]

**Tabulka 5: Zprava “Aircraft Identification and Category” [13]**

Bit zprávy	33-37	38-40	41-46	47-52	53-58	59-64	65-70	71-76	77-82	83-88
ME bit	1-5	6-8	9-14	15-20	21-26	27-32	33-38	39-44	45-50	51-56
Pole	TYPE Code	ADS-B Emitter Category	Ident Char 1	Ident Char 2	Ident Char 3	Ident Char 4	Ident Char 5	Ident Char 6	Ident Char 7	Ident Char 8
Počet bitů	[5]	[3]	[6]	[6]	[6]	[6]	[6]	[6]	[6]	[6]

V polích Ident Character 1-8 je zakódována informace o kategorii a volací značce letadla nebo pozemního prostředku. [13][14]

#### 2.1.5.4 “Airborne Velocity” zpráva

Definuje informace o pozemní a vzdušné rychlosti letadla. Rozlišujeme 4 druhy zpráv, které se liší subtype kódem. Zprávy se subtype kódem 1 a 2 poskytují informace o pozemní rychlosti. Zprávy se subtype kódem 3 a 4 o vzdušné rychlosti letadla. Subtype kódy 2 a 4 se používají pro nadzvuková letadla. [13][14]

**Tabulka 6: Zprava “Airborne Velocity” subtype 1 a 2 [13]**

Bit zprávy	33-37	38-40	41	42	43-45	46	47-56	57
ME bit	1-5	6-8	9	10	11-13	14	15-24	25
Pole	TYPE	Subtype	Intent change flag	Reserved-A	Velocity uncertainty (NAC)	East-West velocity sign	East-West velocity	North-South velocity sign
Počet bitů	[5]	[3]	[1]	[1]	[3]	[1]	[10]	[1]

58-67	68	69	70-78	79-80	81	82-88
26-35	36	37	38-46	47-48	49	50-66
North-South velocity	Vertical rate source	Vertical rate sign	Vertical rate	Reserved-B	Diff from baro alt, sign	Diff from baro alt
[10]	[1]	[1]	[9]	[2]	[1]	[7]

**Tabulka 7: Zprava “Airborne Velocity” subtype 3 a 4 [13]**

Bit zprávy	33-37	38-40	41	42	43-45	46	47-56	57
ME bit	1-5	6-8	9	10	11-13	14	15-24	25
Pole	TYPE	Subtype	Intent change flag	Reserved-A	Velocity uncertainty (NAC)	Heading status	Heading (proportion)	Airspeed Type
Počet bitů	[5]	[3]	[1]	[1]	[3]	[1]	[10]	[1]

58-67	68	69	70-78	79-80	81	82-88
26-35	36	37	38-46	47-48	49	50-66
Airspeed	Vertical rate source	Vertical rate sign	Vertical rate	Reserved-B	Difference from baro alt, sign	Difference from baro alt
[10]	[1]	[1]	[9]	[2]	[1]	[7]

## 2.2 ADS-B

Instalace pozemních radarů je složitá a drahá. Jejich vyzařovací charakteristika je závislá na umístění v terénu, meteorologických podmínkách a jiných faktorech, a proto bylo potřeba vyvinout přesnější a levnější systém. V devadesátých letech 20. století začal rozvíjet systém automatického závislého sledování ADS-B umožňující komunikaci mezi letadly a zemí a mezi letadly navzájem. Rozvoj ADS-B vedl ke zvýšení bezpečnosti, flexibility a efektivity leteckého provozu.

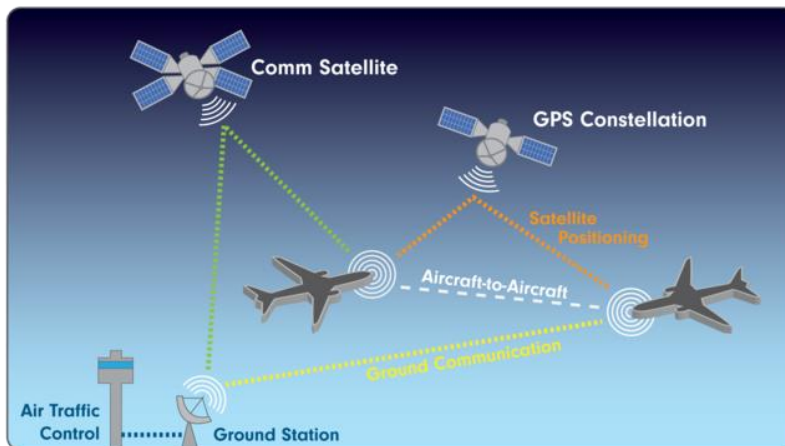
Zkratka ADS-B znamená:

Automatic – funguje automaticky bez zásahu pilota.

Dependent – určování polohy letadla pomocí satelitní navigace (GNSS) a systému řízení letu (FMS).

Surveillance – zajišťuje dohled nad provozem.

Broadcast – informace se vysílají automaticky všem uživatelům v dosahu.



Obrázek 9: Princip činnosti systému ADS-B [15]

Na obrázku č. 9 je znázorněn princip činnosti systému ADS-B. Letadlo nebo pozemní vozidlo vybavené ADS-B získává informace o své rychlosti a poloze pomocí GNSS a následně všesměrově vysílá zprávy. Tyto zprávy jsou pak přijaté všemi uživateli v dosahu. [16]

Z pohledu letadla se systém ADS-B rozděluje na ADS-B OUT a ADS-B IN. Funkce ADS-B IN umožňuje přijímání zpráv, jejich zpracovávání a zobrazení na palubním displeji. Funkce ADS-B OUT slouží k periodickému vysílání informací, jako je například horizontální a vertikální poloha, horizontální a vertikální rychlost, identifikace a ostatní informace. [16]

Existují tři technologie vysílání ADS-B zpráv. První je technologie UAT (Universal Access Transceiver), která vysílá zprávy na frekvenci 978 MHz a je využívána letadly v USA. Další technologie VDL-M4 se používá jenom v několika skandinávských zemích severní Evropy. Nejpoužívanější je ADS-B 1090MHz extended squitter (1090ES), která je rozšířená po celém světě. 1090ES je rozšířením Módu S. [16]



### **2.2.1. Výhody ADS-B:**

Ve srovnání s klasickým radarovým systémem ADS-B má lepší charakteristiky.

1. ADS-B se skládá ze sítě poměrně jednoduchých stanic, které jsou levné a snadno instalovatelné.
2. ADS-B přesněji určuje polohu letadla, což umožňuje zvýšit hustotu provozu. Data v systému ADS-B se aktualizují každou sekundu. Na rozdíl od radarového systému, kde doba aktualizace informací může být až 12 sekund, což je určeno rychlostí otáčení radarové antény.
3. Možnost úplného pokrytí území. Zařízení ADS-B lze instalovat v oblastech, kde není možné používat radarové zařízení. Například takové zařízení je instalováno na ropných plošinách v Mexickém zálivu, což výrazně zvyšuje bezpečnost a efektivitu letecké dopravy v této oblasti.  
[17]
4. ADS-B poskytuje přehled o letovém provozu na monitoru v kabině pilotů.

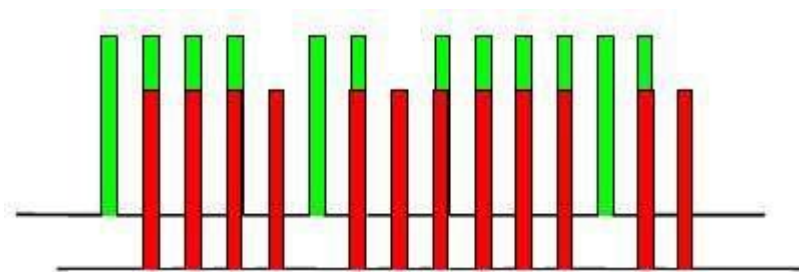
### 3. Příčiny nekompletnosti množství zaznamenaných zpráv na výstupu ADS-B přijímačů

