ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Tomáš Noskievič

ADS-B ZPRÁVY JAKO ZDROJ PROVOZNÍCH DAT V LETECTVÍ

Diplomová práce

2019

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
děkan
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K621 ..... **Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Tomáš Noskievič

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **ADS-B zprávy jako zdroj provozích dat v letectví**

Název tématu (anglicky): ADS-B Messages as a Source of Operational Data in Aviation

Zásady pro vypracování

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

- ADS-B zpráva
- Výběr provozních situací nebo případů pro využití ADS-B dat
- Návrh postupu využití ADS-B dat na vybrané provozní situace pro definovaný vzdušný prostor
- Zpracování přijatých ADS-B zpráv
- Vyhodnocení použitelnosti ADS-B zpráv jako zdroje provozních dat

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Předpis L 8168
Předpis L 10
ICAO Doc 9924
Dokument DO-260B

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **28. července 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 diplomové práce: **28. května 2019**
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

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta dopravní L. S.

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

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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Tomáš Noskievič
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 3. prosince 2018

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce doc. Ing. Jakubu Krausovi, Ph.D. za odborné vedení práce a čas věnovaný konzultacím. Dále děkuji Ing. Tereze Topkové a Ing. Tomáši Liptákovi za velice ochotné poskytnutí cenných informací potřebných pro vznik této práce. V neposlední řadě děkuji všem svým přátelům a rodině za podporu během celého studia.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou 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 dodržování etických principů při 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 24. května 2019

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

ADS-B ZPRÁVY JAKO ZDROJ PROVOZNÍCH DAT V LETECTVÍ

diplomová práce

květen 2019

Bc. Tomáš Noskievič

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se věnuje využití ADS-B zpráv jako zdroje provozních informací pro provozovatele leteckých společností nebo letišť. Konkrétně řeší jejich využití při odhalování nestabilizovaných přiblížení, při určování integrity polohové informace a při vytváření záznamů o příletech na letiště a odletech z něj.

Klíčová slova: ADS-B zpráva, nestabilizované přiblížení, kategorie integrity navigace, záznamy o příletech a odletech

ABSTRACT

This thesis looks at the ADS-B messages as the source of the operational information which can be beneficial for the airline or airport operators to obtain. The main topics solved using ADS-B messages are revealing of unstable approaches, determination of the integrity of position data and airport arrivals and departures recording.

Key Words: ADS-B message, unstabilized approach, navigation integrity category, arrivals and departures recording

Obsah

Obsah ..... - 4 -

Seznam použitých zkratek ..... - 7 -

Úvod ..... - 9 -

1 Přehledové systémy ..... - 10 -

1.1 Dělení přehledových systémů ..... - 10 -

1.1.1 Příklady přehledových systémů ..... - 10 -

1.2 Primární radar ..... - 11 -

1.3 Sekundární radar ..... - 11 -

1.3.1 Mód A a mód C ..... - 11 -

1.3.2 Mód S ..... - 12 -

1.4 Automatic Dependent Surveillance (ADS) ..... - 12 -

1.4.1 Automatic Dependent Surveillance – Contract (ADS-C) ..... - 13 -

1.4.2 Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) ..... - 13 -

1.5 ADS-B zpráva ..... - 14 -

1.5.1 Využití ADS-B zpráv ..... - 16 -

2 Vyhodnocení stabilizovaných přiblížení ..... - 18 -

2.1 Spravedlivá kultura ..... - 18 -

2.2 Předpisová základna ..... - 19 -

2.3 Létání stabilizovaných přiblížení ..... - 20 -

2.4 Prvky stabilizovaného přiblížení ..... - 21 -

2.5 Výhody stabilizovaných přiblížení ..... - 21 -

2.6 Faktory způsobující nestabilizovaná přiblížení ..... - 22 -

2.7 Projevy nestabilizovaného přiblížení ..... - 23 -

2.8 Strategie ..... - 23 -

2.9 Zvláštní letiště ..... - 24 -

2.10 Briefing ..... - 25 -

2.11 Program pro vyhodnocení stabilizovaných přiblížení ..... - 25 -
2.11.1 Shrnutí programu ..... - 34 -
2.11.2 Konkrétní příklad vyhodnocení stabilizovaného přiblížení ..... - 34 -
3 Vyhodnocení integrity polohové informace ..... - 42 -
3.1 Program pro vyhodnocení integrity polohové informace ..... - 43 -
3.2 Vyhodnocení integrity polohových informací ze dne 17. března 2019 ..... - 45 -
3.2.1 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 0000 UTC do 0003 UTC ..... - 46 -
3.2.2 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 0200 UTC do 0203 UTC ..... - 47 -
3.2.3 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 0400 UTC do 0403 UTC ..... - 48 -
3.2.4 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 0600 UTC do 0603 UTC ..... - 49 -
3.2.5 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 0800 UTC do 0803 UTC ..... - 50 -
3.2.6 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 1000 UTC do 1003 UTC ..... - 51 -
3.2.7 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 1200 UTC do 1203 UTC ..... - 52 -
3.2.8 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 1400 UTC do 1403 UTC ..... - 53 -
3.2.9 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 1600 UTC do 1603 UTC ..... - 54 -
3.2.10 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 1800 UTC do 1803 UTC ..... - 55 -
3.2.11 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 2000 UTC do 2003 UTC ..... - 56 -
3.2.12 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 2200 UTC do 2203 UTC ..... - 57 -
3.2.13 Shrnutí ..... - 58 -
4 Vytváření záznamů o příletech a odletech ..... - 59 -
4.1 Určení přistání nebo odletu ..... - 60 -
4.2 Určení kategorie letadla ..... - 61 -
4.3 Dekódování volacího znaku ..... - 62 -
4.4 Výsledný záznam ..... - 63 -
Závěr ..... - 64 -
Použité zdroje ..... - 66 -
Literatura ..... - 66 -
Internetové zdroje ..... - 66 -
Seznam obrázků ..... - 68 -

Seznam tabulek ..... - 71 -
Seznam příloh na CD ..... - 72 -
Nestabilizované přiblížení ..... - 72 -
Integrita polohové informace ..... - 72 -
Záznamy příletů a odletů ..... - 73 -

Seznam použitých zkratek

A/C	Aircraft	Letadlo
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance – Broadcast	Automatické závislé sledování - vysílání
ADS-C	Automatic Dependent Surveillance – Contract	Automatické závislé sledování - kontrakt
ATC	Air Traffic Control	Řízení letového provozu
CA	Capability Field	---------
CFIT	Controlled Flight Into Terrain	Řízený let do terénu
DF	Downlink Format	Formát sestupného spoje
EU	European Union	Evropská unie
FMS	Flight Management System	---------
GNSS	Global Navigation Satellite System	Globální družicový polohový systém
GPS	Global Positioning System	Globální polohový systém
ICAO	International Civil Aviation Organization	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
ILS	Instrument Landing System	
IMC	Instrument Meteorological Conditions	Meteorologické podmínky pro létání podle přístrojů
LAT	Latitude	Zeměpisná šířka
LONG	Longitude	Zeměpisná délka
LT	Local Time	Místní čas
NextGen	Next Generation Air Transport System	---------
NIC	Navigation Integrity Category	---------
PAPI	Precision Approach Path Indicator	
SESAR	Single European Sky Air Traffic Management Research	
SIL	Source Integrity Level	---------

SOP	Standard Operating Procedures	---------
T	Time	Čas
TC	Type Code	---------
UTC	Coordinated Universal Time	Koordinovaný světový čas
VMC	Visual Meteorological Conditions	Podmínky pro let za vidu

Úvod

Řízení letového provozu stále patří mezi mladé profese, které vznikly během minulého století při obrovském rozmachu letecké dopravy. První letecký provoz byl operován za podmínek umožňujících vizuální provedení letu a zabránění kolizím více letadel bylo pouze v rukou pilotů. Nicméně se zhušťujícím se provozem nejen na letištích bylo nutností zavést systém, který zaručí přilétávajícím a odlétávajícím letadlům organizaci a zejména bezpečný provoz.

S přibývajícími požadavky a rostoucími nároky na leteckou dopravu, aby letadla létala za jakýchkoli podmínek – ve dne, v noci, nezávisle na počasí a ve větších výškách – bylo nezbytné zajistit modernizaci jak samotných letadel, tak pozemní infrastruktury zajišťující plynulý a bezpečný provoz a řídícím letového provozu správné informace o polohách letadel.

Přínos přehledových systémů je z hlediska bezpečnosti významný zejména umožněním snížení rozstupů mezi letadly a poskytováním automatických upozornění a varování řídícím letového provozu. Dalším významným přínosem je zlepšení situačního uvědomění řídících letového provozu. Pro potřeby pátrání a záchrany mohou přehledové systémy pomoci poskytnutím informace o poslední poloze letadla.

Pro uživatele vzdušných prostorů je pak výhodné, že používání přehledových systémů zlepšuje plynulost provozu a snižuje zpoždění. Díky těmto systémům je jednodušší získat povolení ke změnám tratí a hladin od řídících letového provozu, což zvyšuje flexibilitu nejen ve špatném počasí. Ve výsledku pak dochází ke snížení spotřeby paliva právě díky efektivnímu provozu.

Úvodní kapitola této diplomové práce se věnuje základním přehledovým systémům a popisuje principy fungování primárního a sekundárního radaru, automatického závislého sledování a je v ní popsána takzvaná ADS-B zpráva, která je nositelem informací při využívání právě systému automatického závislého sledování.

Ve druhé, třetí a čtvrté kapitole je zkoumáno využití ADS-B zpráv pro získávání provozních informací. Takovým způsobem mohou být ADS-B zprávy přínosné nejen pro služby řízení letového provozu, ale také pro provozovatele leteckých společností, nebo pro provozovatele letišť. Autor se v této práci věnuje možnostem využití ADS-B zpráv pro vyhodnocení, zda přiblížení letadel jsou stabilizovaná, pro vyhodnocení integrity polohové informace a pro ukládání záznamů o příletech na dané letiště a odletech z něj. Cílem této práce je poukázat na možnosti využití ADS-B zpráv pro získání provozních informací a navrhnout algoritmy, jak tyto informace z ADS-B zpráv získat.

1 Přehledové systémy

V této kapitole je věnován prostor popisu klíčových přehledových systémů a jejich dělení tak, aby byl patrný vývoj těchto technologií až k současným možnostem automatického závislého sledování, během kterého se uskutečňuje přenos tzv. ADS-B zpráv, kterými se tato práce zabývá.

1.1 Dělení přehledových systémů

Existují různé druhy přehledových systémů. V této podkapitole je uvedeno, jak lze tyto systémy rozdělit. Podle toho, jakým způsobem je získávána polohová informace cíle (letadla), můžeme přehledové systémy rozdělit na:

- nezávislé nekooperující;
- nezávislé kooperující;
- závislé kooperující.

Pokud jde o závislý přehledový systém, pak je poloha letadla určena z informace, kterou letadlo určí samo z palubních systémů a vyšle systému pozemnímu.

V případě nezávislého přehledového systému je pak poloha vypočítána a určena pozemním systémem.

Kooperativní systém klade určité nároky na vybavení letadla. To musí být vybaveno systémem, který bude přijímat dotazy ze země a odpovídat na ně a tedy s pozemním systémem bude spolupracovat.

Logicky je pak nekooperativní systém takový, který při získávání informací není v žádné součinnosti s jakýmkoli systémem letadla.

1.1.1 Příklady přehledových systémů

Nezávislé nekooperativní

Mezi nezávislé nekooperativní systémy patří radary, které pracují na principu odražených radiových signálů. Jsou to tedy například primární přehledový radar (viz 1.2) nebo pozemní pojezdový radar.

Nezávislé kooperativní systémy

Mezi nezávislé kooperující systémy patří sekundární přehledový radar (viz 1.3) a multilaterační systémy.

Závislé kooperativní systémy

Mezi závislé kooperující systémy patří systémy ADS-B a ADS-C.

1.2 Primární radar

Mezi první moderní prostředek určený ke sledování pohybů letadel a k získání přehledu jak o vzdušné situaci v okolí letiště, tak o pohybech letadel na zemi, patří primární radar. Ten nevyžaduje žádnou aktivní součinnost žádného systému letadla. Principem fungování je vyslání signálu, který se odrazí od cíle (letadla) a ve formě pasivních odrazů je přijímán zpět na pozemním přijímači.

Výhodou primárního radaru je právě jeho autonomnost a úplná nezávislost na cíli. Bohužel pozemní vybavení je ale velmi drahé a výkon je omezený velikostí cíle a jeho vzdáleností. Navíc signál může být negativně ovlivněn odrazy od terénu nebo počasím. Řídící také na svém displeji vidí pouze tečku reprezentující polohu letadla, jeho identifikaci v podobě volacího znaku nebo registrace letadla však k dispozici nemá. Přes tyto nedostatky je ale primární radar základním kamenem sledování letového provozu.

1.3 Sekundární radar

Principem fungování sekundárního radaru je odpovídání cíle na dotazy vyslané z pozemního systému (anténa sekundárního radaru je obvykle umístěna nad anténou primárního radaru). Tyto dotazy jsou vysílány dotazovačem na frekvenci 1030 MHz, odpovídač (transpondér) umístěný na palubě letadla (případně pozemního mobilního prostředku) na ně odpovídá na frekvenci 1090 MHz.

Sekundární radary fungují v módech, které komunikaci mezi dotazovačem a odpovídačem definují. Pro každý mód je typická jiná struktura dotazů a odpovědí. Signály dotazů jsou složeny z impulsů, které jsou definovány předpisem L10 a značí se písmenem P a číslicí (P1, P2, P3, …, P6).

1.3.1 Mód A a mód C

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

1.3.2 Mód S

Identifikace vysílaná módem A je čtyřmístný kód, který je letu přidělen řízením letového provozu a na odpovídači nastaven posádkou. Tento kód je tvořen pouze číslicemi osmičkové soustavy, a proto možných kombinací může existovat pouze 4096. Toto byl významný důvod pro vývoj nového módu S (Selective Adressing). Letadlu je v tomto případě přidělena 24bitová jedinečná adresa. Těchto jedinečných adres může existovat více než 16 milionů. Mód S umožňuje datovou komunikaci země-letadlo, letadlo-země a letadlo-letadlo. Hlavní výhodou tohoto módu je adresné dotazování letadla. V periodě, kdy dochází k vysílání dotazů všem letadlům, získá dotazovač odpovědi od všech odpovídačů v dosahu a jejich jedinečné adresy. To dotazovači umožňuje dále vysílat pouze adresné dotazy.

1.3.2.1 ICAO adresa letadla

Adresa letadla je předpisem definována jako jediná možná kombinace 24 bitů, použitelná pro přidělení letadlu za účelem spojení letadlo-země, navigace a přehledu o provozu.

Dle předpisu L10 jsou bloky adres letadel přidělovány ICAO státu zápisu do rejstříku nebo úřadu zapisujícímu společné značky. Stát zápisu do rejstříku nebo úřad zapisující společné značky pak musí každému patřičně vybavenému letadlu zapisovanému do národního rejstříku přidělit individuální adresu letadla.

Předpis L10 dále uvádí, že žádná adresa nesmí být v jednu chvíli přidělena více než jednomu letadlu. Výjimku mohou tvořit pozemní letištní vozidla, pokud jsou provozována na letištích vzdálených více než 1000 km.