#### 3.1. FRUIT (False Replies from Unsynchronised Interrogator Transmissions)

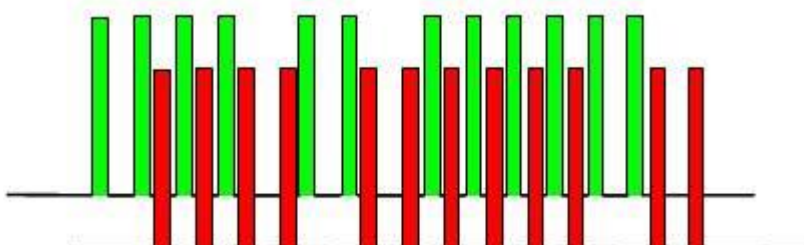
Problém nesynchronního rušení (FRUIT) nastává v oblastech s velkým počtem SSR. Problém je způsoben tím, že všechny SSR po celém světě pracují pouze na dvou frekvencích: 1030 MHz a 1090 MHz, kvůli čemuž dochází k reakci odpovídače na dotazy několika SSR. Pro odstranění nesynchronních odpovědí se v pozemním systému SSR používá zařízení defruiter. [3]

#### 3.2. Garbling

Dalším problémem je synchronní rušení. Stejně jako u nesynchronního rušení je příčinou vzniku velká koncentrace letového provozu. Garbling nastává v případě, kdy dvě letadla mají stejnou šikmou vzdálenost od radaru. Vyslané odpovědi se překrývají a dochází ke ztrátě signálů. Rozlišujeme dva druhy garblingu: synchronní a nesynchronní. Pokud se dvě odpovědi překrývají v čase tak, že jejich pulzy nejsou shodné, mluvíme o nesynchronním garblingu. Při synchronním garblingu jsou pulzy dvou odezev stejné, čímž dojde ke ztrátě obou odpovědí. [2][18]



Obrázek 9: Synchronní garbling [19]



Obrázek 9: Nesynchronní garbling [19]

## 4. Aplikace metody na reálných datech – softwarové řešení v prostředí Matlab

### 4.1. Úvod

Software pro analýzu vstupních dat byl vytvořen v programu Matlab. Součástí programu jsou pomocné funkce, které musí být uloženy v jedné složce. Pro spuštění programu musí tato složka obsahovat další složku s názvem "Archiv", která zahrnuje vstupní data z přijímačů uložená ve formátu dat. Vytvořený program má název „Zpravy\_jeden\_prijimac.m“ a je přílohou této práce.

### 4.2. Fakulní přijímače

Ústav letecké dopravy Fakulty dopravní ČVUT má 4 přijímače, které jsou rozmístěny na území Prahy. Seznam jednotlivých stanic a jejich souřadnice jsou popsány v tabulce 8.

Tabulka 8: Souřadnice fakulních přijímačů

Přijímač	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Nadmořská výška
Strahov	50.080512805	14.395710655	338.33
Pankrác	50.050384622	14.436212947	377.21
LKLT	50.129189	14.525771	285.0
LKPR	50.106234	14.273415	362.0

Vytvořený program určuje počet zpráv sledovaných formátů od konkrétních cílů jedním přijímačem. Přijímač použitý pro analýzu lze vybrat při spuštění programu. Faktorem ovlivňujícím výběr přijímače je poloha letadla během sledovaného úseku. Přijímač Pankrác se využívá pro příjem zpráv od letadel, která prolétávají nad západní částí České republiky. Přijímače Strahov, Letňany a LKPR mají vhodné umístění a mohou být použity pro příjem zpráv ze všech směrů v sledované oblasti (viz kapitola 4.4).

### 4.3. Vstupní data

Před provedením analýzy je nutné data naměřit a uložit do vhodné podoby. Přijímače dostávají zprávy od všech letadel v dané sledované oblasti. Každá přijatá zpráva obsahuje adresu letadla,

které tuto zprávu vyslalo. Adresa je zapsána v podobě 24 bitového pole na konci zprávy. Struktura zpráv různých formátů je popsána na obr. 8 v kapitole 2.1.4.

Odpovědi od palubních odpovídačů se ukládají na datový server a jsou rozdělené do datových souborů ve formátu dat. Každý soubor obsahuje naměřená data ve 20 minutovém intervalu a je označen kombinací čísel ve formátu YYMMDDHHMM. Časová identifikace souborů odpovídá času UTC.

```
1531820400045;4;21FC413776BD;02E18C0B9F791A
1531820400049;1;21FC403B8C14;5D4402F2C0ED97
1531820400049;1;21FC403CADDf;22E189101E47B8
1531820400049;1;21FC403CADEF;02E199101E47B8
1531820400049;1;21FC404BFA12;5F3C09E5763F69
1531820400049;1;21FC40569D37;A00011BFFA8101000000002164B6
1531820400049;1;21FC40569D47;A00091FFFA8101000000002164B6
1531820400049;1;21FC4060D166;5D400CD8A25054
1531820400049;1;21FC406F4191;A8000036FA810100000000D0AA77
```

Obrázek 19: Formát vstupních dat

Na obrázku 19 je vidět, že každá přijatá zpráva se skládá ze 4 částí:

- Unixová značka v době příchodu zprávy do programu v milisekundách zapsaná v decimálním tvaru
- ID příjemce, který zprávu přijal
- Časová značka GPS modulu v hexadecimálním tvaru
- Obsah zprávy v hexadecimálním tvaru

#### 4.4. Popis pomocných funkcí

Pro správné fungování programu byly použity pomocné funkce popsané níže.

Funkce **crc\_division4.m** je určena pro výpočet CRC kontrolního součtu z posledních 24 bitů mód S zprávy.

Funkce **hex2bin.m** je určena pro převod zprávy z hexadecimálního formátu na binární. Pomocí převodu je pak možnost určit typ zprávy nebo ICAO adresu letadla.

Funkce **bin2hex.m** je určena pro převod zprávy z binární soustavy do soustavy hexadecimální. Funkce se používá pro převod ICAO adresy letadla.

## 4.5. Sledovaná oblast

Na obrázku č. 20 je znázorněna oblast vybraná pro sledování. Hlavním důvodem pro zvolení daného prostoru je jeho pokrytí několika přijímači. To umožňuje příjem zpráv od letadla víc než jednou přijímací stanicí a získání co nejkompletnějšího souboru zpráv od letadla po sjednocení dat z více přijímačů.



Obrázek 20: Oblast sledování

## 4.6. Zpracování vstupních dat

Vstupní soubory dat obsahují zprávy od všech letadel v dosahu. Pro analýzu je nutné vyfiltrovat pouze vhodné zprávy. Daná bakalářská práce je zaměřena na analýzu odpovědí formátů DF4, DF5, DF17, DF20, DF21. Formáty DF4, DF5, DF20, DF21 souvisejí s komunikací SSR módu S. Zprávy formátu DF17 jsou ADS-B zprávy.

Mnou vytvořený program zjišťuje počet odpovědí vybraných formátů, které přijal jeden ze čtyř přijímačů od konkrétních letadel. Pro zachycení co největšího počtu zpráv by mělo sledované letadlo být po celou dobu sledování v dosahu vybraného přijímače. Vstupní data pro daný program tvoří zprávy z minutového úseku. Tak krátký časový úsek byl zvolen z důvodu větší pravděpodobnosti, že se během sledování letadlo nedostane mimo sledovanou oblast. Další výhodou je lepší přehled o počtu chybějících zpráv formátu DF17 technologií 1090ES.

Před spuštěním programu je nutné ze sledovaného souboru dat vybrat letadla, která budou zahrnutá do statistiky. Následně je potřeba uložit tento soubor do složky s názvem Archiv

v požadovaném formátu a do řádku 63, 95, 105, 131 programu napsat adresu sledovaného letadla.

#### 4.7. Výstupní proměnné vytvořeného softwaru

Výsledkem programu po spuštění je několik výstupných proměnných, které jsou důležité pro další zpracování. Jednotlivé proměnné a jejich význam jsou popsány níže.

Proměnná **sum4** obsahuje počet zpráv formátu DF4 přijatých vybraným příjemcem od konkrétního letadla.

Proměnná **sum5** obsahuje počet zpráv formátu DF5 přijatých vybraným příjemcem od konkrétního letadla.

Proměnná **sum17** obsahuje počet zpráv formátu DF17 s type kódem TC=1-4, TC=9-18, TC=19 přijatých vybraným příjemcem od konkrétního letadla.

Proměnná **sum20** obsahuje počet zpráv formátu DF20 přijatých vybraným příjemcem od konkrétního letadla.

Proměnná **sum21** obsahuje počet zpráv formátu DF21 přijatých vybraným příjemcem od konkrétního letadla.