Adresa letadla může být změněna pouze za výjimečných okolností a nesmí se měnit v průběhu letu. [5]

1.4 Automatic Dependent Surveillance (ADS)

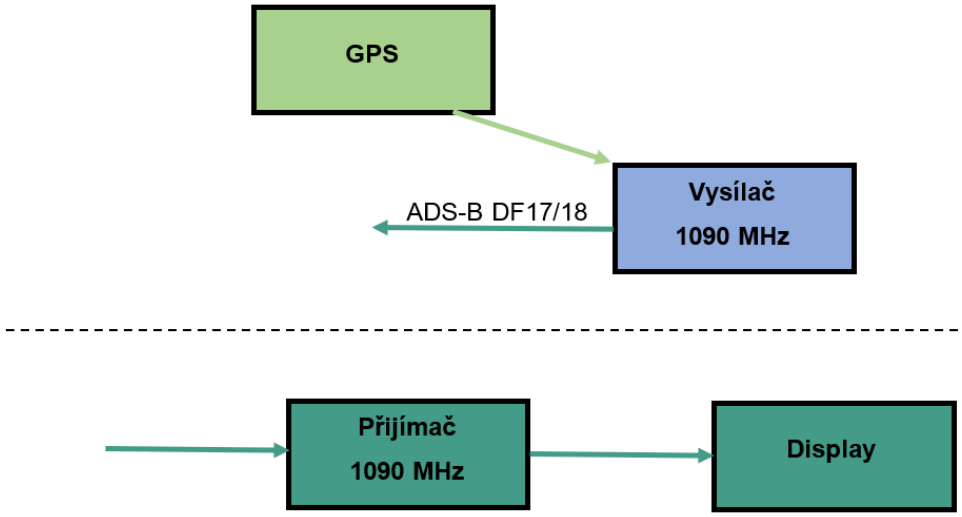
Tato práce se bude zabývat výhradně datovými zprávami, které jsou odpovídačem módu S vysílány automaticky bez předchozího přijetí dotazu, a proto je v následující části těmto systémům a definicím s nimi spojenými věnován prostor.

Systém automatického závislého sledování má využití nejen při sledování letadel, ale lze jej uplatnit také pro sledování pozemních prostředků (např. Follow Me). Tento systém není nijak dotazován. Z palubních systémů získává informace o identifikaci, poloze nebo rychlostech a ty pak automaticky dále vysílá dalším uživatelům.

1.4.1 Automatic Dependent Surveillance – Contract (ADS-C)

Definice ADS-C

Letecký předpis L4444 definuje ADS-C jako prostředek, kterým budou pomocí datového spoje vyměňovány položky ADS-C dohody mezi pozemním systémem a letadlem, určující, za jakých podmínek by měla být zahájena hlášení ADS-C a jaké údaje by tato hlášení měla obsahovat.



Obrázek 1: Schéma systému ADS-B.

Definice ADS-C dohoda

V předpise L4444 je dále definována ADS-C dohoda jako plán hlášení, který stanoví podmínky hlášení údajů ADS-C (tj. údaje požadované stanovištěm letových provozních služeb a četnost hlášení ADS-C, která musí být dohodnuta před použitím ADS-C při poskytování letových provozních služeb).

Připojená poznámka doplňuje, že položky dohody budou vyměňovány mezi pozemním systémem a letadly prostřednictvím kontraktu nebo sérií kontraktů. [6]

Využití systému ADS-C je zejména v provozu nad oceány.

1.4.2 Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B)

Systém ADS-B informace automaticky vysílá všem uživatelům. Potenciálně může nahradit radarové sledování v oblastech s nízkou hustotou provozu.

Definice ADS-B

Podle předpisu L4444 je ADS-B prostředek, kterým letadla, letištní mobilní prostředky a další objekty mohou automaticky vysílat a/nebo přijímat údaje, jako jsou identifikace, poloha a další, podle vhodnosti, ve vysílacím módu pomocí datového spoje. [6]

Smyslem automatického závislého sledování je v reálném čase poskytovat přehledové informace řídícím letového provozu nebo provozním oddělením aerolinií (dispečink). Vzhledem k tomu, že jde o závislý systém, kvalita získaných informací závisí na výkonech systémů letadla.

Takzvaná ADS-B zpráva je součástí datové zprávy vysílané odpovídačem módu S, která je charakterizovaná formátem sestupného spoje 17 (viz kap. 1.5).

1.5 ADS-B zpráva

Prostřednictvím odpovídače módu S jsou vysílány datové zprávy. Existuje 25 různých formátů těchto zpráv. V úvodu každé zprávy, tedy v prvních pěti bitech, je informace, o jaký formát jde. Pro tuto práci budou stěžejní zprávy sestupného spoje (letadlo-země), formátu 17, jelikož obsahují ADS-B zprávu. Následující tabulka zobrazuje strukturu zprávy sestupného spoje typu 17 (downlink format – DF).

Tabulka 1: Struktura zprávy sestupného spoje formátu 17.

DF (5)	CA (3)	MODE S ADRESS (24)	ADS-B MESSAGE (56 BITS)	PARITY (24)

Prvních pět bitů (pole DF) určuje, že jde o formát 17 (binárně 10001). V dalším poli CA tři bity předávají informaci o úrovni odpovídače, a zda se letadlo nachází ve vzduchu nebo na zemi. Následuje 24 bitů jedinečné adresy letadla (viz 1.3.2.1). Konečně, v následujících 56 bitech je obsažena samotná ADS-B zpráva (popsáno dále) a posledních 24 bitů slouží k ověření správnosti zprávy.

ADS-B zpráva je tvořena 56 bity. Protože existuje více typů těchto zpráv, je každý z nich charakterizován prvními pěti bity – těchto pět bitů tvoří tzv. Type Code. Tyto typy jsou popsány v následující části.

Airborne Position

- Zpráva typu Airborne Position obsahuje polohové informace – výšku, zeměpisnou šířku a zeměpisnou délku.
- Tato zpráva je vysílána v intervalu 0,5 s.

Tabulka 2: Struktura polohové ADS-B zprávy.

TC (5)	STATUS (2+1)	ALTITUDE (12)	T (1)	CPR (1)	LAT LONG (34)

Airborne Velocity

- Zpráva typu Airborne Velocity obsahuje informace o rychlosti, a to jak vertikální, tak horizontální.
- Tato zpráva je vysílána v intervalu 0,5 s.

Tabulka 3: Struktura ADS-B zprávy o rychlostech.

TC (5)	SUB-TYPE (3)	INTENT (1)	RESERVED (1)	VELOCITY UNCERTAINTY (3)	HORIZONTAL VELOCITY (22)	VERTICAL VELOCITY (11)	TURN (2)	DIFF BARO ALT (8)

Surface Position

- Pokud je letadlo na zemi, vysílá zprávy typu Surface Position s daty o své poloze.
- Tato zpráva je vysílána v intervalu 0,5 s nebo 5 s, pokud je letadlo v klidu.

Tabulka 4: Struktura polohové pozemní ADS-B zprávy.

TC (5)	MOVEMENT (7)	STATUS (1)	HEADING (7)	T (1)	CPR (1)	LAT LONG (34)

Aircraft Identification

- Zpráva typu Aircraft Identification obsahuje volací znak příslušného letu.
- Tato zpráva je vysílána v intervalu 5 s nebo 10 s, pokud je letadlo v klidu.

Tabulka 5: Struktura ADS-B zprávy s volacím znakem.

TC (5)	A/C CATEGORY (3)	8 CHARACTER AIRCRAFT CALLSIGN (48)

Event Driven

- Těmto zprávám se říká Událostí podmíněné zprávy – jsou tedy vysílány pouze v případě vzniku definované situace.

Tabulka 6: Struktura příležitostné ADS-B zprávy.

TC (5)	SUB-TYPE (3)	EVENT DATA (48)

1.5.1 Využití ADS-B zpráv

Využití ADS-B jako primárního přehledového systému pro řízení letového provozu je jedním z hlavních cílů jak amerického projektu Next Generation Air Transport System (NextGen), tak evropského Single European Sky ATM Research (SESAR). Podle nařízení vycházejících z obou projektů, bude vybavení letadel ADS-B transpondéry od června 2020 povinné.

V případě evropského projektu jsou požadavky pro provozovatele letadel a poskytovatele letových provozních služeb stanoveny prováděcím nařízením komise (EU) č. 1207/2011, které je měněno prováděcím nařízením komise (EU) 2017/386. Pro provozovatele z něj plyne, že nejpozději do 7. června 2020 musí být systémem ADS-B Out (tedy vysílání ADS-B zpráv z letadla) vybavena letadla s maximální certifikovanou vzletovou hmotností převyšující 5700 kg nebo se schopností maximální pravé vzdušné rychlosti větší než 250 uzlů, která jsou provozovaná při letech v rámci všeobecného letového provozu v souladu s pravidly pro let podle přístrojů.

Implementace systémů závislého sledování jakožto přehledového systému pro řízení letového provozu není jediným trendem, který s ADS-B přichází. Jelikož vytvoření pozemní infrastruktury pro příjem ADS-B dat není otázkou vysokých nákladů [7], dochází také k rozšiřování přijímačů nízkonákladových. Nejznámějším provozovatelem sítě nízkonákladových ADS-B přijímačů je společnost Flightradar24, která díky spolupráci s dobrovolníky a leteckými nadšenci provozuje síť s více než 20 000 jednotkami rozmístěnými po celém světě.

Přijímacími jednotkami ADS-B dat je vybavena i Fakulta dopravní ČVUT – ta vlastní tři přijímače, které se nacházejí na studentských kolejích na Strahově, na budově Airport Business Center na letišti Václava Havla a na výškové budově na Pankráci. Zároveň fakulta spolupracuje s letištěm Letňany, které přijímač vlastní také a fakultě data poskytuje. Právě data získaná těmito přijímači byla použita při tvorbě této diplomové práce.

Podle statistik společnosti Flightradar24 je v současné době je ADS-B transpondéry vybaveno 80 % civilních letadel v Evropě a 60 % civilních letadel ve Spojených státech amerických, celkově 70 % všech civilních letadel. Pokud jde o všeobecné letectví, tak vybavenost letadel

ADS-B transpondéry je pod 20 %. [19] Snahou splnit požadavky prováděcího nařízení Evropské komise však počet vybavených letadel stoupá.

Cenné přehledové údaje o letadlech najdou bezesporu využití nejen při řízení letového provozu, ale jejich dostupnost může být výhodná také pro aerolinie nebo úřady. Provozní dispečinky leteckých společností musí vědět, kde se jejich letadla právě nacházejí. Kromě znalosti polohy ale možnost přijímat ADS-B zprávy odkrývá další příležitosti. Na základě přijatých dat je možné identifikovat různé provozní situace a vyhodnocovat je.

Tato práce má za cíl zkoumat možnosti využití ADS-B zpráv pro:

- vyhodnocení, zda přiblížení letadel jsou stabilizovaná;
- vyhodnocení integrity polohové informace;
- ukládání záznamů o příletech na dané letiště a odletech z něj.

Jednotlivé případy budou řešeny samostatně v následujících kapitolách.

2 Vyhodnocení stabilizovaných přiblížení

Na letištích po celém světě proběhne každý den více než 100 000 přistání [8]. I přesto, že se daří držet provozní bezpečnost letectví na vysoké úrovni, kritické fáze letu, jako jsou v tomto případě přiblížení k letišti a přistání, zůstávají rizikovými [8]. Při stabilizovaném přiblížení je letadlo k přistávací dráze přivedeno ve správné konfiguraci, má požadovanou rychlost, motory mají požadovaný výkon a letadlo letí po správné vertikální i podélné trajektorii. Není-li jeden z těchto parametrů dodržen, je přiblížení nestabilizované a riziko vzniku incidentu nebo letecké nehody při přiblížení nebo přistání je vyšší. Navíc stabilizovaný let již ve výšce 1000 ft nad prahem dráhy dává posádce možnost plně se věnovat monitorování přístrojů, udržení situačního povědomí a zachování mentální kapacity pro případ, že by v této kritické fázi letu nastala jakákoli nečekaná situace. Dodržování postupů pro stabilizovaná přiblížení a přerušení přiblížení v případě, že je nestabilizované, snižuje riziko vzniku nehody. Podle statistik The IATA Accident Classification Technical Group (ACTG) bylo nestabilizované přiblížení přispívajícím faktorem při 16 % leteckých nehod, které nastaly během fáze přiblížení nebo přistání v letech 2012-2016.

To, že stabilizované přiblížení je jediný přijatelný způsob přiblížení, je jednoznačný názor všech účastníků leteckého provozu – řídících letového provozu, poskytovatelů letových provozních služeb, pilotů, provozovatelů leteckých společností a také úřadů. Provedení postupu nezdařeného přiblížení je klíčové při nedodržení podmínek pro stabilizované přiblížení. Zároveň je projevem profesionality pilota, jeho správného situačního uvědomění a rozhodování.

Piloti musí být vycvičeni pro rozpoznání takového přiblížení, které není stabilizované, a být schopni zahájit postup nezdařeného přiblížení v jakémkoli okamžiku přiblížení, ve kterém se nestabilizovaným stane. Pro správné pochopení problematiky musí piloti chápat rizika spojená s létáním přiblížení, která nejsou stabilizovaná, i přesto, že takové přiblížení může v případě pokračování skončit úspěšným přistáním.

Pokud skutečně dojde k situaci, kdy je přiblížení nestabilizované, pilot by měl tuto událost nahlásit na safety oddělení letecké společnosti prostřednictvím hlášení, které vyplývá z konceptu „Just Culture“- spravedlivá kultura.

2.1 Spravedlivá kultura

Spravedlivá kultura je taková kultura, kdy zaměstnanci nejsou potrestáni za činy, opomenutí nebo rozhodnutí, která učinili, a která jsou přiměřená jejich zkušenostem a výcviku. Zároveň ale rozhodně nejsou tolerovány hrubé nedbalosti, úmyslná porušení předpisů a destruktivní jednání.

Vytvoření takového vztahu mezi zaměstnanci a zaměstnavateli umožní získávání hlášení o chybách a incidentech. Pokud zaměstnanec udělá chybu, ke které nedošlo úmyslně, není potrestán. Pokud by zaměstnanci byli za jakoukoli chybu potrestáni pokutou nebo pozastavením licence, určitě by k hlášení událostí nebyli motivováni. S přístupem spravedlivé kultury však dochází k vytvoření prostředí, ve kterém jsou události hlášeny a jsou zavedeny postupy pro vznik preventivních opatření tak, aby se z nastalých chyb mohli všichni ostatní poučit.

Pokud nastane nestabilizované přiblížení, měl by situaci pilot nahlásit prostřednictvím dobrovolného hlášení a dát tak možnost vyšetřovat příčinu této události. Bylo na vině řízení letového provozu? Došlo k pozdnímu udělení povolení ke klesání? Byla to chyba pilota?

Je patrné, že letecké společnosti si musí zakládat na dodržování stabilizovaných přiblížení. Pro případy, kdy piloti takovou událost z nějakého důvodu nenahlásí, by mohly mít zájem o software, který by lety s nestabilizovaným přiblížením odhalil. Případným zájemcem o takový software mohou být také úřady. Nicméně takováto kontrola by neměla narušovat důvěru vytvořenou zavedeným konceptem spravedlivé kultury.

Cílem této části diplomové práce je ověřit, zda je možné na základě přijatých ADS-B zpráv vyhodnocovat, zda jsou nebo nejsou přiblížení stabilizovaná. Následující podkapitoly se podrobněji věnují problematice stabilizovaných přiblížení a kritériím, která tato přiblížení definují.

2.2 Předpisová základna

Pro správné vymezení problematiky je nutné nastudování příslušné předpisové základny. Stabilizovanými přiblíženími se zabývají předpisy:

- L4444 – Postupy pro letové navigační služby – uspořádání letového provozu, a
- L8168 – Provoz letadel – letové postupy.

Letecký předpis L4444 stanovuje, že se po letové posádce požaduje letět stabilizované přiblížení ve správné rychlosti a správné konfiguraci obvykle 5 km (3 NM) od prahu dráhy. Dále se již odkazuje na letecký předpis L8168.

Všeobecné ustanovení předpisu L8168 udává, že základním bezpečnostním předpokladem při návrhu postupu stabilizovaného přiblížení musí být udržování zamýšlené letové dráhy bez mimořádných manévrů, jak je popsáno v publikovaném postupu přiblížení.

Dále předpis L8168 stanovuje parametry stabilizovaného přiblížení: Tyto parametry musí být obsaženy v Provozní příručce provozovatele a musí obsahovat alespoň následující podrobnosti:

- rozsah rychlostí, specifický pro každý typ letadla,
- minimální nastavení výkonů, specifických pro každý typ letadla,
- rozsah letových poloh, specifický pro každý typ letadla,
- odchylky průletových tolerancí nadmořských výšek,
- konfigurace, specifická pro každý typ letadla,
- maximální úhel klesání,
- úplný kontrolní seznam kontrolních úkonů a příprav posádek.

Všechny lety by měly být stabilizovány ne níž než 300 m (1000 ft) výšky nad prahem dráhy za meteorologických podmínek letu podle přístrojů (IMC), a všechny lety jakékoliv povahy musí být stabilizovány ne níže než 150 m (500 ft) výšky nad prahem dráhy.