## 5. Teoretický popis metody kalibrace množství zaznamenaných zpráv založený na znalosti množství emitovaných zpráv technologií 1090 ES pro konkrétní letadlo

### 5.1. Technologie 1090ES

Technologie 1090ES (1090 MHz Extended Squitter) je založena na vybavení letadla odpovídačem módu S. Každý odpovídač módu S je vybaven technologií AS. Formát zpráv ES byl navržen pro systém ADS-B. Pomocí ES zpráv může být letadlem vysláno více druhů informací. Například zprávy o identifikační značce letounu, informace o jeho poloze, rychlosti, výšce a ostatní informace. [14]

Systém ADS-B vysílá zprávy DF17 všesměrově všem uživatelům v dosahu. Tyto zprávy mají délku 112 bitů a vysílají se v určitých intervalech v závislosti na typu informací ve zprávě. Typ informace se určuje pomocí Type Code (TC), který je zakódován ve zprávě. Daná bakalářská práce je zaměřená na sledování počtu zpráv DF17 s TC=1-4, TC=9-19, protože dané zprávy mají jasné časově neměnné schéma vysílání. [14] Přehled TC a intervaly vysílání jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9: Přehled TC a intervalů vysílání [14]

Typ zprávy	Type Code	Interval	Zpráv za minutu
Informace o identifikaci	1-4	náhodně v intervalu 4,8 s – 5,2 s	12
Poloha letadla ve vzduchu	9-18	náhodně v intervalu 0,4 s – 0,6 s	120
Informace o rychlosti	19	náhodně v intervalu 0,4 s – 0,6 s	120
Celkem zpráv za minutu		252	

### 5.2. Metoda kalibrace

Nárůst hustoty leteckého provozu vede ke zvýšení zatížení přijímačů a následnému zvýšení počtu zpráv zatížených garblingem viz 3.2.

Metoda kalibrace je založena na znalosti množství emitovaných zpráv technologií 1090 ES. Pro každý sledovaný formát zprávy musí být naměřeny dvě hodnoty. První hodnotou je počet zpráv

naměřených jedním přijímačem od konkrétních letadel. Druhou hodnotou je počet rekonstruovaných zpráv po sjednocení dat ze všech přijímačů v systému.

### 5.3. Postup pro použití metody kalibrace

Pro použití navržené metody kalibrace je potřeba se řídit postupem popsáním v dané kapitole.

Postup:

1. Výpočet pravděpodobnosti ztráty zpráv formátu DF17 na jednom přijímači a pravděpodobnost vzniku jevu opačného.
2. Výpočet pravděpodobnosti ztráty zpráv formátu DF17 zároveň na čtyřech přijímacích a pravděpodobnost vzniku jevu opačného.
3. Předpoklad pro aplikaci navržené metody na ostatní formáty zpráv.
4. Výpočet předpokládaného počtu zpráv formátů DF20, DF21, DF4, DF5 vysílaných odpovídačem letadla na základě znalosti počtu zpráv přijatých jedním přijímačem.
5. Výpočet předpokládaného počtu zpráv formátů DF20, DF21, DF4, DF5 vysílaných odpovídačem letadla na základě znalosti počtu zpráv po fúzování ze čtyř přijímačů.
6. Sledování závislosti mezi ztrátami zpráv různých formátů pomocí korelační analýzy.
7. Testování statistické významnosti vypočtených korelačních koeficientů.

### 5.4. Teoretický popis postupu

Pojem pravděpodobnosti je v dané bakalářské práci důležitý pro analýzu, a proto je potřeba jej přesně definovat. Klasická definice pravděpodobnosti, která udává šanci, že daný jev nastane, je určena vztahem 1:

$$P(A) = \frac{m}{n} \quad (1)$$

kde  $m$  je počet výsledků příznivých jevů,  $n$  je počet všech výsledků náhodného pokusu. [20]

Pravděpodobnost, že dojde k jevu opačnému, se určuje pomocí vztahu 2:

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A) \quad (2)$$



Na základě znalosti množství zpráv DF17 vysílaných odpovídačem letadla za jednu minutu a počtu zpráv, které ve skutečnosti přijal přijímač, lze zjistit pravděpodobnost  $p$  zachycení zprávy přijímačem. Pravděpodobnost ztráty zprávy na daném přijímači je pak  $(1-p)$ .

Při měření dat pomocí čtyř nezávislých přijímačů je pravděpodobnost, že zpráva nepřijde na žádný ze čtyř přijímačů vyjádřena jako  $(1-p)^4$ . Tedy pravděpodobnost, že zpráva přijde alespoň na jeden přijímač, je  $(1-(1-p)^4)$ . S ohledem na skutečnost, že měření přijímači nejsou nezávislá a není možné zajistit, že během letu letadlo bude sledováno konkrétním počtem přijímačů, je pravděpodobnost zachycení zprávy alespoň jedním ze čtyř přijímačů vyjádřena jako  $q$ . Pravděpodobnost  $q$  lze spočítat podílem počtu rekonstruovaných zpráv DF17 po fúzování dat ze čtyř přijímačů a známým množstvím zpráv formátu DF17. Opačný jev, při kterém se zpráva ztratí, nastane s pravděpodobností  $(1-q)$ .

Předpokladem pro metodu kalibrace je, že při příjmu odpovědi přijímačem dojde ke ztrátě stejného procenta zpráv u všech sledovaných formátů. V dané bakalářské práci sledujeme závislost mezi zprávami různých délek. Lze předpokládat, že pravděpodobnost ztráty u zpráv krátkých formátů (DF4, DF5) je menší než pravděpodobnost ztráty u dlouhých zpráv (DF17, DF20, DF21). Daný předpoklad se bude ověřovat pomocí korelační analýzy, která zkoumá závislost mezi ztrátami u různých sledovaných formátů zpráv.

Pro výpočet předpokládaného počtu zpráv formátů DF20, DF21, DF4, DF5 vysílaných odpovídačem letadla na základě znalosti počtu zpráv přijatých jedním přijímačem platí vztah 3:

$$N = \frac{K}{p} \quad (3)$$

kde  $K$  je naměřený počet zpráv od jednoho letadla jedním přijímačem,  $p$  je pravděpodobnost přijetí zprávy přijímačem,  $N$  je předpokládaný počet vyslaných zpráv.

Pro výpočet předpokládaného počtu zpráv formátů DF20, DF21, DF4, DF5 vysílaných odpovídačem letadla na základě znalosti počtu rekonstruovaných zpráv po fúzování ze čtyř přijímačů platí vztah 4:

$$D = \frac{T}{q} \quad (4)$$

kde  $T$  je počet zpráv po fúzování ze čtyř přijímačů,  $q$  je pravděpodobnost přijetí zprávy aspoň jedním ze čtyř přijímačů,  $D$  je předpokládaný počet zpráv.

Pro danou bakalářskou práci je důležité sledování závislosti mezi ztrátami zpráv různých formátů. Pro zjištění existence souvislosti mezi sledovanými veličinami se používá korelační analýza. Předpokladem je, že jsou náhodné výběry z dvourozměrného normálního rozdělení  $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)$ . Na základě těchto náhodných výběrů lze získat odhad korelačního koeficientu  $\rho$  pomocí výběrového korelačního koeficientu  $r$ , který vypočítáme pomocí vztahu 5:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

kde  $\bar{x}$  a  $\bar{y}$  jsou výběrové průměry. [20]

Korelační koeficient může nabývat hodnot v intervalu od  $-1$  do  $1$  a vyjadřuje těsnost lineární závislosti mezi dvěma náhodnými veličinami. Záporné hodnoty korelačního koeficientu popisují negativní závislost. Kladné hodnoty pak ukazují na závislost pozitivní. Čím víc se  $r$  blíží  $1$  ( $-1$ ), tím silnější je vazba mezi sledovanými veličinami. V případě neexistence lineárního vztahu  $r = 0$ . Hodnota korelačního koeficientu v rozmezí  $0,2$  až  $0,4$  ( $-0,2$  až  $-0,4$ ) popisuje slabý vztah mezi veličinami, pro hodnoty  $0,4$  až  $0,7$  ( $-0,4$  až  $-0,7$ ) se vztah stává těsným a hodnota korelačního koeficientu nad  $0,7$  ( $-0,7$ ) popisuje existence těsného vztahu. [20]

I když korelační koeficient ukazuje na těsnost korelace mezi dvěma náhodnými veličinami je potřeba to ověřit pomocí testu významnosti korelačního koeficientu. Nulová hypotéza  $H_0: \rho = 0$  o nezávislosti je testována proti alternativní hypotéze  $H_1: \rho \neq 0$ , kde  $\rho$  je odhad parametru základního souboru. Testové kritérium lze získat pomocí vztahu 6:

$$t = \frac{r_{xy}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} \sqrt{n-2} \quad (6)$$

Použité rozdělení je Studentovo rozdělení s  $n-2$  stupni volnosti. Vypočtené testovací kritérium  $t$  porovnáme s hodnotou  $t_{1-\alpha/2}(n-2)$ , kterou zjistíme z tabulky 10, kde  $\alpha$  je zvolená hladina významnosti. Pokud  $t > t_{1-\alpha/2}(n-2)$ , tak nulovou hypotézu  $H_0$  zamítáme, což znamená, že existuje lineární závislost mezi sledovanými proměnnými. Pokud  $t < t_{1-\alpha/2}(n-2)$  nulovou hypotézu  $H_0$  nezamítáme. [20]

**Tabulka 10: Kvantily Studentova rozdělení t [21]**

St. volnosti n	0,80	0,90	0,95	0,975	0,9875	0,995
1	1,376	3,078	6,314	12,706	25,452	63,657
2	1,061	1,886	2,920	4,303	6,205	9,925
3	0,978	1,638	2,353	3,182	4,176	5,841
4	,941	1,533	2,132	2,776	3,495	4,604
5	,920	1,476	2,015	2,571	3,163	4,032
6	,906	1,440	1,943	2,447	2,969	3,707
7	,896	1,415	1,895	2,365	2,841	3,499
8	,889	1,397	1,860	2,306	2,752	3,355
9	,883	1,383	1,833	2,262	2,685	3,250
10	,879	1,372	1,812	2,228	2,634	3,169
11	,876	1,363	1,796	2,201	2,593	3,106
12	,873	1,356	1,782	2,179	2,560	3,055
13	,870	1,350	1,771	2,160	2,533	3,012
14	,868	1,345	1,761	2,145	2,510	2,977
15	,866	1,341	1,753	2,131	2,490	2,947
16	,865	1,337	1,746	2,120	2,473	2,921
17	,863	1,333	1,740	2,110	2,458	2,898
18	,862	1,330	1,734	2,101	2,445	2,878
19	,861	1,328	1,729	2,093	2,433	2,861
20	,860	1,325	1,725	2,086	2,423	2,845
21	,859	1,323	1,721	2,080	2,414	2,831
22	,858	1,321	1,717	2,074	2,406	2,819
23	,858	1,319	1,714	2,069	2,398	2,807
24	,857	1,318	1,711	2,064	2,391	2,797
25	,856	1,316	1,708	2,060	2,385	2,787
26	,856	1,315	1,706	2,056	2,379	2,779
27	,855	1,314	1,703	2,052	2,373	2,771
28	,855	1,313	1,701	2,048	2,368	2,763
29	,854	1,311	1,699	2,045	2,364	2,756
30	,854	1,310	1,697	2,042	2,360	2,750
35	,852	1,306	1,690	2,030	2,342	2,724
40	,851	1,303	1,684	2,021	2,329	2,704
45	,850	1,301	1,680	2,014	2,319	2,690
50	,849	1,299	1,676	2,008	2,310	2,678
55	,849	1,297	1,673	2,004	2,304	2,669
60	,848	1,296	1,671	2,000	2,299	2,660
70	,847	1,294	1,667	1,994	2,290	2,648
80	,847	1,293	1,665	1,989	2,284	2,638
90	,846	1,291	1,662	1,986	2,279	2,631
100	,846	1,290	1,661	1,982	2,276	2,625
120	,845	1,289	1,658	1,980	2,270	2,617
∞	,8416	1,2816	1,6448	1,9600	2,2414	2,5758

## **6. Ověření navržené metody kalibrace s využitím fúzování reálných záznamů z více přijímačů**

### **6.1. Popis programu**

Použitý program pro fúzování dat byl vytvořen panem Vojtěchem Vítem (viz elektronická příloha). Daný program slouží pro rekonstrukci počtu zpráv formátu DF4, DF5, DF17, DF20 a DF21 vysílaných odpovídači letadel. Daný software analyzuje soubory dat, které obsahují zprávy přijaté pomocí čtyř přijímačů. Rekonstrukce počtu zpráv je založena na sloučení přijatých zpráv od všech přijímačů a následném odstranění odražených a duplicitních zpráv. Za odraženou zprávu se považuje odpověď odražená od překážek v okolí přijímače, která z tohoto důvodu byla přijata jedním přijímačem několikrát. Za duplicitní zprávu se považuje zpráva, která byla přijata několika přijímači. Do výsledného souboru dat by měla být započítána pouze jedna z těchto zpráv.

### **6.2. Porovnání ztráty zpráv při měření různým počtem přijímačů**

V závislosti na prolétávané oblasti letadlo může být v dosahu jednoho nebo několika přijímačů. Při sledování letadla systémem z více přijímačů je pravděpodobnost ztráty zpráv menší. Dané tvrzení lze potvrdit porovnáním ztrát na jednom a na čtyř přijímačích.

V dané bakalářské práci byly analyzovány počty odpovědí od víc než 100 letadel (viz elektronická příloha). Průměrná ztráta na jednom přijímači byla 39%. Hodnota ztráty zpráv po fúzování dat ze čtyř přijímačů byla 22%. Fúzování dat umožňuje zachytit větší počet odpovědí, ale není možné výsledek fúzování považovat jako kompletní.

Úspěšnost rekonstrukce je ovlivněna různými faktory. Jedním z nich je výskyt chyby při příjmu zprávy. Situace, že ke vzniku chyby dojde zároveň na několika přijímačích, může nastat při vysoké hustotě provozu, kdy přijímače jsou zatíženy velkým počtem zpráv. Dalším faktorem je dosah jednotlivých přijímačů. Čím víc přijímačů sleduje letadlo, tím kompletnější soubor dat lze dostat po fúzování.

### **6.3. Aplikace metody kalibrace na datech naměřených jedním přijímačem**

Pro zjištění počtu zpráv přijatých přijímačem od sledovaných letadel byl použit program, který je podrobněji popsán v kapitole 4.

Na základě znalostí, že za ideálního stavu za jednu minutu letadlo vysílá 252 zprávy formátu DF17 lze provést kontrolu množství přijatých zpráv. V tabulce 11 je uveden počet přijatých zpráv DF17 od tří náhodně vybraných letadel použitých pro analýzu, čas měření, známý počet zpráv DF17 za jednu minutu a procento ztracených zpráv na jednom přijímači.

**Tabulka 11: Data naměřená jedním přijímačem**

Letadlo	Změřené DF17	1090ES	Čas měření (UTC)	Ztráta
495224	237	252	17:20	6 %
49D093	216	252	15:24	14 %
4BA869	85	252	09:40	66 %

Jak je vidět z tabulky 11, procento ztráty se u jednotlivých letů liší. Úspěšnost přijetí zpráv při sledování jedním přijímačem je závislá na jeho dosahu. Přijímací schopnosti přijímače nejsou stejné ve všech částech sledované oblasti, a proto mohlo dojít k tomu, že letadlo během sledování prolétávalo nad oblastí, kde je příjem zpráv daným přijímačem omezen. Dalším faktorem, ovlivňujícím úspěšnost příjmu je hustota provozu. S rostoucí hustotou provozu roste počet zpráv zatížených garblingem.



**Obrázek 21: Trasy letů vybraných letadel**

Na obrázku 21 jsou znázorněny trasy tří vybraných letů. Let 4BA869 byl sledován v čase s vysokou hustotou provozu a prolétával oblastí nejméně vzdálenou od přijímače, proto je procento ztracených zpráv vysoké.

Předpokládaný počet zpráv formátu DF4, DF5, DF20, DF21 vysílaných letadlem byl spočítán na základě znalosti pravděpodobnosti zachycení zprávy daným přijímačem. Pro výpočet byl použit vztah 3. Příklad použití metody kalibrace pro tři letadla je uveden v tabulce 12.