Předpis L8168 také provozovatelům stanovuje zavést strategii průletů: standardní provozní postupy by měly obsahovat strategii provozovatele s ohledem na parametry nestabilizovaného přiblížení a výšky nad prahem dráhy, ve kterých mají být lety stabilizované. Tato strategie by měla stanovovat, že pokud přiblížení není stabilizováno v souladu s parametry nebo dojde k jeho destabilizaci v kterémkoliv bodu průběhu přiblížení, požaduje se provést průlet. Provozovatel by měl tuto strategii zavést pomocí výcviku.

2.3 Létání stabilizovaných přiblížení

Uspěchaná a nestabilizovaná přiblížení jsou hlavními faktory, které přispívají k řízenému letu do terénu (CFIT) [9] a k dalším nehodám ve fázi přiblížení a přistání. Výsledkem takovýchto přiblížení je nedostatek času posádky ke správnému:

- naplánování;
- připravení;
- a provedení bezpečného přiblížení.

Podle statistiky z roku 1998 bylo ze všech nehod během přiblížení nebo přistání 40 % způsobeno právě pokračováním v nestabilizovaném přiblížení [9 z 10]. Současné statistiky uvádějí pokles vysokého procentového vyjádření na 16 % za období let 2012-2016 [5].

Nestabilizované přiblížení je také hlavní příčinou 75 % dosednutí mimo přistávací dráhu, tail strike nebo vyjetí z přistávací dráhy [9 z 10].

2.4 Prvky stabilizovaného přiblížení

Přiblížení lze považovat za stabilizované pouze, pokud jsou všechny následující prvky splněny před dosažením výšky pro stabilizované přiblížení nebo nejpozději v této výšce. (1000 ft pro IMC, 500 ft pro VMC):

- letadlo je na správné podélné i vertikální dráze;
- pro udržení letadla na této dráze je vyžadováno pouze malých změn kurzu a podélného sklonu;
- letadlo je v požadované přistávací konfiguraci;
- tah je stabilizovaný, obvykle nad volnoběhem – k udržení požadované rychlosti přiblížení;
- byl dokončen přistávací check-list a případně proveden požadovaný briefing;
- žádný letový parametr nesplňuje kritéria v následující tabulce:

Tabulka 7: Parametry stabilizovaného přiblížení a jejich kritéria.

Parametr	**Kritérium (parametr nemá být…)**
Rychlost	Nižší než V_{APP} – 5 kt nebo Vyšší než V_{APP} + 10 kt
Vertikální rychlost	Větší než -1000 ft/min
Podélný sklon	Nižší nebo vyšší než definováno v SOP
Náklon	Vyšší než 7°
Vychýlení od LOC	¼ tečky
Vychýlení od GS	1 tečka

Pokud některý z parametrů splňuje uvedená kritéria pod výškou stabilizovaného přiblížení, má pilot monitorující zvolat patřičnou hlášku (tzv. callout).

2.5 Výhody stabilizovaných přiblížení

Kromě snížení rizika vzniku incidentu je velkým benefitem provedení stabilizovaného přiblížení čas, který tak posádka získá k monitorování parametrů, letové dráhy, ke sledování vertikální dráhy a rychlosti klesání, ke sledování komunikace s řízením letového provozu, počasí a systémů, čímž se zvyšuje celkové situační uvědomění posádky. Díky tomu je posádka schopna včas reagovat a případně provést průlet.

Z celé filozofie vyplývá, že pokud letadlo není stabilizováno na sestupové rovině v přistávací konfiguraci ve výšce stabilizovaného přiblížení, musí být proveden postup nezdařeného

přiblížení go-around, pokud posádka neočekává, že jen malé korekce budou potřebné k napravení malých odchylek od podmínek stabilizovaného přiblížení způsobených externími vlivy.

V případě, že pilot monitorující zaznamená vychýlení nějakého parametru, upozorní pilota letícího vyslovením příslušného hlášení (callout) a následuje scénář, kdy pilot letící:

- potvrdí callout;
- okamžitě zahájí opravnou činnost, aby parametr, který překročil interval kritéria, byl navrácen do podmínek pro stabilizované přiblížení;
- vyhodnotí, zda podmínky stabilizovaného přiblížení mohou být obnoveny dostatečně včas před přistáním, a pokud ne, tak provede postup nezdařeného přiblížení.

2.6 Faktory způsobující nestabilizovaná přiblížení

Na základě zkušeností posádek je možné identifikovat mnoho důvodů, proč dochází k přiblížením, která stabilizovaná nejsou. Prvním takovým významným faktorem je únava posádky, která tak vykazuje sníženou pozornost. Posádka může letět několikátý noční let po sobě, protože předpisy některých společností dovolují v rámci sedmi dní až čtyři noční lety. Zároveň například vidina delšího než povinného odpočinku nebo těšení se na víkend s rodinou při posledním letu před tímto odpočinkem může také působit jako faktor, který rozptyluje. K nedostatečnému soustředění také přispívá stres. V případě zpožděného letu může být vznik nestabilizovaného přiblížení zapříčiněn také nátlakem na posádku, aby zpoždění snížila a dodržela letový řád. [9]

Jak bylo již zmíněno, pro stabilizované přiblížení je důležité, aby posádka měla dostatek času k přípravě na přistání. Mohou však nastat okolnosti, které způsobí nedostatek času posádky pro naplánování, připravení a provedení bezpečného přiblížení, jako například zkrácení příletové tratě nebo přijetí požadavku řízení letového provozu k provedení letu větší rychlostí. V takovém případě se může letadlo v počáteční fázi přiblížení nacházet ve vysoké výšce. Požadavek řízení letového provozu na změnu přistávací dráhy, který posádka obdrží během příprav na přiblížení, může také vyústit v přiblížení nestabilizované.

Poslední skupina příčin a faktorů se týká samotných zkušeností posádky a jejich výcviku. Mezi tyto faktory patří nestandardní spolupráce v kokpitu způsobující nadměrné změny polohy hlavy („head-up, head-down“) při snaze sledovat několik přístrojů současně a navíc například ještě ovládat FMS. [9] Může také docházet k nesprávnému používání autopilota. V případě, kdy se letadlo neusadí na sestupové rovině (posádka nespustí mód approach) dochází k pozdnímu vypnutí autopilota posádkou. Důležité je i dostatečné povědomí o povětrnostních podmínkách a počasí – o složkách větru a poryvech. [9]

Další faktory související se zkušeností posádky a jejím rozhodováním [9]:

- nesprávné očekávání chování letadla při zpomalování v ustáleném letu nebo na sestupové rovině;
- chyba v rozpoznání odchylek od parametrů stabilizovaného přiblížení nebo neznalost těchto kritérií;
- víra, že letadlo bude stabilizováno ve výšce stabilizovaného přiblížení nebo krátce později;
- přesvědčení pilota monitorujícího, že pilot letící letadlo včas stabilizuje;
- pokračování v přiblížení bez získání vizuálních referencí nebo po jejich ztrátě;
- neschopnost přesně letět podle PAPI;
- neschopnost mířit na zaměřovací bod (aiming point).

Aby se mohlo nestabilizovaným přiblížením předcházet, je potřeba identifikovat a minimalizovat tyto faktory, které je způsobují, a poskytnout doporučení ke včasnému rozpoznání nestabilizovaného přiblížení a jeho nápravě.

2.7 Projevy nestabilizovaného přiblížení

Následující odchylky jsou obvykle pozorovány během nestabilizovaných přiblížení, buď samostatně, nebo v kombinaci. [9]

- Celé přiblížení provedeno s motory na volnoběh z důvodu nadměrné výšky a/nebo rychlosti v počáteční fázi přiblížení.
- Strmé přiblížení (nad požadovanou sestupovou rovinou s nadměrnou vertikální rychlostí až -2200 ft/min, úhel klesání až 9°). Strmá přiblížení jsou dvakrát více častější, než nízká přiblížení.
- Nízká přiblížení (pod požadovanou sestupovou rovinou);
- nadměrný úhel náklonu při nalétávání kurzu finálního přiblížení;
- pozdní vysunutí klapek;
- nadměrný úhel náklonu, rychlost klesání a manévrování při provedení side-step přiblížení.
- Stále otevřené spoilery na krátkém finále;
- dlouhé podrovnání a pozdní dosednutí.

2.8 Strategie

Správná strategie, jak předcházet vzniku nestabilizovaného přiblížení, se dá shrnout čtyřmi slovy: očekávat, identifikovat, napravit, rozhodnout. [9]

Očekávat

Některé faktory, které mohou vést k nestabilizovanému přiblížení lze očekávat. Během briefingu je nutné se na výskyt těchto faktorů připravit (př. rychlostní omezení). Posádka se má dohodnout na způsobu provedení klesání, zpomalení a stabilizace.

Identifikovat

Posádka během přiblížení sleduje parametry letu a v případě vychýlení některého z nich na tuto situaci upozorní.

Napravit

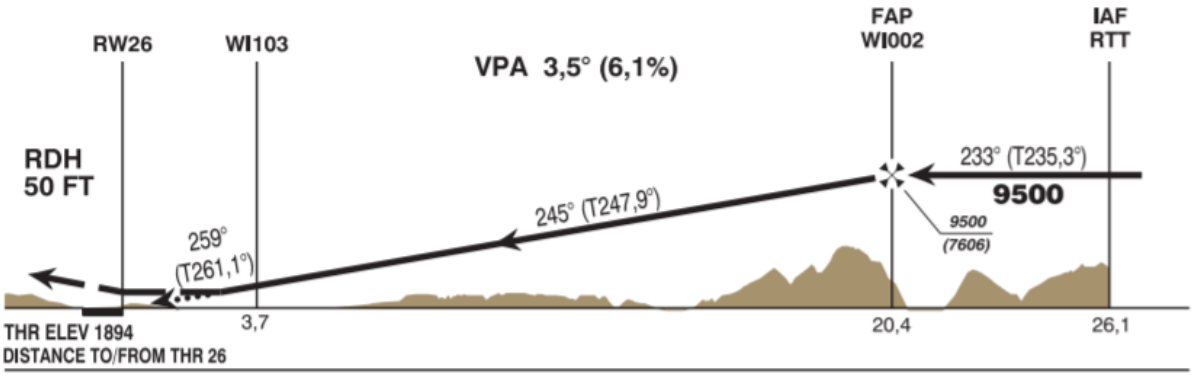
Posádka provede nápravnou činnost včas a dříve, dokud není jediným řešením postup nezdařeného přiblížení.

Rozhodnout

Posádka musí rozhodnout, zda provede postup nezdařeného přiblížení.

2.9 Zvláštní letiště

Existují letiště, kde uvedení letu do stabilizovaného přiblížení je zvlášť náročné. Typickým příkladem jsou letiště, která jsou obklopena horským terénem. Přibližovací postupy publikované s ohledem na terénní omezení mohou vyžadovat let vyššími rychlostmi, než je při přiblížení obvyklé. Publikované sestupové roviny takovýchto přiblížení bývají strmější, než jsou obvyklé 3°. Pro létání na tato letiště je vyžadována dodatečná kvalifikace obdržená po výcviku na simulátoru a seznamovacím vývozu s instruktorem.



Obrázek 2: Část přibližovací mapy na RWY 26 letiště Innsbruck znázorňující strmé přiblížení 3,5°. [11]

2.10 **Briefing**

V textu výše již bylo zmíněno, že se po posádce před zahájením přiblížení požaduje, aby provedla briefing. Význam briefingu by neměl být podceňován. Správně provedený briefing totiž přispívá k lepší spolupráci, koordinaci, pochopení situace a komunikaci.

Briefing před klesáním a přiblížením má obsahovat následující body:

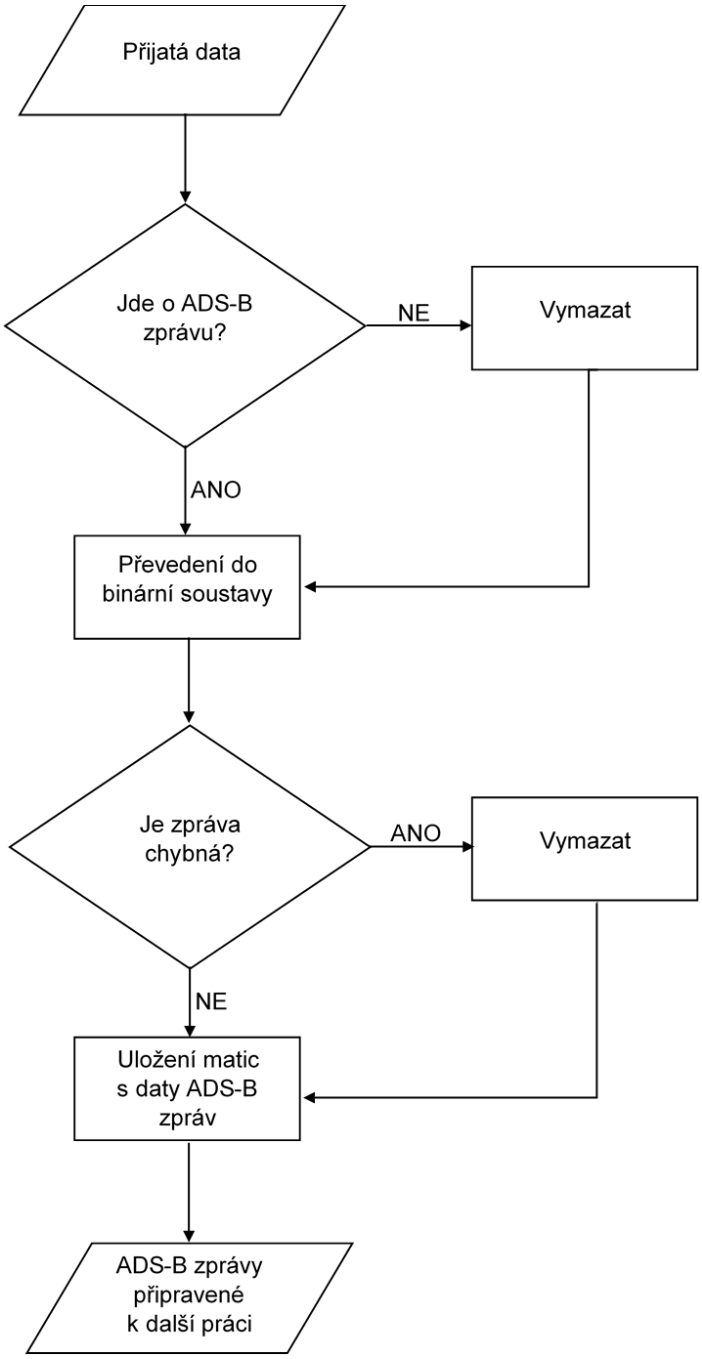
- podmínky během přiblížení – počasí, stav přistávací dráhy, rizika spojená s daným přiblížením;
- kritéria stabilizovaného přiblížení;
- podrobnosti postupu přístrojového přiblížení;
- podrobnosti postupu nezdařeného přiblížení;
- podrobnosti o případné diverzi letu;
- nestandardní postupy;
- očekávaná omezení ze strany ATC.

2.11 **Program pro vyhodnocení stabilizovaných přiblížení**

Cílem této části diplomové práce je ověřit, zda je možné využít přijaté ADS-B zprávy k identifikaci nestabilizovaných přiblížení. Pro vytvoření programu je potřeba nejprve vybrat typy dat, která jsou pro takové vyhodnocení potřebná. Poté bude v této podkapitole představen a popsán samotný program v prostředí Matlab.

Jelikož jde o vytvoření všeobecného programu, který má být použitelný ke zpracování všech letů, musí být nestabilizované přiblížení vyhodnocované na základě kritérií, která jsou pro všechny lety stejná. Z tabulky kritérií v předchozí podkapitole (Tabulka 7) lze tato kritéria připomenout. Aby bylo přiblížení stabilizované, nesmí být rychlost letadla větší než V_{APP} + 10 kt a nižší než V_{APP} – 5 kt. Vertikální rychlost klesání nesmí být vyšší než -1000 ft/min. Podélný sklon má splňovat podmínky stanovené v SOP. Kritéria týkající se sestupové roviny ILS nebudu uvažovat, aby bylo možné vyšetřovat i jiné typy přiblížení.