**Tabulka 12: Porovnání počtu naměřených zpráv formátů DF4, DF5, DF20, DF21 a kalibrovaných počtu zpráv podle DF17**

Letadlo	DF20		DF21		DF4		DF5	
	Změřené	Opravené	Změřené	Opravené	Změřené	Opravené	Změřené	Opravené
495224	56	60	50	53	16	17	34	36
49D093	53	62	53	62	25	29	34	40
4BA869	46	136	29	86	40	119	6	18

#### 6.4. Aplikace metody kalibrace na datech naměřených fúzováním ze čtyř přijímačů

Pro zjištění počtu zpráv po fúzování ze čtyř přijímačů byl použit program, který je podrobněji popsán v kapitole 6.1.

Na základě znalostí, že za ideálního stavu za jednu minutu letadlo vysílá 252 zpráv formátu DF17 lze provést kontrolu množství přijatých zpráv.

V tabulce 13 je uveden počet přijatých zpráv DF17 po fúzování ze čtyř přijímačů od tří náhodně vybraných letadel použitých pro analýzu, známý počet zpráv DF17 za jednu minutu a procento zpráv, které nebyly zachyceny žádným ze čtyř přijímačů.

**Tabulka 13: Data naměřená fúzováním ze čtyř přijímačů**

Letadlo	Změřené DF17	1090ES	Ztráta
495224	249	252	1 %
49D093	242	252	4 %
4BA869	96	252	62 %

Z tabulky 13 lze vidět, že hodnota ztráty při sledování systémem ze čtyř přijímačů je menší. Úspěšnost přijetí zpráv závisí na počtu přijímačů sledujících letadlo během letu. Přijímací schopnosti přijímačů nejsou stejné ve všech částech sledované oblasti, a proto sledování systémem z několika přijímačů neznámá, že zprávy vysílané odpovídačem letadla dostanou

všechny přijímače. Stejně jako při sledování jedním přijímačem, úspěšnost při daném sledování je závislá na hustotě provozu. Překrytí dvou a více odpovědí může nastat zároveň na několika přijímačích.

Předpokládaný počet zpráv formátu DF4, DF5, DF20, DF21 vysílaných letadlem byl spočítán na základě znalosti pravděpodobnosti zachycení zprávy systémem ze čtyř přijímačů. Pro výpočet byl použit vztah 4. Příklad použití metody kalibrace pro tři letadla je uveden v tabulce 14.

**Tabulka 14: Porovnání počtu zpráv formátů DF4, DF5, DF20, DF21 po fúzování a kalibrovaných počtu zpráv podle DF17**

Letadlo	DF20		DF21		DF4		DF5	
	Změřené	Opravené	Změřené	Opravené	Změřené	Opravené	Změřené	Opravené
495224	56	60	50	59	16	18	34	36
49D093	53	64	53	68	25	32	34	46
4BA869	46	139	29	87	40	116	6	18

## 6.5. Sledování závislosti mezi ztrátami zpráv různých formátů pomocí korelační analýzy

Korelační analýza byla používána pro zjištění existence závislosti mezi procenty ztrát u různých formátů zpráv. Před provedením analýzy pro každý formát zpráv DF4, DF5, DF20, DF21 a konkrétní letadlo byl spočítán rozdíl mezi opraveným množstvím zpráv na základě znalosti počtu zpráv přijatých jedním přijímačem a opraveným množstvím zpráv na základě znalosti počtu zpráv po fúzování ze čtyř ADS-B přijímačů. Pro zjištění, zda jsou ztráty zpráv sledovaných formátů závislé na délce jednotlivých typů zpráv, byla sledována závislost mezi rozdíly pro každou dvojici formátů. Korelační koeficienty byly vypočítány prostřednictvím vztahu 5 a jsou uvedeny v tabulce 15.

**Tabulka 15: Vypočtené korelační koeficienty**

Formáty zpráv	DF20/DF21	DF20/DF4	DF20/DF5	DF4/DF5	DF4/DF21	DF5/DF21
Korelační koeficient	0,687	0,374	0,370	0,321	0,271	0,341

Z tabulky 15 je vidět, že vztah mezi formáty DF20 a DF21 je silný. Ostatní dvojice formátů jsou charakterizovány nízkou hodnotou korelačního koeficientu. Daný výsledek lze vysvětlit rozdílem v délce jednotlivých typů zpráv. Zprávy DF4, DF5 jsou krátké formáty zpráv a skládají se

z 56 bitů. Zprávy formátů DF20, DF21 jsou dlouhé a jejich délka je stejná jako u zpráv formátu DF17, a proto na základě vysoké hodnoty korelačního koeficientu lze předpokládat, že ztráta zpráv formátů DF20, DF21 je přibližně stejná jako ztráta zpráv formátu DF17. Korelace mezi krátkým a dlouhým formátem zpráv je charakterizována nízkou hodnotou korelačního koeficientu, protože ztráty zpráv daných formátů jsou různé. Pro příjem dlouhého formátu zprávy přijímač potřebuje více času, a proto k překrytí odpovědi (garbling) a následné ztrátě dojde častěji. Naměřené počty zpráv formátů DF4 a DF5 jsou opraveny o procento ztráty dlouhého formátu zpráv DF17, ale ve skutečnosti je procento ztráty zpráv daných formátů nižší, a proto je vztah mezi DF4 a DF5 slabý.

## 6.6. Testování statistické významnosti vypočtených korelačních koeficientů

Vypočtené korelační koeficienty je nutné otestovat nulovou hypotézou  $H_0: \rho = 0$  proti alternativní hypotéze  $H_1: \rho \neq 0$ . Zvolenou hladinou významnosti je 5 %. Počet statických jednotek pro sledování  $n=113$  (viz elektronická příloha). Pro každý vypočtený korelační koeficient (viz tabulka 15) je nutné spočítat testové kritérium  $t$  (viz tabulka 16).

**Tabulka 16: Testová kritéria pro vypočtené korelační koeficienty**

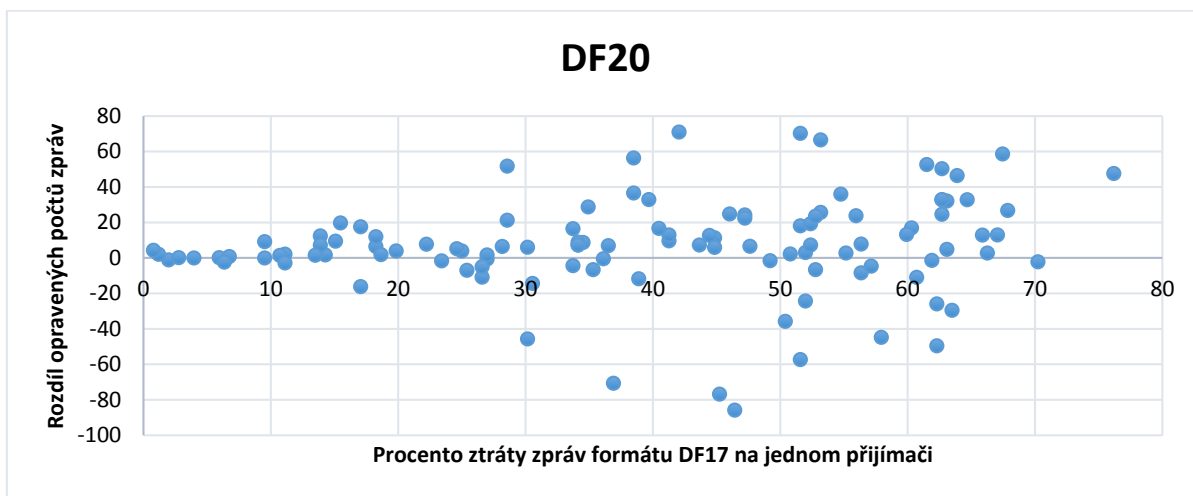
Formáty zpráv	DF20/DF21	DF20/DF4	DF20/DF5	DF4/DF5	DF4/DF21	DF5/DF21
Testové kritérium	9,952	4,252	4,192	3,576	2,960	3,818

Kritická hodnota  $t_{1-\alpha/2}(n - 2)$  Studenova  $t$ -rozdělení zjištěná z tabulky 10 je 1,980. Danou hodnotu je potřeba porovnat s hodnotami kritéria  $t$  z tabulky 16. Vypočítané hodnoty  $t$  jsou větší, než  $t_{1-\alpha/2}(n - 2)$ , a proto nulovou hypotézu  $H_0$  lze zamítnout. Dané statické testování potvrzuje, že ztráty zpráv formátu DF4, DF5, DF17, DF20, DF21 jsou závislé a vzájemně se ovlivňují.