Aby bylo možné vytvořit program, jehož vyhodnocování nebude závislé na typu letadla nebo letecké společnosti, musím z dat pro vyhodnocení vyloučit rychlost a podélný sklon. Přibližovací rychlost se může u různých letů lišit. Podélný sklon definovaný v SOP by vyžadoval další znalost provozních postupů různých leteckých společností, a proto pro vytvoření obecného programu také nebude uvažován. Hlavním kritériem, které bude posuzováno v této práci, je tedy vertikální rychlost, která při stabilizovaném přiblížení nesmí přesahovat -1000 ft/min, a to bez ohledu, o jaký typ letadla se jedná, bez ohledu na to, která letecká společnost letadlo provozuje a bez ohledu na typ přiblížení, který je prováděn.



Obrázek 3: Zjednodušený vývojový diagram výběru ADS-B zpráv ze získaného datového souboru.

Data, která jsou pro potřeby této práce zpracována, jsou získaná ze školního FTP serveru, na který jsou automaticky ukládána po přijetí na síti přijímačů Fakulty dopravní. Datový soubor vypadá následovně (zobrazen náhodný výběr):

```
1547225612266;3;1F6CE6EE02E3;A0001910CC300030A80000BFE1FC

1547225612266;3;1F6CE6F06D8A;200019985A0B12

1547225612266;3;1F6CE6F61319;5D484F50A51A46

1547225612266;3;1F6CE6FE677B;8D5110D458B504368828D4C64377
```

```
1547225612266;3;1F6CE701E160;5D4D03CAACC76C

1547225612266;3;1F6CE702C7A9;2E29BFABEFFB67

1547225612266;3;1F6CE708C4AE;004A3BEFDA5D32

1547225612266;3;1F6CE708C858;0014F7DFB4BA65

1547225612266;3;1F6CE70B3001;8D49D2EEEA1F58656F3C082ACEE9

1547225612266;3;1F6CE71B65F8;5F4BB856959CAB

1547225612266;3;1F6CE71DC024;056F15F0737D1C

1547225612266;3;1F6CE728CBC7;200015B86C84EE

1547225612266;3;1F6CE72F968C;8D44041958A11535C46B019AB034.
```

Každý řádek datového souboru se týká jedné přijaté zprávy a obsahuje čtyři sloupce informací, které jsou odděleny středníkem. První sloupec obsahuje unixový čas, který je zprávě přidělen operačním systémem při vytvoření záznamu o této zprávě. Druhý sloupec značí, na který přijímač byla zpráva přijata. Třetí sloupec obsahuje hexadecimální časovou stopu zprávy v nanosekundách od půlnoci UTC. Ve čtvrtém sloupci je pak samotná zpráva.

Autorem vytvořený program *UnstabilizedApproach1.m* datový soubor načítá a rozděluje čtyři sloupce do samostatných matic: *Unix_time, prijimac, time, Message*. Nejprve je potřeba z matice *Message* vybrat pouze zprávy sestupného spoje 17. Typ datového spoje je charakterizován prvními pěti bity záznamu 1 0 0 0 1. V hexadecimální soustavě ale těchto pět bitů samostatně nelze dekódovat. Je potřeba znát ještě tři následující bity, které podle [12] mohou nabývat hodnot 0 0 0, 0 0 1, 0 1 0, 0 1 1, 1 0 0, 1 0 1, 1 1 0, 1 1 1. Dohromady osm bitů tvoří dva znaky hexadecimální soustavy. Právě tyto dva znaky (viz tabulka 8, třetí sloupec) jsou použity k filtrování dat tak, aby z celého balíčku byly vymazány záznamy neobsahující záznamy sestupného spoje typu 17.

Tabulka 8: Rozpoznání záznamu sestupného spoje typu 17 je možné pomocí prvních pěti bitů. V kombinaci s následujícími třemi bity lze tyto záznamy identifikovat i v hexadecimálním formátu.

DF (Downlink Format)	CA (Capability Field)	DF + CA hexadecimálně
1 0 0 0 1	0 0 0	8 8
1 0 0 0 1	0 0 1	8 9
1 0 0 0 1	0 1 0	8 A
1 0 0 0 1	0 1 1	8 B
1 0 0 0 1	1 0 0	8 C
1 0 0 0 1	1 0 1	8 D

1 0 0 0 1	1 1 0	8 E
1 0 0 0 1	1 1 1	8 F

Program vyhledává pouze záznamy, jejichž první dva znaky jsou prvky množiny zobrazené ve třetím sloupci. Ostatní záznamy jsou odstraněny. Dalším krokem je převod nyní už jen záznamů sestupného spoje 17 (tedy ADS-B zpráv) do binární soustavy.

Samozřejmě je možné nejprve přeložit všechny záznamy z datového souboru do binární soustavy a poté ponechávat všechny ty záznamy, jejichž prvních pět bitů tvoří 1 0 0 0 1. Protože převod z hexadecimální do binární soustavy je časově náročná operace, autor v předkládaném programu preferuje právě nejprve vyloučení záznamů ještě v hexadecimální soustavě a poté překlad menšího objemu dat do soustavy binární. Kontrolou parity pak v následujícím kroku dochází k vyloučení chybných zpráv. Při každém vyloučení zprávy dochází současně i vyloučení příslušných řádků v ostatních maticích s časem.

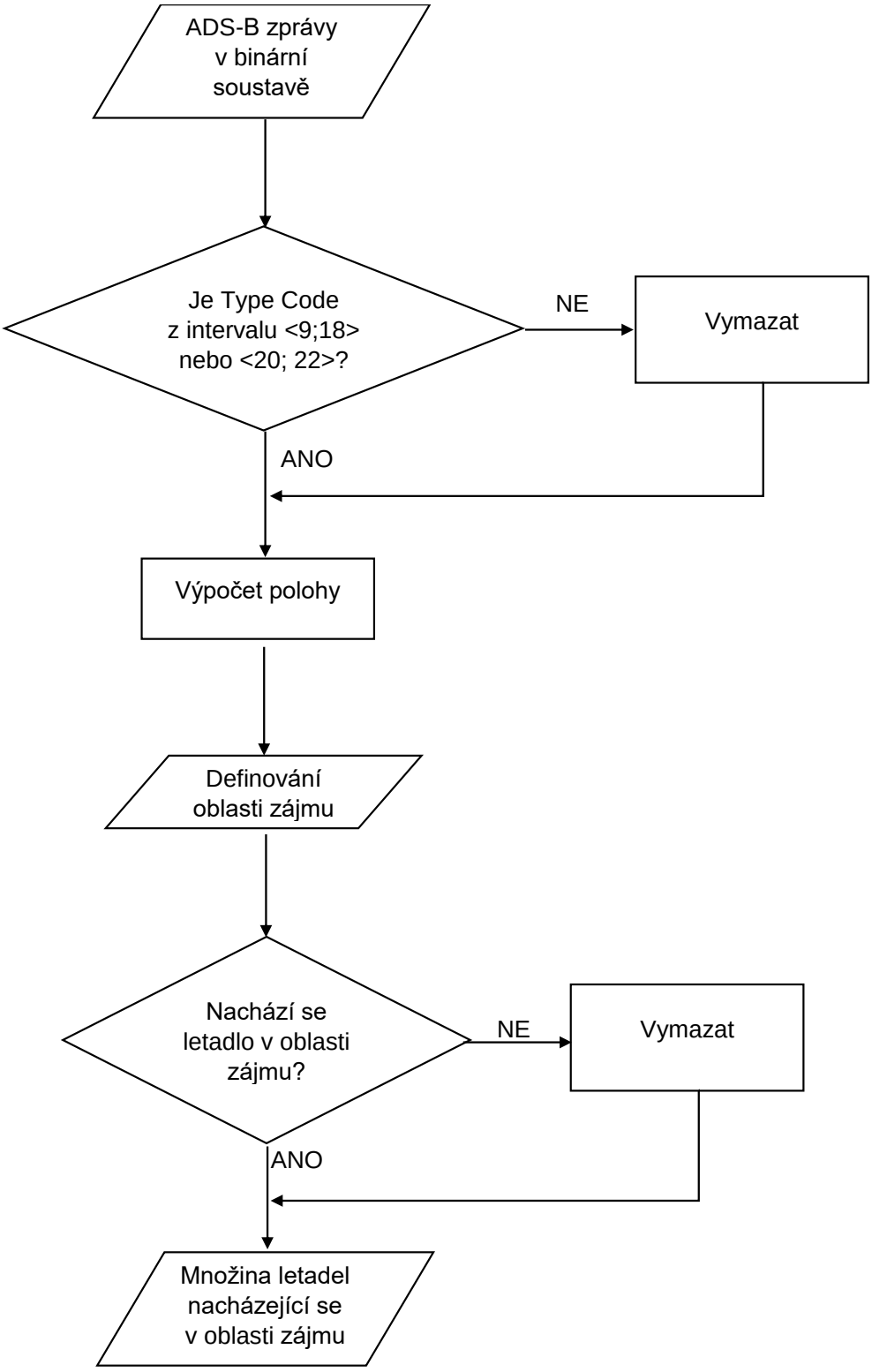
Program matice ukládá do samostatných souborů do příslušných složek:

- *MsgBin_YYMMDDHHMM.mat* do složky MsgBin_Archiv;
- *Unix_time_YYMMDDHHMM.mat* do složky UnixTime_Archiv;

Tyto vytvořené soubory lze následně načíst z dalších programů k další práci.

Vývojový diagram této části programu je zobrazen na obrázku 3.

Pro další práci je potřeba otevřít využít autorem vytvořený program *UnstabilizedApproach2.m.* Ten načítá soubory vytvořené v předchozí části. Uživatel musí zadat hodnotu proměnné *kriterium*, která později bude sloužit právě jako rozhodující při vyhodnocení stabilizovaného přiblížení a hodnota má odpovídat kritériu pro stabilizované přiblížení. Je potřeba také definovat obdélníkovou oblast zájmu (definující oblast přiblížení), ve které bude vyšetřování probíhat. Uživatel zadává proměnné *North, West, South, East*.



Obrázek 4: Zjednodušený vývojový diagram znázorňující zjišťování, která letadla se nacházejí v oblasti zájmu.

Program pracuje tak, že nejprve zjistí, která letadla se v definované oblasti zájmu nacházejí. K tomu je potřeba dekódovat zprávy o vzdušné poloze letadel. Tyto zprávy mají Type Code (prvních pět bitů každé zprávy sloužící k identifikaci, o který typ zprávy jde, zkráceně TC) 9-18 nebo 20-22.

Tabulka 9: Type Code zpráv obsahujících data o vzdušné poloze.

Type Code	Type Code binárně
9	0 1 0 0 1
10	0 1 0 1 0
11	0 1 0 1 1
12	0 1 1 0 0
13	0 1 1 0 1
14	0 1 1 1 0
15	0 1 1 1 1
16	1 0 0 0 0
17	1 0 0 0 1
18	1 0 0 1 0
20	1 0 1 0 0
21	1 0 1 0 1
22	1 0 1 1 0

Zprávy, které nemají TC z těchto intervalů jsou odstraněny. Pro příklad uvedu způsob vyhledání a filtrování zpráv s Type Code 9. Zdrojový kód vypadá takto:

```
DF_TC_9=MsgBin;
Time_TC9=Unix_time;
[Rap9,~]=size(DF_TC_9);
infoap9=((DF_TC_9(:,33:37))==repmat([0 1 0 0 1],Rap9,1));
DF_TC_9(sum(infoap9,2)~=5,:)=[];
Time_TC9(sum(infoap9,2)~=5,:)=[];
```

Matice *MsgBin* již obsahuje pouze ADS-B zprávy. Nejprve je vytvořena nová matice *DF_TC_9*, která je s maticí *MsgBin* totožná, a s touto novou maticí budeme dále pracovat tak, že na konci v ní budou ponechány pouze zprávy s Type Code 9. Matice *Time_TC9* bude ve výsledku obsahovat časové stopy odpovídající zprávám matice *DF_TC_9*.

Principem je porovnávání sloupců 33 až 37, tedy bitů, které určují, o který Type Code jde. Pokud sloupce 33 až 37 zprávy z *DF_TC_9* obsahují 0 1 0 0 1, je v informativní matici *infoap9* zaznamenána 1 na stejném řádku, jako je řádek zprávy v *DF_TC_9*. Pokud tuto binární kombinaci (která znamená Type Code 9) neobsahují, je v *infoap9* zaznamenána 0. Nakonec dochází k odstranění všech řádků v *DF_TC_9* a *Time_TC9*, pro které jejich odpovídající řádky v *infoap9* obsahují 0.

Stejným způsobem budou vytvořeny matice se zprávami s Type Code 10 až 18 a 20 až 22. Pokud seřadíme matice *DF_TC_9* až *DF_TC_22* za sebe (v programu vznikne matice

DF_bin), dojde k vytvoření jedné matice obsahující všechny zprávy o vzdušné poloze, které ale nebudou seřazeny podle času. Proto za sebe obdobně seřadíme také matice *Time_TC9* až *Time_TC22* (v programu vznikne matice *Time_Position*) a pomocí funkce *Sort* seřadíme všechny zprávy vzestupně podle časů v *Time_Position*.

V dalším kroku probíhá z filtrovaných zpráv o vzdušné poloze výpočet zeměpisných souřadnic a výšky letu. V následujícím filtru pak jsou ponechány pouze ty polohové zprávy, které obsahují záznam o poloze odpovídající definované oblasti zájmu. Z těchto zbylých zpráv lze pomocí funkce *unique* získat ICAO adresy pouze těch letadel, která se nacházejí v definované oblasti zájmu – v tomto případě tedy všechna letadla, která provádějí přiblížení k letišti.

K úloze lze přistupovat z pohledu teorie množin. ICAO adresy letadel, které jsou obsaženy ve filtrovaných polohových zprávách, představují opakující se prvky množiny. Pro další práci je nutné znát počet letadel a jejich identifikaci. Jde tedy o zjištění počtu jedinečných prvků množiny bez jejich opakování – k tomu je použita funkce *unique*.

Vývojový diagram této části programu je zobrazen na obrázku 4.

V další části program pracuje už pouze s konkrétními letadly, jejichž ICAO adresy nalezl v předchozím kroku. Pomocí cyklu *for*, který je definován počtem letadel v oblasti, program dále počítá data pro každé letadlo zvlášť. Ze souboru všech přijatých ADS-B zpráv jsou tak vybrány pouze ty zprávy, které obsahují požadovanou ICAO adresu letadla, tedy zprávy přijaté od konkrétního letadla. ICAO adresa je obsažena mezi 9. a 32. bitem záznamu. Zprávy, jejichž sloupce 9 až 32 se shodují s požadovanou ICAO adresou, zůstanou ponechány; ty ostatní jsou vymazány.

Protože údaje o vertikální rychlosti letu jsou obsaženy v jiném typu zpráv, než vzdušná poloha letadla, je potřeba vymezit časový interval, ve kterém se letadlo v oblasti zájmu nacházelo, a poté vyhledat ty zprávy obsahující informace o vertikální rychlosti letu tohoto letadla, které byly přijaty ve zjištěném časovém intervalu. Proto program pro konkrétní letadlo opět vypočítá jeho údaje o poloze (princip je stejný, jak zobrazuje vývojový diagram na obrázku 4) a vybere pouze ty zprávy o vzdušné poloze, jejichž obsah odpovídá vymezené oblasti zájmu. Čas přijetí první a poslední z těchto zpráv pak definuje časový interval, ve kterém se letadlo nacházelo v oblasti zájmu.

Ze všech ADS-B zpráv přijatých od konkrétního letadla poté dojde k výběru zpráv obsahujících informace o rychlostech. Tyto zprávy mají Type Code 19 (binárně 1 0 0 1 1) a obsahují právě údaje o vertikální rychlosti letu. Ze všech těchto zpráv s Type Code 19 dojde k ponechání jen těch, které byly přijaty v časovém intervalu, ve kterém se letadlo nacházelo v oblasti zájmu.

Dále program musí určit, zda daná zpráva obsahuje údaj o vertikální rychlosti letu ve stoupání nebo v klesání. Toto je určeno ve sloupci 69, viz tabulka 10.