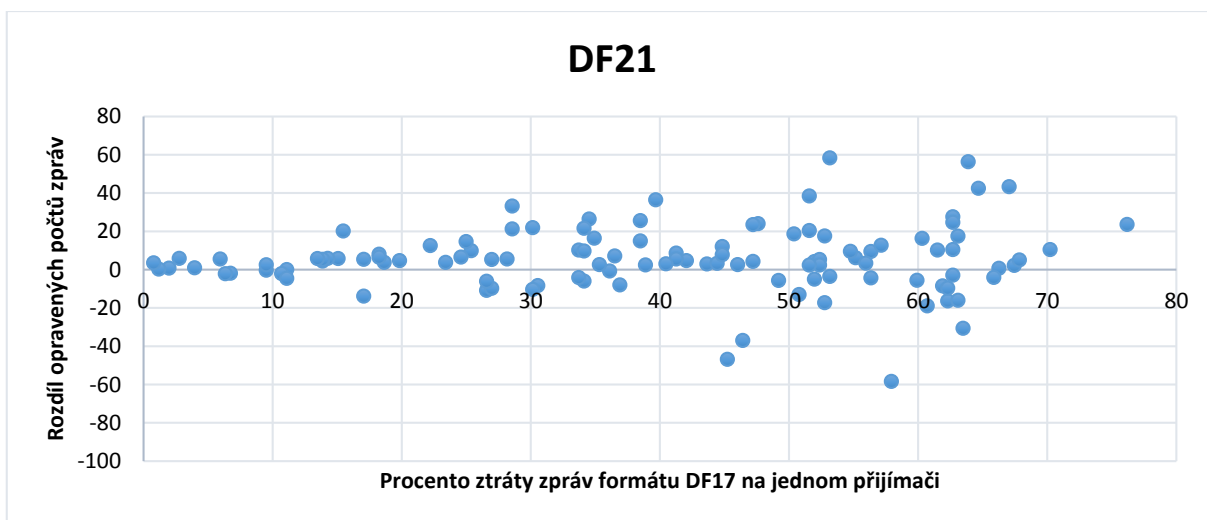


## 7. Hodnocení úspěšnosti metody kalibrace

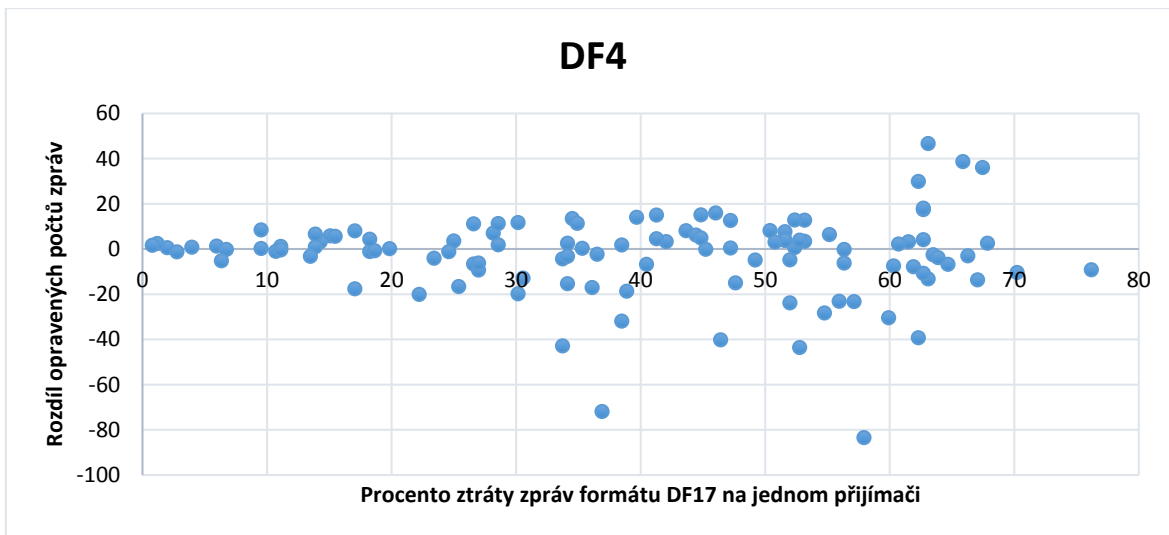
Pro hodnocení úspěšnosti navržené metody byla sledována závislost mezi procentem ztráty zpráv formátu DF17 na jednom přijímači a rozdílem počtu zpráv mezi předpokládaným množstvím zpráv na základě znalosti počtu zpráv přijatých jedním přijímačem a předpokládaným množstvím zpráv na základě znalosti počtu zpráv po sloučení dat ze čtyř přijímačů. Popsaná závislost pro každý formát zpráv je znázorněna pomocí bodových grafů na obrázcích 22, 23, 24, 25.



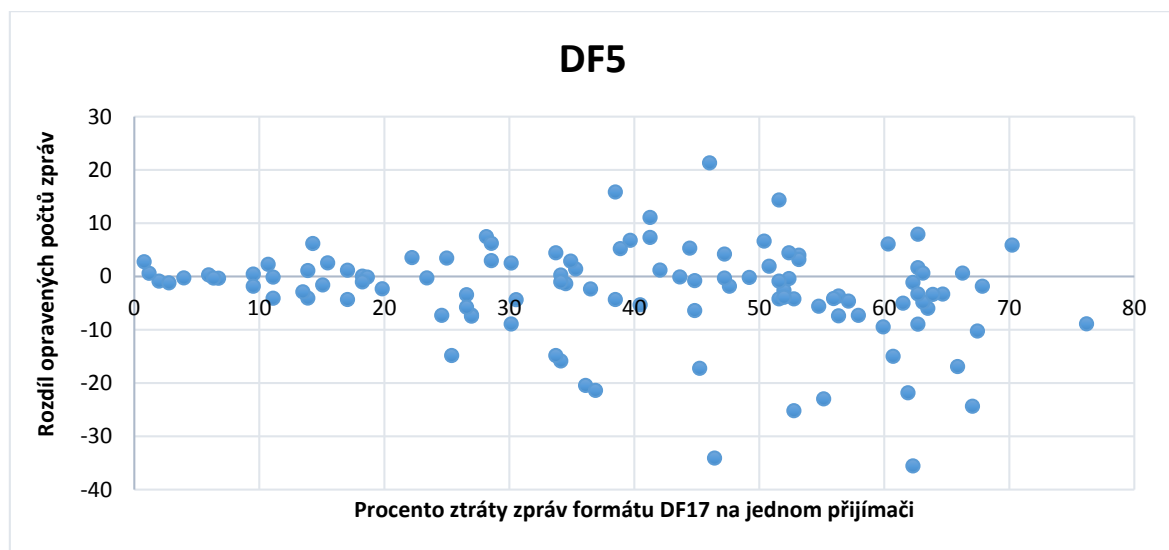
Obrázek 22: Hodnocení úspěšnosti metody kalibrace pro zprávy formátu DF20



Obrázek 23: Hodnocení úspěšnosti metody kalibrace pro zprávy formátu DF21



Obrázek 24: Hodnocení úspěšnosti metody kalibrace pro zprávy formátu DF4



Obrázek 25: Hodnocení úspěšnosti metody kalibrace pro zprávy formátu DF5

Z bodových grafů je vidět, že čím je větší ztráta na jednom příjemci, tím jsou větší rozdíly dvou opravených počtů zpráv. Rozptýlenost hodnot při vysokých procentech ztráty je velká, a proto nelze považovat předpokládané počty zpráv za správný odhad. Pokud rozdíl dvou opravených počtů nepřesáhne hodnotu  $\pm 20$  zpav lze považovat, že metoda kalibrace je vhodná pro odhad počtu zpráv vysílaných letadlem. Pomocí bodových grafů na obrázcích 22, 23, 24, 25 pro každý formát zpráv lze určit procento ztráty při kterém tento rozdíl přesáhne stanovenou mez viz tabulka 17.

**Tabulka 17: Procento ztráty pro každý sledovaný formát zpráv při kterém rozdíl opravených počtů přesáhne +/- 20 zpráv**

Formát	DF20	DF21	DF4	DF5
Procento ztráty formátu DF17 na jednom přijímači při kterém rozdíl opravených počtů přesáhne +/- 20 zpráv	29 %	29 %	34 %	37 %

Určené hodnoty ukazují, že navržená metoda kalibrace je vhodná pro odhad počtů zpráv sledovaných formátů, pokud ztráta zpráv formátu DF17 na přijímači je menší než 29 %.