Tabulka 10: Určení, zda jde o let ve stoupání nebo v klesání.

Bit 69	
Hodnota bitu	**Význam**
0	stoupání
1	klesání

Program pro další práci ponechá pouze ty zprávy, které obsahují vertikální rychlost ve klesání.

Z ponechaných zpráv je konečně možné vypočítat vertikální rychlost. Informace o vertikální rychlosti je obsažena v bitech (tedy sloupcích matice) 70 až 78. Pro získání vertikální rychlosti je nutné tyto bity převést do desítkové soustavy a dále od tohoto čísla odečíst jedničku a vynásobit 64.

$$Vr = (VrBitsDec - 1) \cdot 64 \qquad (1)$$

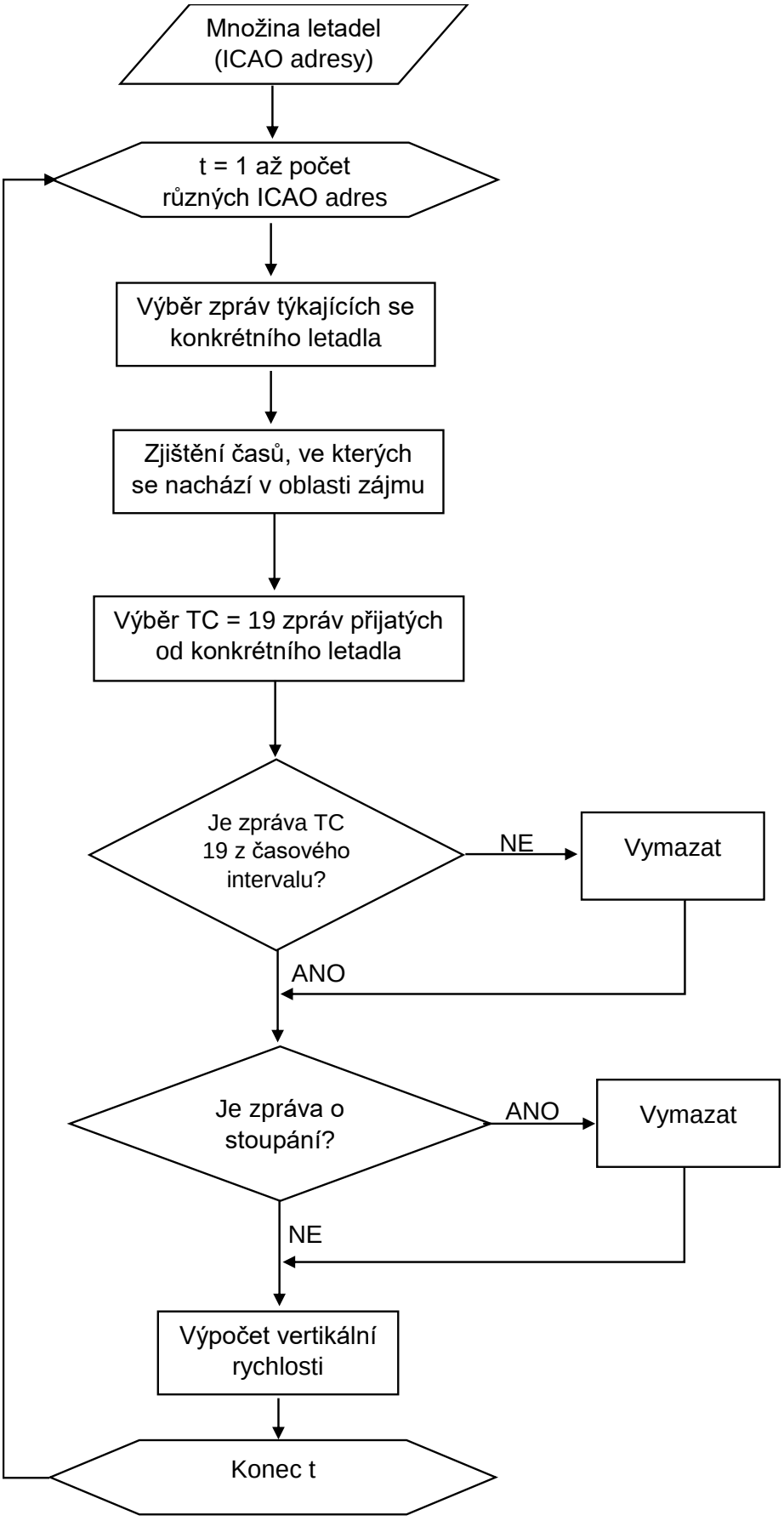
kde:

Vr je výsledná vertikální rychlost;

VrBitsDec jsou bity 70 až 78 záznamu vyjádřené v desítkové soustavě.

Vývojový diagram této části programu je zobrazen na obrázku 5.

Pro samotné vyhodnocení stabilizovaného přiblížení musíme porovnat hodnoty vertikálních rychlostí ve vektoru *Vr* s kritériem definovaným uživatelem v proměnné *kriterium*. Hodnoty nižší, než je toto kritérium budou vymazány, hodnoty přesahující toto kritérium budou uloženy do vektoru *VR*. Pokud je velikost tohoto vektoru větší než nula, tedy let vykazuje známky nestabilizovaného přiblížení, protože v oblasti zájmu jeho vertikální rychlost v klesání byla vyšší než hodnota kritéria, je o tomto letu uložen záznam do složky *AC_Information*. Jméno souboru záznamu obsahuje příslušnou ICAO adresu letadla, kterého se záznam týká. Zároveň je vykreslen graf zobrazující průběh vertikální rychlosti v čase. Hodnoty přesahující kritérium jsou v tomto grafu zvýrazněny. V grafu je zobrazen také průběh výšky letu. Graf je uložen do stejné složky.



Obrázek 5: Zjednodušený vývojový diagram znázorňující výpočet vertikální rychlosti konkrétního letadla.

2.11.1 Shrnutí programu

Program se skládá ze dvou částí. Pro dekódování a přeložení přijatých záznamů z hexadecimální do binární soustavy je nutné použít první část. Pro další práci a vyhodnocení stabilizovaného přiblížení uživatel využije část druhou:

1. ***UnstabilizedApproach1.m***
    - Program načte přijaté záznamy v hexadecimální soustavě;
    - ze záznamů vybere pouze ty, které obsahují ADS-B zprávy;
    - tyto záznamy převede do binární soustavy;
    - ověří úplnost a správnost zpráv a případně ty chybné odstraní;
    - uloží ADS-B zprávy k dalšímu použití v binární soustavě do matice *MsgBin*.
    - Viz Obrázek 3: Zjednodušený vývojový diagram výběru ADS-B zpráv ze získaného datového souboru.

2. ***UnstabilizedApproach2.m***
    - Program načte matici ADS-B zpráv *MsgBin*;
    - vyhodnotí, která letadla se nacházejí v oblasti zájmu;
    - pro každé z těchto letadel určí jeho vertikální rychlost;
    - porovná vertikální rychlosti s kritériem stabilizovaného přiblížení;
    - v případě, že hodnota vertikální rychlosti přesahuje kritérium, je o tomto letu uložen záznam a je vykreslen graf průběhu vertikální rychlosti a výšky letu.
    - Viz Obrázek 4: Zjednodušený vývojový diagram znázorňující zjišťování, která letadla se nacházejí v oblasti zájmu. + Obrázek 5: Zjednodušený vývojový diagram znázorňující výpočet vertikální rychlosti konkrétního letadla.

2.11.2 Konkrétní příklad vyhodnocení stabilizovaného přiblížení

Program pro vyhodnocení stabilizovaného přiblížení představený výše bude nyní použit k vyřešení konkrétního příkladu. Pro tento účel jsou vybrány následující záznamy přijaté fakultními přijímači:

- Datum pořízení záznamu: 31. května 2018
- Soubor obsahuje záznamy přijaté od: 2140 UTC (2340 LT)
- Soubor obsahuje záznamy přijaté do: 2200 UTC (0000 LT)
- Název souboru: 201805312140.dat

Po prvním zpracování tohoto souboru programem *UnstabilizedApproach1.m* je potřeba definovat vyšetřovanou oblast zájmu. Tou v tomto případě bude oblast pro přiblížení na přistávací dráhu 24 letiště Václava Havla v Praze. Definování hranic této oblasti zájmu vychází

z publikovaných souřadnic pro práh RWY24 a bod FAF PR24F přiblížení na RWY24, které jsou dostupné v přibližovacích mapách uveřejněných v AIP [13]:

- Souřadnice THR: 50 06 57,42 N
  014 16 24,12 E
- Souřadnice FAF PR24F: 50 10 38,79 N
  014 28 46,27 E

Aby vymezená oblast zájmu zahrnovala tyto dva body, jsou její hraniční souřadnice zvoleny takto:

- Severozápadní bod 50 11 N
  014 16 E
- Severovýchodní bod 50 11 N
  014 29 E
- Jihovýchodní bod 50 06 N
  014 29 E
- Jihozápadní bod 50 06 N
  014 16 E.

Tyto hodnoty jsou do *programu UnstabilizedApproach2.m* uživatelem zadány do proměnných jako:

North = 50.18;
West = 14.27;
South = 50.1;
East = 14.48.

Pro účely tohoto příkladu bude horním vertikálním omezením této oblasti zvolena výška 3000 ft. Ta je zadána do proměnné *FL* jako hodnota 30.

```
%% Definování obdélníkové oblasti zájmu

    North=50.18;    %RWY24
    West=14.27;
    South=50.1;
    East=14.48;


    FL=30;
```

Obrázek 6: Definování oblasti zájmu v programu UnstabilizedApproach2.m.

Hodnota kritéria stabilizovaného přiblížení je zadána do proměnné *kriterium*. Protože je vertikální rychlost dekódována v násobcích 64 (viz rovnice 1), je v tomto příkladě použita hodnota 1024 ft/min.

Po spuštění programu *UnstabilizedApproach2.m* program nejprve zjišťuje, která letadla se v této oblasti nacházejí. Jejich adresy jsou poté uloženy v matici *OnlyAC*. V tomto případě bylo nalezeno pět letadel.

```
OnlyAC_hex =

  5×1 cell array

    {'407510'}
    {'49D055'}
    {'49D095'}
    {'49D14C'}
    {'49D369'}
```

Obrázek 7: ICAO adresy letadel nalezených v oblasti zájmu (po převedení zpět do hexadecimální soustavy).

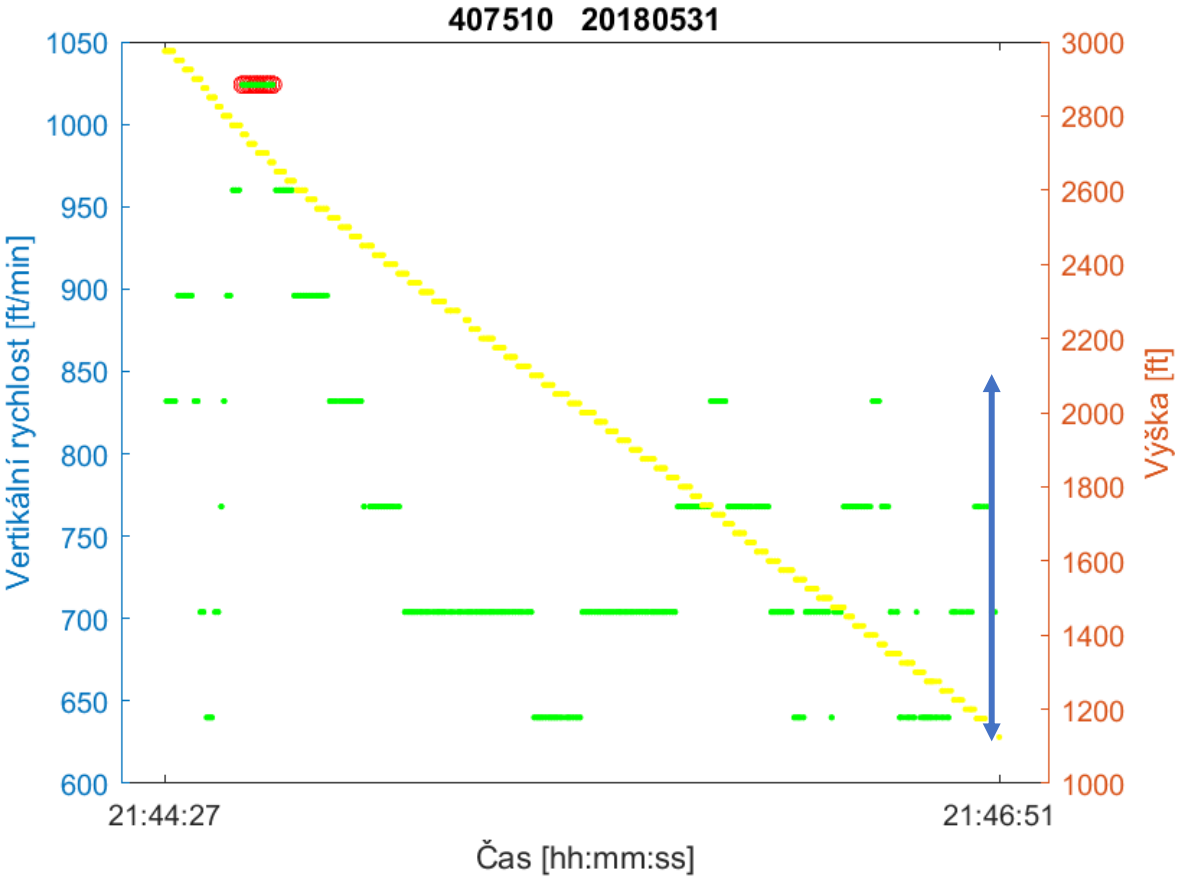
Dále již program postupně pracuje pouze s daty, která se týkají těchto letadel. Ve výsledku uloží údaje pouze o letadlech: 407510, 49D095, 49D14C a 49D369. Letadlo 49D055 nevykazuje hodnoty vertikální rychlosti vyšší než je kritérium, proto o tomto letadle není záznam uložen.

Nyní může být proveden rozbor uložených záznamů. Následující grafy zobrazují zeleně průběh vertikální rychlosti. Ty hodnoty, které přesahují kritérium, jsou zvýrazněny červeně. Žlutě je zobrazen průběh výšky letu. V názvu grafu je vždy ICAO adresa letadla a datum pořízení záznamu, ze kterého je vyhodnocení prováděno, tedy také datum letu. Časový průběh na ose x je znázorněn časovou stopou zprávy, která je přidělena operačním systémem při přijetí záznamu.

2.11.2.1 Vyhodnocení

Letadlo 407510

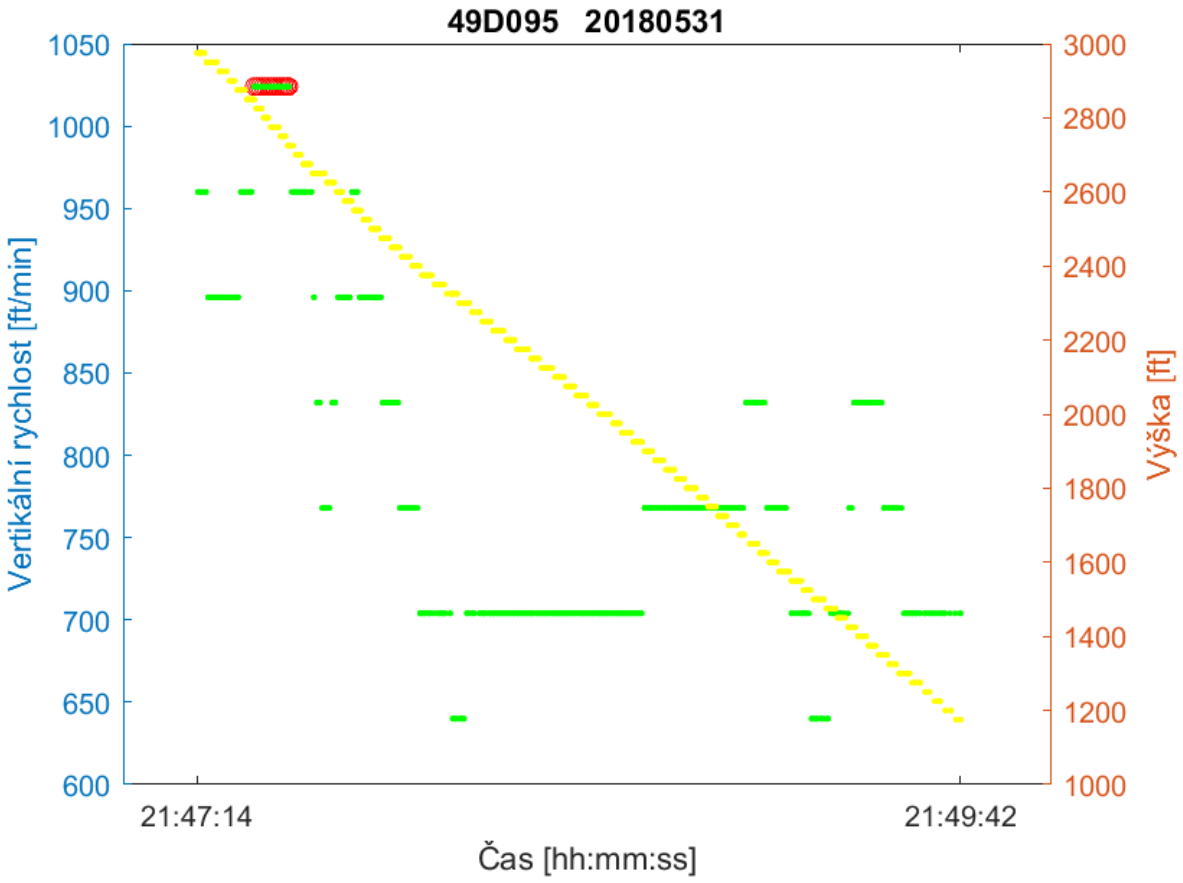
Ze zobrazeného grafu je patrné, že letadlo s ICAO adresou 407510 vykazuje vertikální rychlost přesahující kritérium pouze mezi výškami 2800 ft a 2600 ft. Nedochází tak k porušení kritéria pod výškou pro stabilizované přiblížení, která je 1000 ft na prahem dráhy. Tato výška je znázorněna modrou šipkou.



Obrázek 8: Průběh vertikální rychlosti a výšky letu letadla 407510.

Letadlo 49D095

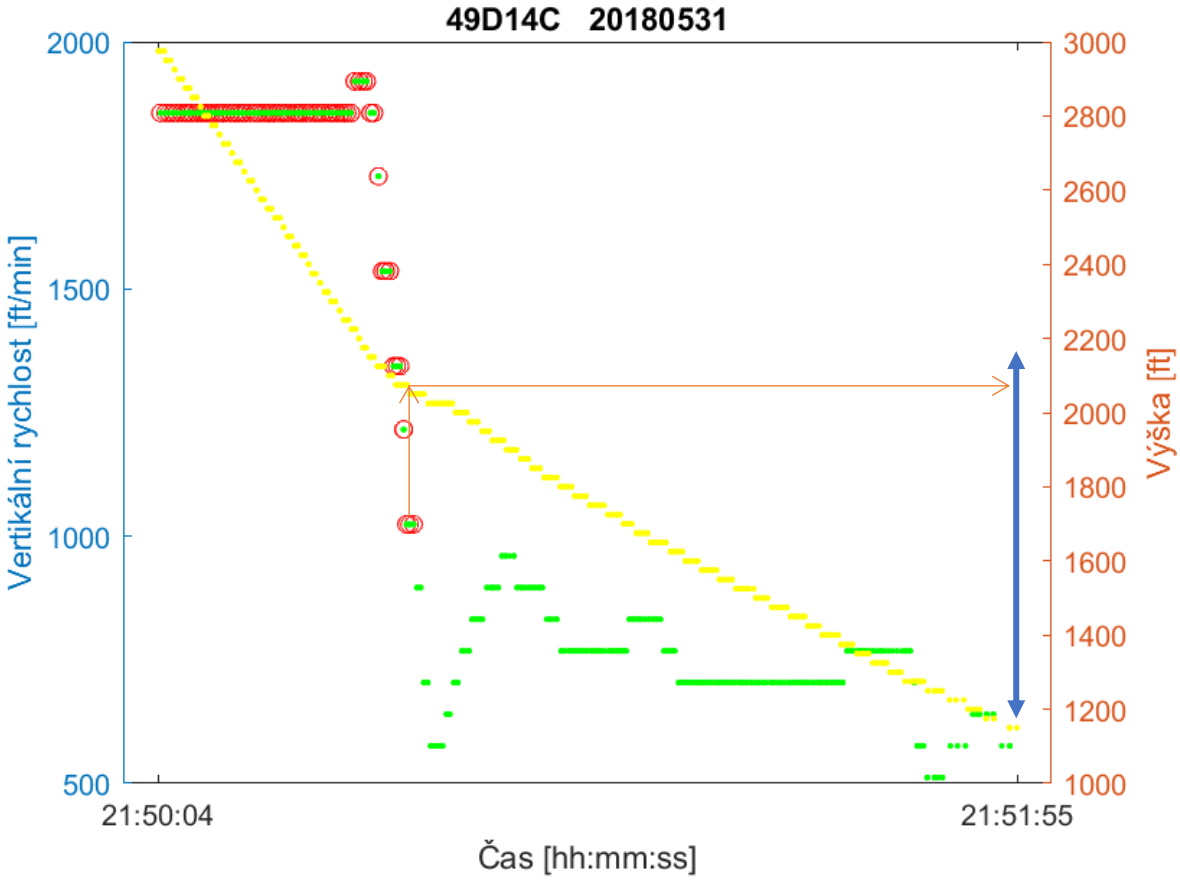
Ze zobrazeného grafu je patrné, že letadlo s ICAO adresou 49D095 vykazuje vertikální rychlost přesahující kritérium pouze mezi výškami 2900 ft a 2700 ft. Nedochází tak k porušení kritéria pod výškou pro stabilizované přiblížení, která je 1000 ft na prahem dráhy.



Obrázek 9: Průběh vertikální rychlosti a výšky letu letadla 49D095.

Letadlo 49D14C

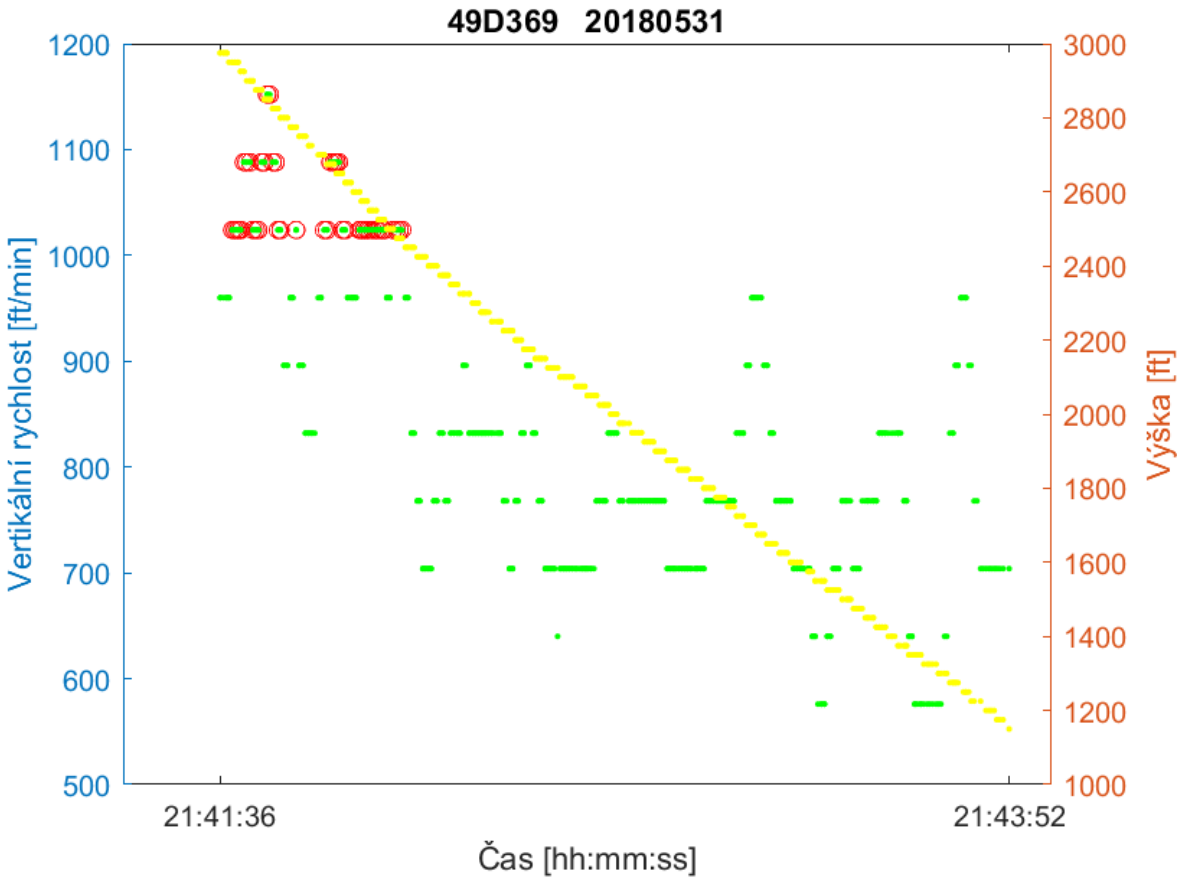
Ze zobrazeného grafu je patrné, že letadlo s ICAO adresou 49D14C vykazuje vertikální rychlost přesahující kritérium mezi výškami 3000 ft a 2100 ft. Dochází tak k porušení kritéria pod výškou pro stabilizované přiblížení, která je 1000 ft na prahem dráhy. Tato výška je znázorněna modrou šipkou. Oranžové šipky směřují k výšce, ve které letadlo vykazovalo poslední vertikální rychlost vyšší, než je kritérium. **Toto přiblížení je tedy nestabilizované**.



Obrázek 10: Průběh vertikální rychlosti a výšky letu letadla 49D14C.

Letadlo 49D369

Ze zobrazeného grafu je patrné, že letadlo s ICAO adresou 49D369 vykazuje vertikální rychlost přesahující kritérium pouze mezi výškami 2900 ft a 2400 ft. Nedochází tak k porušení kritéria pod výškou pro stabilizované přiblížení, která je 1000 ft na prahem dráhy.



Obrázek 11: Průběh vertikální rychlosti a výšky letu letadla 49D369.

2.11.2.2 Shrnutí

V této části byl na konkrétním příkladu představen program pro vyhodnocení, zda je přiblížení letadla stabilizované. Z daných vstupních dat ze 31. května 2018 mezi 2140 UTC a 2200 UTC bylo nalezeno pět letadel v oblasti zájmu, ze kterých čtyři letadla vykazují vertikální rychlost vyšší než je daná hodnota kritéria pro stabilizované přiblížení. Pouze jedno letadlo ale toto kritérium porušuje i pod výškou stabilizovaného přiblížení (1000 ft nad prahem dráhy). Toto letadlo s ICAO adresou 49D14C provedlo nestabilizované přiblížení.

Snížením horní hranice oblasti zájmu v proměnné *FL* na 22 by pak program opravdu zobrazil jen letadla, která nejsou stabilizovaná pod výškou stabilizovaného přiblížení. Je však potřeba brát v úvahu, že výška z ADS-B zpráv je v tomto případě tlaková výška vztažená ke tlaku

standardní atmosféry. Proto podle grafů letadla přistála ve výšce 1150 ft, ale nadmořská výška prahu RWY24 je 1202 ft.

3 Vyhodnocení integrity polohové informace

Důležitou vlastností každého systému je jeho integrita. Tedy schopnost včas rozpoznat chybné vstupní informace, které mohou způsobit nesprávné fungování celého systému. V případě polohových informací zpracovávaných ADS-B systémem musí být známa kategorie integrity navigace. Těchto kategorií je dvanáct a pro každou z nich je definován poloměr R_C. Tento poloměr určuje kruh, mimo který se skutečná poloha letadla může nacházet s pravděpodobností danou hodnotou úrovně integrity zdroje (SIL – Source Integrity Level). Podle [15] je hodnota SIL stanovena na základě off-line analýz instalovaného systému pro určování polohy a je neměnná.

Tabulka 11: Kategorie navigační integrity a Type Code, který je charakterizuje. [12]

	Poloměr R_C	**Type Code**	**Bit 40 záznamu**
NIC0	R_C neznámý	18, 22	0
NIC1	R_C < 20 NM (31,04 km)	17	0
NIC2	R_C < 8 NM (14,816 km)	16	0
NIC3	R_C < 4 NM (7,408 km)	16	1
NIC4	R_C < 2 NM (3,704 km)	15	0
NIC5	R_C < 1 NM (1852 m)	14	0
NIC6	R_C < 0,6 NM (1111,2 m)	13	1
	R_C < 0,5 NM (926 m)	13	0
NIC7	R_C < 0,2 NM (370,4 m)	12	0
NIC8	R_C < 0,1NM (185,2 m)	11	0
NIC9	R_C < 75 m	11	1
NIC10	R_C < 25 m	10, 21	0
NIC11	R_C < 7,5 m	9, 20	0

Dokument ADS-B Implementation and Operations Guidance Document [14] uvádí, že pokud jsou polohové údaje z kategorie navigační integrity 6 nebo nižší, tak poskytovaná data nemají srovnatelnou kvalitu s daty, která by byla získána sekundárním radarem.

V následující části bude představen autorem vytvořený program, který zjišťuje procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity v rámci zpracovávaných dat. Kromě toho také umožní vykreslení vzdušné situace v mapě. Z těchto výstupů je cílem vyhodnotit, zda nad Českou republikou existuje místo, ve kterém letadla vykazují sníženou integritu svých polohových dat, což by mohlo být dáno externím vlivem (př. rušička GNSS).

Tabulka 12: Hodnota úrovně integrity zdroje a bity, kterými ji lze dekódovat. Pro Type Code 29 jde o bity 77 a 78, pro Type Code 31 jde o bity 83 a 84.

Pravděpodobnost překročení poloměru R_C bez indikace	SIL binárně	SIL decimálně
neznámá	00	0
≤ 1 x 10^{-3} za hodinu letu nebo za naměřený vzorek	01	1
≤ 1 x 10^{-5} za hodinu letu nebo za naměřený vzorek	10	2
≤ 1 x 10^{-7} za hodinu letu nebo za naměřený vzorek	11	3

3.1 Program pro vyhodnocení integrity polohové informace

Pro vyhodnocení integrity polohové informace z přijatých zpráv je stejně jako v předchozím programu pro vyhodnocení stabilizovaného přiblížení nejprve nutné z celého datového souboru obsahujícího přijaté záznamy vybrat jen ty, které obsahují ADS-B zprávy, tedy záznamy sestupného datového spoje 17, a tyto zprávy dále převést do binární soustavy. Pro tento účel byl vytvořen program *PositionIntegrity1.m*, který je totožný s programem *UnstabilizedApproach1.m*. Program tedy načítá všechny přijaté záznamy ze složky *Archiv* a vybírá z nich pouze ty záznamy, které obsahují ADS-B zprávu a převede je do binární soustavy. V případě nalezení chybných nebo neúplných zpráv dochází k jejich odstranění. Binární záznamy ADS-B zpráv jsou pak uloženy jako matice *MsgBin*, kterou lze načíst dalšími programy pro následnou práci. Tyto kroky jsou znázorněny ve zjednodušeném vývojovém diagramu na obrázku 3.