## 8. Prezentace výsledků pro konkrétní vybraná letadla

Daná kapitola je věnovaná prezentaci dosažených výsledků pro konkrétní letadla. Ze souboru sledovaných letadel bylo vybráno 11 letadel, které po sloučení dat ze čtyř přijímačů mají kompletní počet zpráv formátu DF17. Kompletní soubor je definován přijetím přijímačem 252 zpráv formátu DF17 za jednu minutu.

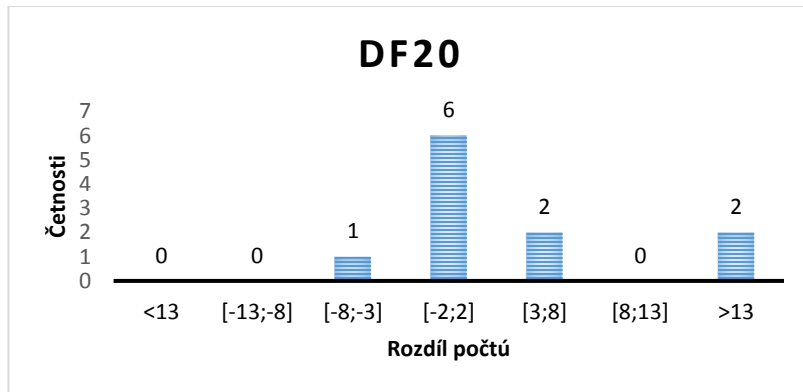
Při analýze 11 vybraných letadel bylo zjištěno, že 7 z nich bylo sledováno přijímači v časech s nízkou hustotou provozu. To potvrzuje fakt, že množství ztracených zpráv závisí na hustotě provozu. Nejslabší letecký provoz je v noci, kdy je nízký počet pohybů letadel. Naopak provoz během denních hodin a ráno je charakterizován vysokou hustotou provozu a zatížením přijímačů velkým počtem odpovědí.

Pro daná letadla a všechny formáty zpráv byla zjištěna ztráta při příjmu jedním přijímačem. Tato ztráta je pak použita v metodě kalibrace. Analýza je založena na porovnání počtu odpovědí přijatých jedním přijímačem po využití metody kalibrace a množství zpráv po sjednocení ze čtyř ADS-B přijímačů. Dané počty pro formáty zpráv DF20, DF21, DF4, DF5 jsou uvedeny v tabulce 18.

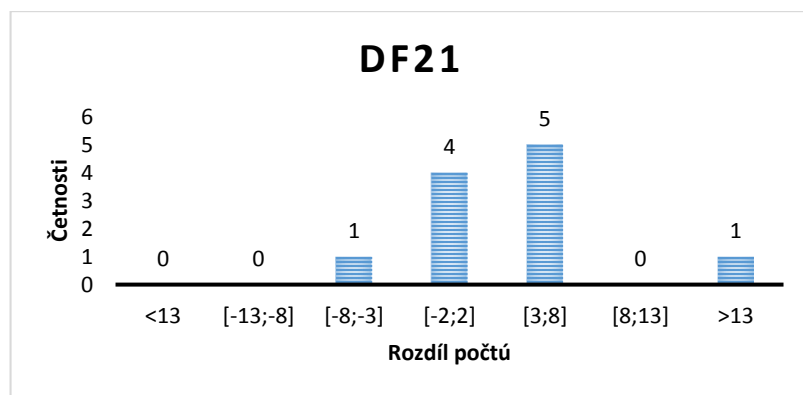
**Tabulka 18: Počty zpráv od vybraných letadel**

Letadlo	V prvním sloupci je počet vyslaných zpráv po příjmu a kalibraci z jednoho přijímače. V druhém sloupci je počet zpráv po fúzování ze 4 přijímačů.							
	DF20		DF21		DF4		DF5	
AB6FBF	53	53	66	66	30	30	17	17
49D056	71	68	69	64	50	49	42	46
4243E2	58	57	62	63	22	23	45	46
49D1A8	59	59	66	65	75	58	39	59
780D22	84	86	64	64	55	57	36	35
49D327	175	175	113	119	84	83	43	44
76CDA8	292	309	168	171	148	141	40	45
461F97	90	94	64	67	51	55	36	33
4CAA5E	130	151	96	116	106	112	38	35
49D093	97	102	92	98	86	85	55	62
49D1A8	108	109	98	104	76	73	41	44

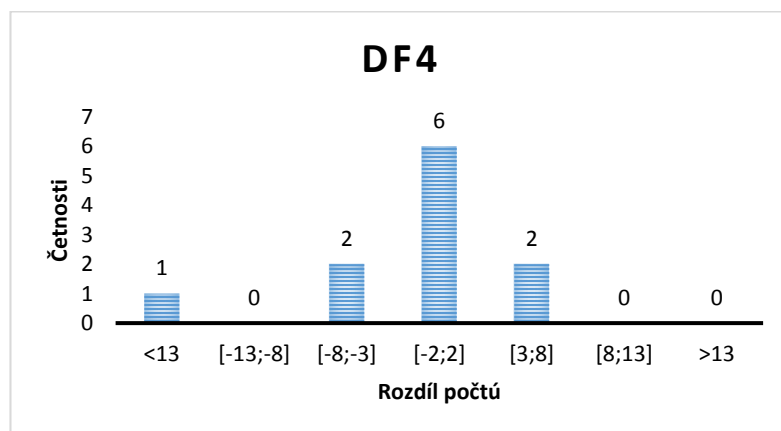
Jak je vidět z tabulky 18, počet zpráv po využití metody kalibrace je přibližně stejný jako počet zpráv po fúzování ze čtyř přijímačů. Pro každý formát zpráv byl vytvořen intervalový histogram četnosti rozdílů mezi dvěma danými počty (viz obrázky 26, 27, 28, 29). Každý interval poskytuje informaci o množství letadel.



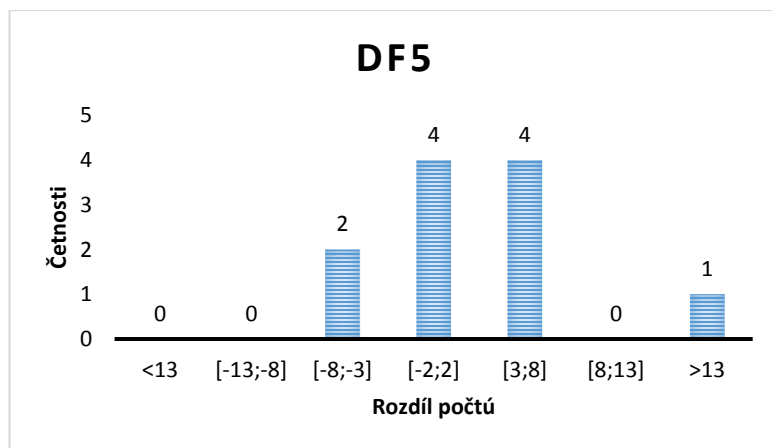
Obrázek 26: Intervalový histogram četnosti pro zprávy formátu DF20



Obrázek 27: Intervalový histogram četnosti pro zprávy formátu DF21



Obrázek 28: Intervalový histogram četnosti pro zprávy formátu DF4



**Obrázek 29: Intervalový histogram četnosti pro zprávy formátu DF5**

Z intervalových histogramů na obrázcích 26, 27, 28, 29 je vidět, že nejčastěji se vyskytující rozdíl mezi dvěma počty je v intervalu [-2;2]. Daný výsledek potvrzuje, že u sledovaných formátů se ztrácí přibližně stejné procento zpráv a využitím metody kalibrace lze odhadnout počet zpráv vysílaných letadlem.

## 9 Závěr

Obsahem první kapitoly je popis sekundární radiolokace a systému ADS-B. V této kapitole jsou podrobně popsány struktury dotazů a odpovědi civilních módů A, C, S, formáty sestupného spoje módu S a zprávy formátu DF17. V závěru této kapitoly se popisuje technologie ADS-B a její výhody.

Třetí kapitola se věnuje principům nekompletnosti množství zaznamenaných zpráv na výstupu ADS-B přijímačů. Rozlišujeme několik významných problémů, které mohou nastat při příjmu zpráv přijímačem. Podrobně se popisují příčiny vzniku synchronního (garbling) a nesynchronního (FRUIT) rušení.