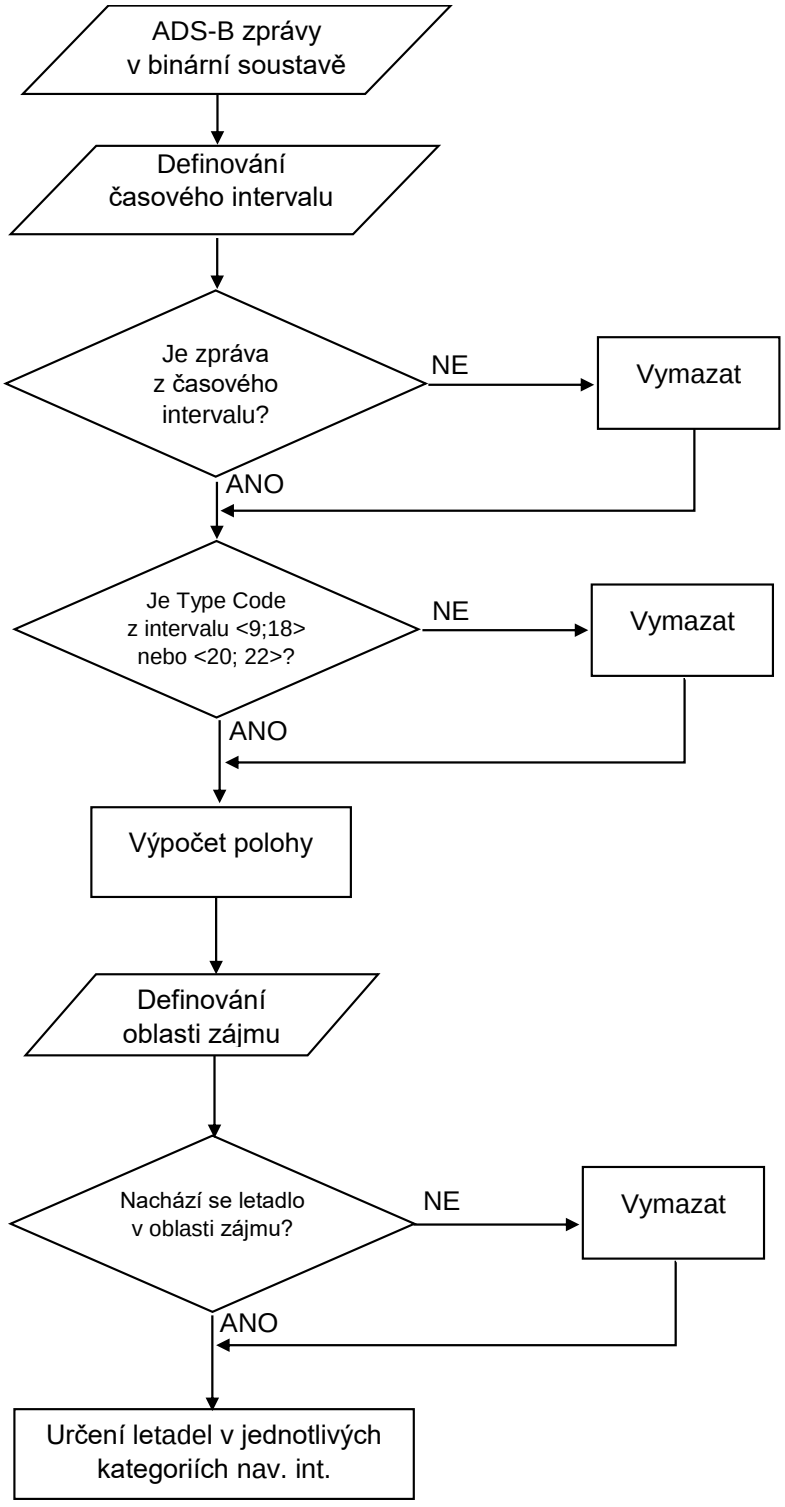
Samotné vyhodnocování integrity pak probíhá v programu *PositionIntegrity2.m*. Ten načítá matici se záznamy ADS-B zpráv v binární soustavě *MsgBin*. Pokud si uživatel přeje pracovat pouze se zprávami z určitého časového intervalu, definuje tento časový interval do proměnných Time1 (čas, od kterého chce uživatel zprávy vybrat) a Time2 (čas, do kterého chce uživatel zprávy vybrat).

Informace o integritě polohové zprávy je obsažena v samotné zprávě, která obsahuje polohovou informaci. Tyto zprávy jsou charakterizovány odlišným Type Code, který pro vzdušné polohové zprávy může nabývat hodnot 9-18 a 20-22. Kategorie navigační integrity je pak určena podle toho, jaký Type Code zpráva má.

V případě, že dvě různé kategorie navigační integrity jsou charakterizovány stejným Type Code, je potřeba k jejich odlišení použít 40. bit záznamu.

Program na základě bitů 33 až 37 (které definují Type Code zprávy) vybere pouze přijaté zprávy o vzdušné poloze a roztřídí je do příslušných kategorií navigační integrity. Pro každou tuto kategorii pak zvlášť ze zprávy vypočítá polohu. Vypočítané hodnoty zeměpisných

souřadnic a výšky jsou uloženy v maticích P0 až P11, kde číslo v názvu matice značí příslušnou kategorii navigační integrity. V maticích PS0 až PS11 jsou pak zachovány jen ty souřadnice, které se nacházejí uvnitř oblasti definované nejsevernějším, nejjižnějším, nejvýchodnějším a nejzápadnějším bodem České republiky. Tyto souřadnice jsou pak vykresleny v mapě.



Obrázek 12: Zjednodušený vývojový diagram programu pro zjištění kategorie navigační integrity.

Program také umí zjistit, která letadla poskytují informace o své poloze v dané kategorii navigační integrity. Jejich ICAO adresy jsou uloženy v maticích AC_0 až AC_11 (číslo opět určuje, o kterou kategorii navigační integrity jde). Zjednodušený vývojový diagram tohoto programu je zobrazen na obrázku 12.

Hodnoty SIL jsou letadly vysílány ve zprávách s Type Code 29 (bity 77 a 78) nebo 31 (bity 83 a 84). Matice *AC_SIL* obsahuje vždy adresu letadla a jeho SIL v decimálním formátu. Ve třetím sloupci 0 indikuje, že pravděpodobnost vyplývající ze SIL je za hodinu letu. Pokud je ve třetím sloupci 1, jde o pravděpodobnost za naměřený vzorek.

3.2 Vyhodnocení integrity polohových informací ze dne 17. března 2019

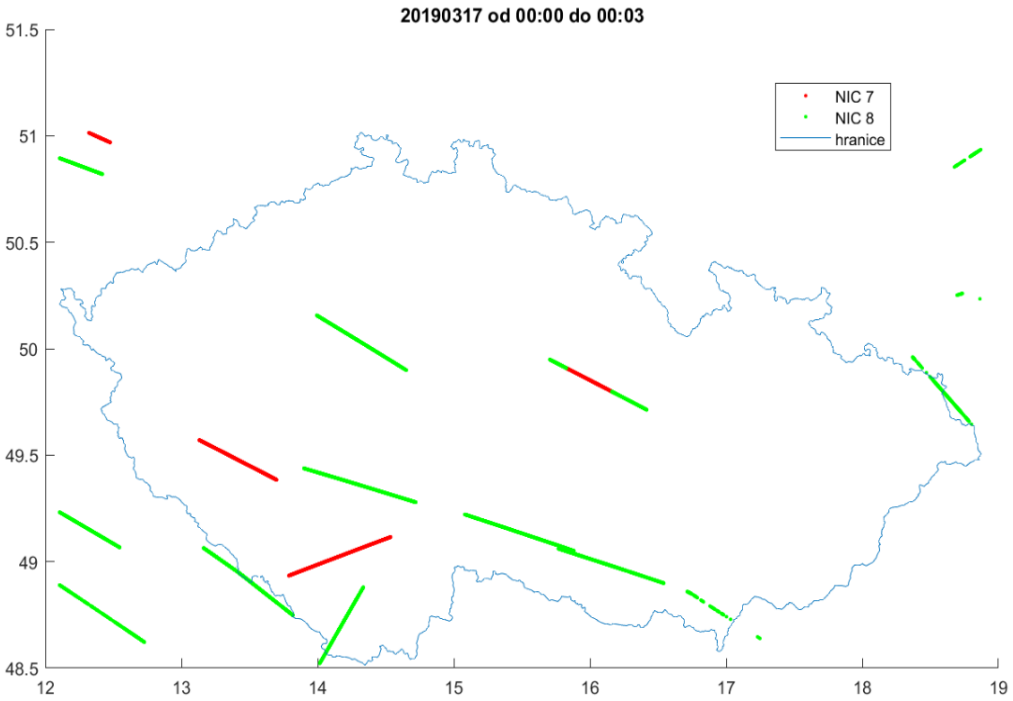
Výše představený program je použit k vyřešení konkrétního příkladu a získání statistiky o příslušných kategoriích navigační integrity přijatých polohových údajů.

Zkoumaná data byla získána dne 17. března 2019. Pro získání přehledu o situaci v průběhu celého dne bude statistika zpracována ze zpráv přijatých vždy v prvních třech minutách po každé sudé celé UTC hodině. Tříminutový interval byl zvolen tak, aby při vykreslování vzdušné situace do mapy nedocházelo k přílišnému překrývání trajektorií letů jednotlivých letadel.

Pro tento účel jsou vybrány následující soubory obsahující záznamy přijaté fakultními přijímači:

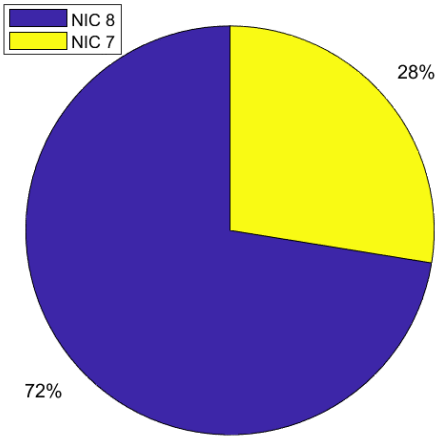
- 1903170000.dat - z toho zprávy přijaté mezi 0000UTC a 0003UTC
- 1903170200.dat - z toho zprávy přijaté mezi 0200UTC a 0203UTC
- 1903170400.dat - z toho zprávy přijaté mezi 0400UTC a 0403UTC
- 1903170600.dat - z toho zprávy přijaté mezi 0600UTC a 0603UTC
- 1903170800.dat - z toho zprávy přijaté mezi 0800UTC a 0803UTC
- 1903171000.dat - z toho zprávy přijaté mezi 1000UTC a 1003UTC
- 1903171200.dat - z toho zprávy přijaté mezi 1200UTC a 1203UTC
- 1903171400.dat - z toho zprávy přijaté mezi 1400UTC a 1403UTC
- 1903171600.dat - z toho zprávy přijaté mezi 1600UTC a 1603UTC
- 1903171800.dat - z toho zprávy přijaté mezi 1800UTC a 1803UTC
- 1903172000.dat - z toho zprávy přijaté mezi 2000UTC a 2003UTC
- 1903172200.dat - z toho zprávy přijaté mezi 2200UTC a 2203UTC.

3.2.1 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 0000 UTC do 0003 UTC



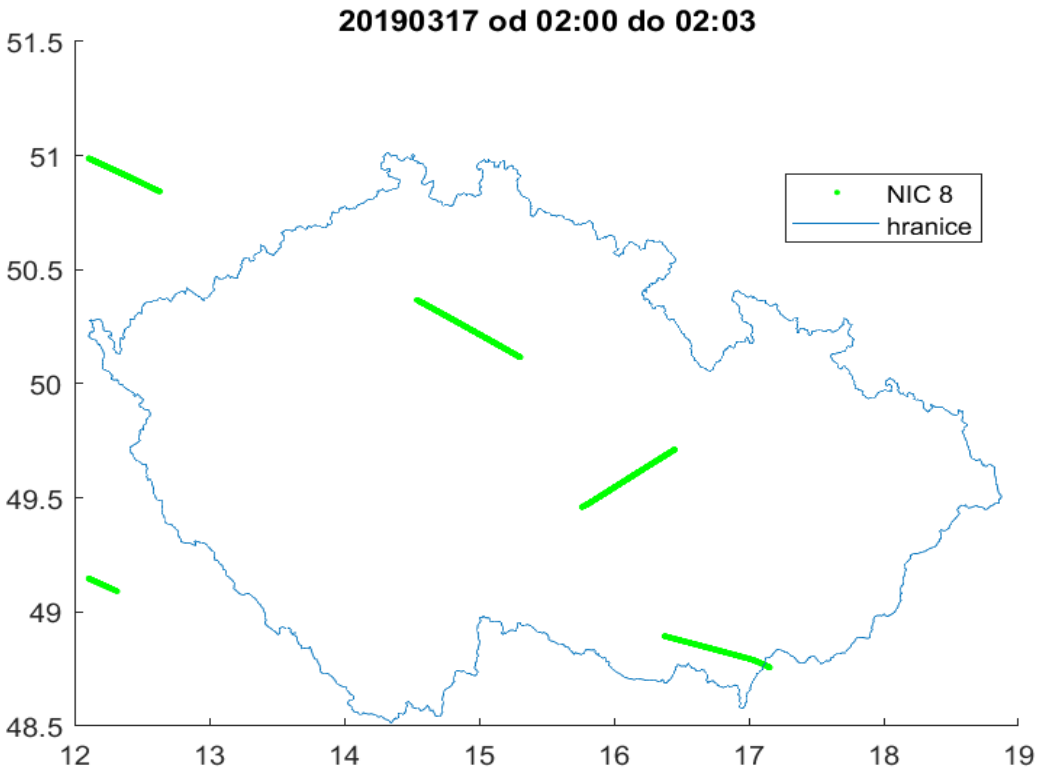
Obrázek 13: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0000 UTC do 0003 UTC.

Ve zkoumaném nočním období se nad Českou republikou nachází 17 letadel a informace, které o své poloze poskytují, spadají do kategorie navigační integrity 7 (28 %) a 8 (72 %).



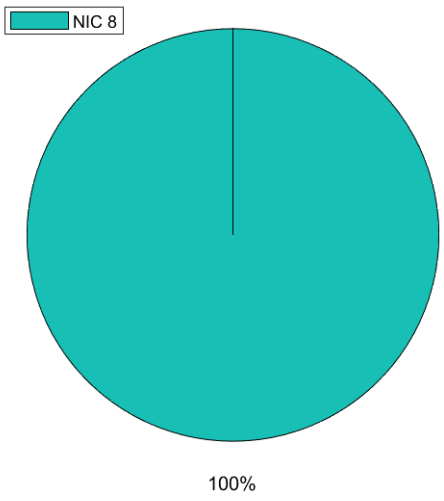
Obrázek 14: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0000 UTC do 0003 UTC.

3.2.2 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 0200 UTC do 0203 UTC



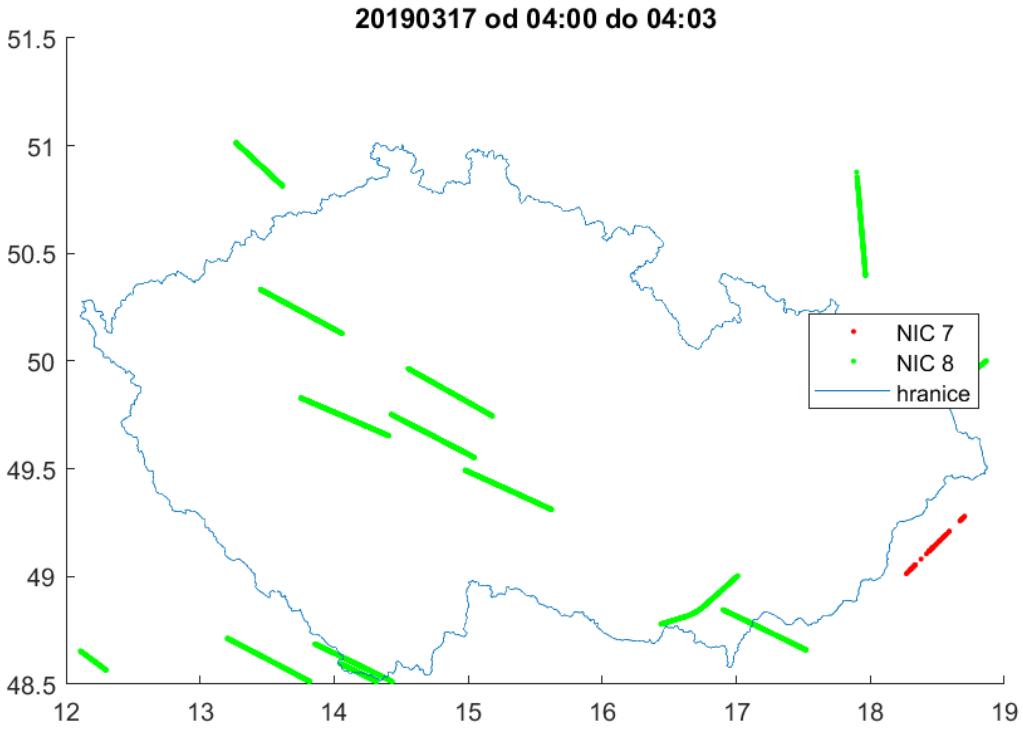
Obrázek 15: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0200 UTC do 0203 UTC.