Čtvrtá kapitola popisuje program vytvořený pro analýzu v této bakalářské práci. Daný software má název „Zpravy\_jeden\_prijimac.m“ a zjišťuje množství zpráv vybraných formátů, které přijal jeden z více přijímačů od konkrétních letadel. Data použita pro analýzu se sbírají pomocí čtyř přijímačů Fakulty Dopravní, které jsou rozmístěné na území Prahy. Pro sledování byla vybrána oblast, která je v dosahu těchto přijímačů. Dále jsou popsány funkce použité pro správné fungování programu a výstupní proměnné pro další analýzu.

Pátá kapitola popisuje teoretický popis metody kalibrace množství zaznamenaných zpráv založený na znalosti množství emitovaných zpráv technologií 1090 ES. Technologie 1090ES je založena na vysílání letadlem známého počtu zpráv formátu DF17. Dané zprávy se vysílají v určitých intervalech všesměrově všem uživatelům v dosahu. Další část kapitoly je věnována popisu postupů pro použití navržené metody. Předpokládané počty zpráv formátu DF20, DF21, DF4, DF5 byly spočítány pro každé letadlo na základě znalosti pravděpodobnosti zachycení zpráv formátu DF17 jedním přijímačem a systémem z více přijímačů. Závislost mezi ztrátami zpráv různých formátů byla sledována pomocí korelační analýzy a následně ověřena testem o nezávislosti.

Další kapitola se zabývá realizací navrženého postupu pro použití metody kalibrace. Pro příjem zpráv z více přijímačů byl využit program pana Vojtěcha Víta. Daný program používá soubory dat, které obsahují zprávy od čtyř přijímačů a je schopen odstranit odražené a duplicitní zprávy. Výsledkem je pak počet rekonstruovaných zpráv formátu DF17, DF20, DF21, DF4, DF5 vysílaných letadlem. Každé měření je zatíženo chybami, které vedou ke ztrátě zpráv. Na základě znalosti množství emitovaných zpráv technologií 1090ES a počtu zpráv DF17 naměřených pomocí dvou programů byla zjištěná procenta zachycených zpráv při měření jedním přijímačem



a systémem ze čtyř přijímačů. Daná procenta se používají pro výpočet metodou kalibrace předpokládaných počtů zpráv formátu DF20, DF21, DF4, DF5. Předpokladem pro metodu kalibrace je, že u všech sledovaných formátů zpráv se ztrácí stejné procento zpráv jako u formátu DF17. Část kapitoly je věnována aplikaci metody kalibrace na naměřených datech. Pro zjištění existence závislosti mezi ztrátami jednotlivých formátů zpráv byl pro každou dvojici formátů vypočítán korelační koeficient. Z vypočtených hodnot lze usoudit, že těsnost vztahů je závislá na délce sledovaných formátů zpráv. Dlouhé zprávy formátu DF20, DF21 jsou charakterizovány vysokou hodnotou korelačního koeficientu, což znamená, že ztráty u těchto formátů jsou podobné. Vztah mezi ostatními formáty zpráv je slabší, protože pravděpodobnosti ztráty zpráv krátkých a dlouhých formátů jsou různé. Při příjmu dlouhých zpráv pravděpodobnost, že zprávy se překryjí je větší. Výsledky korelační analýzy byly ověřeny testem nezávislosti.

Sedmá kapitola se zabývá hodnocením úspěšnosti metody kalibrace. Pro přehlednost byl pro každý formát zpráv vytvořen bodový graf, který znázorňuje závislost mezi procentem ztráty zpráv formátu DF17 na jednom přijímači a rozdílem počtů zpráv kalibrovaných podle DF17. Výsledkem dané kapitoly je, že pomocí metody kalibrace lze odhadnout přesný počet zpráv vysílaných odpovídáčem letadla, pokud ztráta při příjmu jedním přijímačem je nízká a nepřesahuje 29 %.

Poslední kapitolou práce je prezentace výsledků pro konkrétní vybraná letadla. Cílem této kapitoly bylo potvrdit výsledky sedmé kapitoly. Pro sledování byla vybrána letadla, která po fúzování dat ze čtyř přijímačů měla 252 zpráv formátu DF17. Daný počet zpráv znamená, že po fúzování zpráv ze systému přijímačů žádná zpráva DF17 nebyla ztracena. Při analýze vybraných letadel došlo k potvrzení faktu, že úspěšnost zachycení zpráv závisí na hustotě provozu. Pro přehlednost úspěšnosti navržené metody pro každý formát zpráv byl vytvořen intervalový histogram četností. Z daných histogramů lze usoudit, že metoda kalibrace může být použita pro zpřesnění neúplného záznamu přijatých zpráv.

## **Seznam příloh**

Skript Zpravy\_jeden\_prijimac.m

Skript Decoder\_vX.m

Skript crc\_division4.m

Skript hex2bin.m

Skript bin2hex.m

Statistika.xlsx

## Použité zdroje

- [1] BEZOUŠEK, Pavel a Pavel ŠEDIVÝ. Radarová technika. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03036-9.
- [2] Radartutorial.eu: [online]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/index.en.html>
- [3] HELIA, P.: Využívání kmitočtových pásem VKV, UKV, SKV a EKV v radarech civilního i vojenského využití. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 2015
- [4] KONEČNÝ, F.: Zmapování reálných parametrů kooperativních přehledových systémů. Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Praha, 2016
- [5] KINGSLEY, Simon a Shaun QUEGAN. Understanding radar systems. Mendham, NJ: SciTech Pub., [1999]. ISBN 1891121057.
- [6] PLENINGER, Stanislav. Ads\_v1.8.935: Automatic Dependent Surveillance. 2011. Učební materiál pro studenty předmětu CNS systémy. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta Dopravní.
- [7] MINISTERSTVO DOPRAVY ČR. Předpis L10 - O civilní letecké telekomunikační službě svazek IV – Přehledový radar a protisrážkový systém, svazek IV. [ONLINE]. 2016. [2018-08-17]. Dostupné z: <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
- [8] KOMAR, Viktor. Odpovídač SSR. IVAO [online]. 14 Červenec 2011 [cit. 2018-08-21]. Dostupné z: [http://www.ivao.cz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=125:odpovida&catid=83:zakladni-informace&Itemid=148](http://www.ivao.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=125:odpovida&catid=83:zakladni-informace&Itemid=148)
- [9] HELFRICK, Albert D. Principles of avionics. 5th ed. Leesburg, VA: Avionics Communications, 2009. ISBN 9781885544278.
- [10] VÍT, V.: Monitorování vysílání palubních SSR odpovídačů v reálném prostředí. Diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Praha, 2017
- [11] DRÁPAL, S.: Využití SSR módu S pro řízení pohybů letadel a vozidel po ploše letiště. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 2015.
- [12] ŠÍMA, J.: Mapování přehledové infrastruktury analýzou příjmu SSR odpovědí od letadla. Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Praha, 2016
- [13] JUNZI S. ADS-B Decoding Guide. [ONLINE]. 2015. [cit. 2018-08-17]. Dostupné z: <http://adsb-decode-guide.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- [14] RTCA DO-260B MOPS for 1090 Extended Squitter ADS-B and TIS-B. Washington: RTCA, 2009.

- [15] The Great Debate: Is ADS-B Good Or Bad?. AIR FACTS [online]. April 18, 2013 [cit. 2018-08-21]. Dostupné z: <https://airfactsjournal.com/2013/04/the-great-debate-is-ads-b-good-or-bad/>
- [16] SPITZER, Cary R. Digital avionics handbook: development and implementation. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, c2007. ISBN 0-8493-8441-9.
- [17] Prosto o slozhnom - ADS-B. ADSBRADAR [online]. [cit. 2018-08-21]. Dostupné z: <http://adsbradar.ru/ads-b-simply>
- [18] SUDARSHAN, Hindupur V. Seamless sky. Burlington, VT: Ashgate, c2003. ISBN 07-546-3176-1
- [19] BEASLEY, Barry. Reply garbling. Understanding Mode S technology [online]. October 10, 2012 [cit. 2018-08-21]. Dostupné z: <https://www.embedded.com/print/4398289>
- [20] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KŘÍŽ. Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech. 2., rozšířené vydání. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-5786-5.
- [21] KOŽÍŠEK, Jan. Statistické tabulky a jejich použití. Vyd. 3. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01469-x.