Ve zkoumaném tříminutovém intervalu po 0200 UTC se ve vzdušném prostoru nad Českou republikou nacházelo pět letadel. Všechny polohové zprávy zaznamenané přijímači v tuto dobu spadají do kategorie navigační integrity 8.



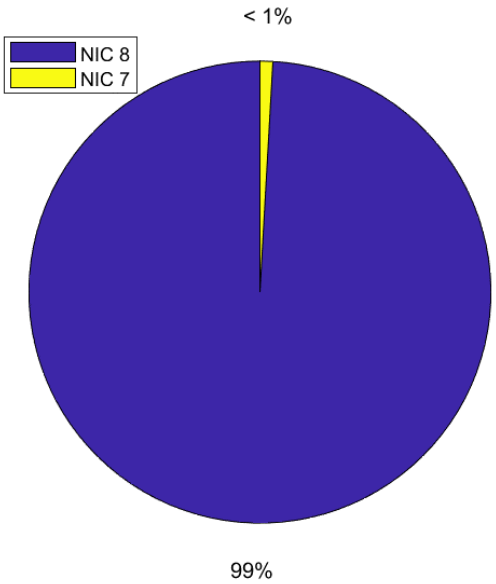
Obrázek 16: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0200 UTC do 0203 UTC.

3.2.3 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 0400 UTC do 0403 UTC



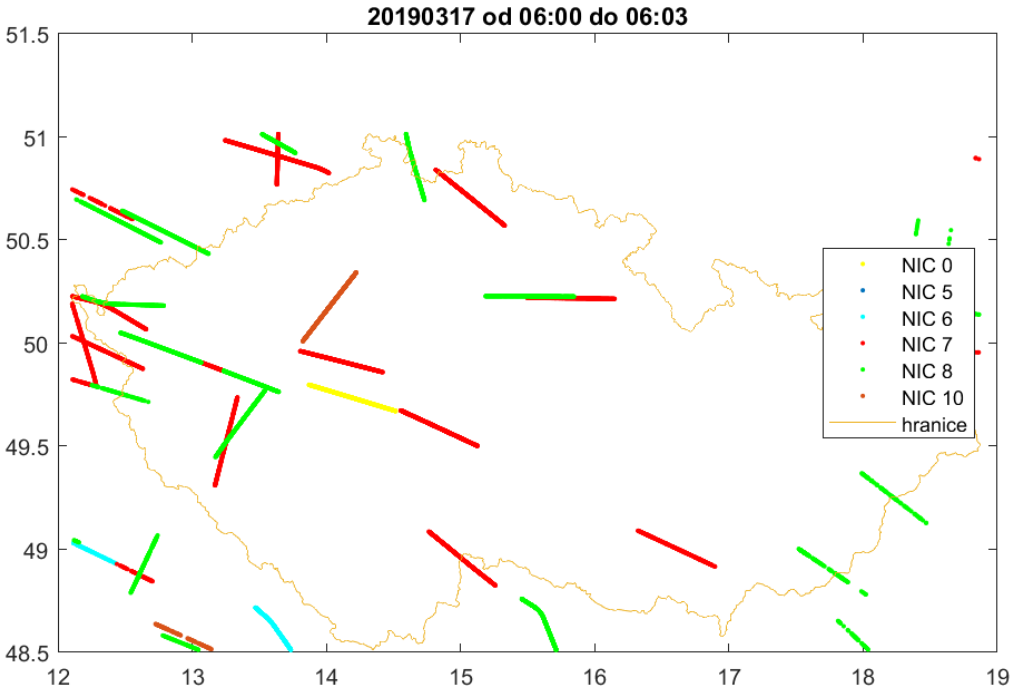
Obrázek 17: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0400 UTC do 0403 UTC.

V tříminutovém intervalu po 0400 UTC se nad Českou republikou nacházelo 15 letadel. Polohové informace přijaté v této době spadají z více než 99 % do kategorie 8 a pouze méně než 1 % spadá do kategorie 7.



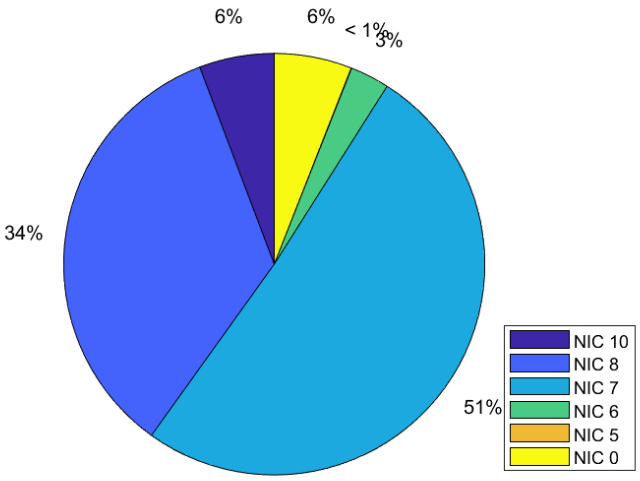
Obrázek 18: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0400 UTC do 0403 UTC.

3.2.4 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 0600 UTC do 0603 UTC



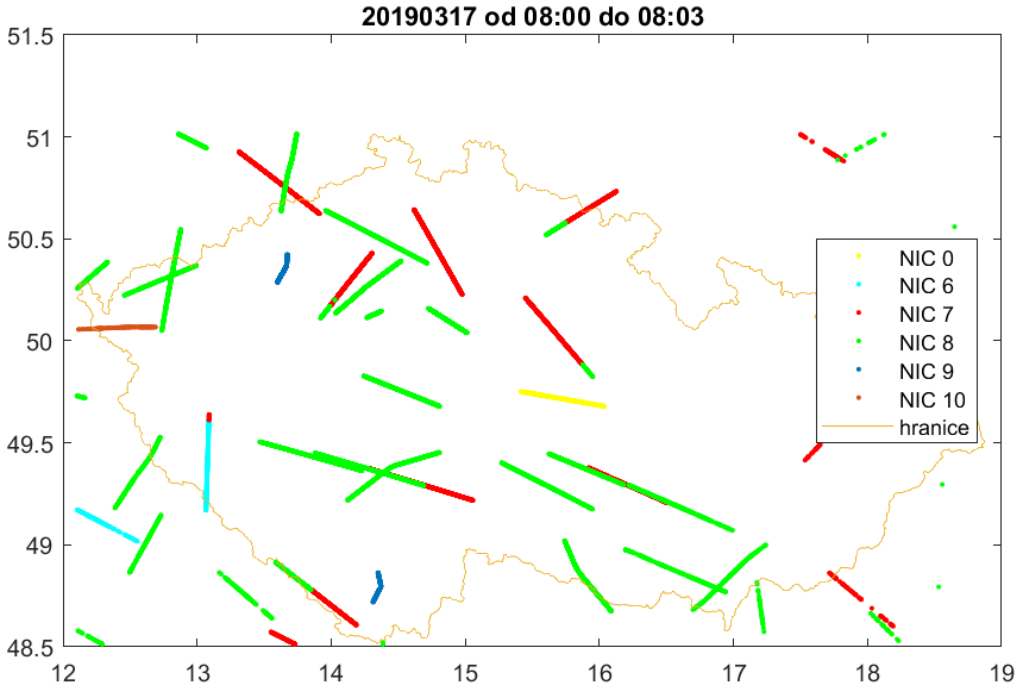
Obrázek 19: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0600 UTC do 0603 UTC.

V období tří minut po 0600 UTC provoz vzrostl a došlo k zaznamenání letů 41 letadel. Téměř 51 % polohových údajů spadá do kategorie 7. Dochází k zaznamenání údajů, které spadají do kategorií 6, 5 a 0. Tyto polohové údaje by neměly být použity pro zajištění rozstupů mezi letadly. V kategorii 6 jde o letadla 40075B (A330) a 48418B (B739). V kategorii 5 jde o letadlo 4841A9 (B738) a v kategorii 0 jde o letadlo 600BC0 (A346).



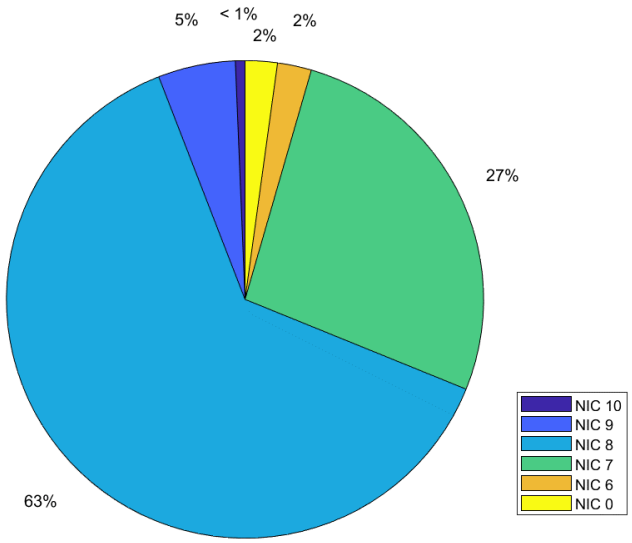
Obrázek 20: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0600 UTC do 0603 UTC.

3.2.5 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 0800 UTC do 0803 UTC



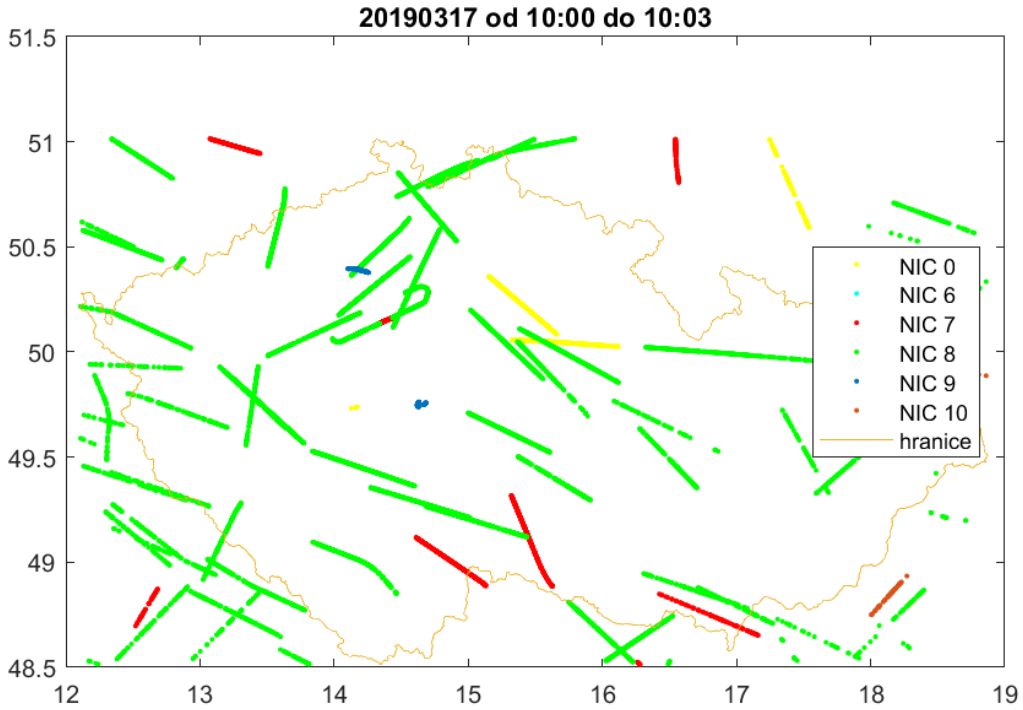
Obrázek 21: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0800 UTC do 0803 UTC.

V intervalu tří minut po 0800 UTC došlo k zaznamenání letů 53 letadel. Do kategorie navigační integrity 8 spadá nejvíce přijatých polohových informací – 63 %. Informace z kategorie 6 poskytují letadla 02A1CC (B736) a 4C0220 (A332), z kategorie 0 pak letadlo 4A09A2 (B738).



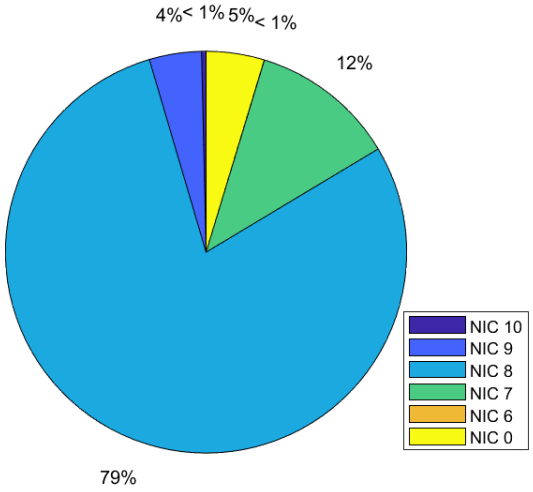
Obrázek 22: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0800 UTC do 0803 UTC.

3.2.6 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 1000 UTC do 1003 UTC



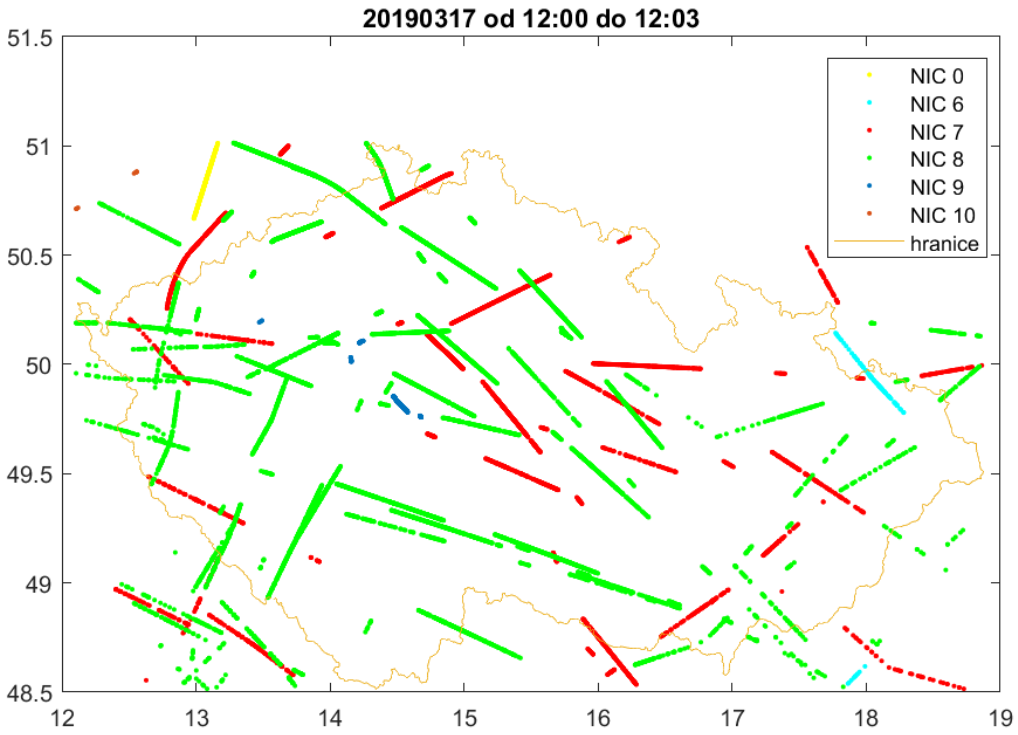
Obrázek 23: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1000 UTC do 1003 UTC.

Ve sledovaném období po 1000 UTC byly zaznamenány lety 89 letadel. Do kategorie navigační integrity 8 spadá 79 % polohových dat. V kategorii 6 poskytuje informace letadlo 495284 (A319), v kategorii 0 pak letadla 49C0F8 (TL-2000 Sting), 4A08E5 (B733), 4BD14A (B738), 5083DB (B734).



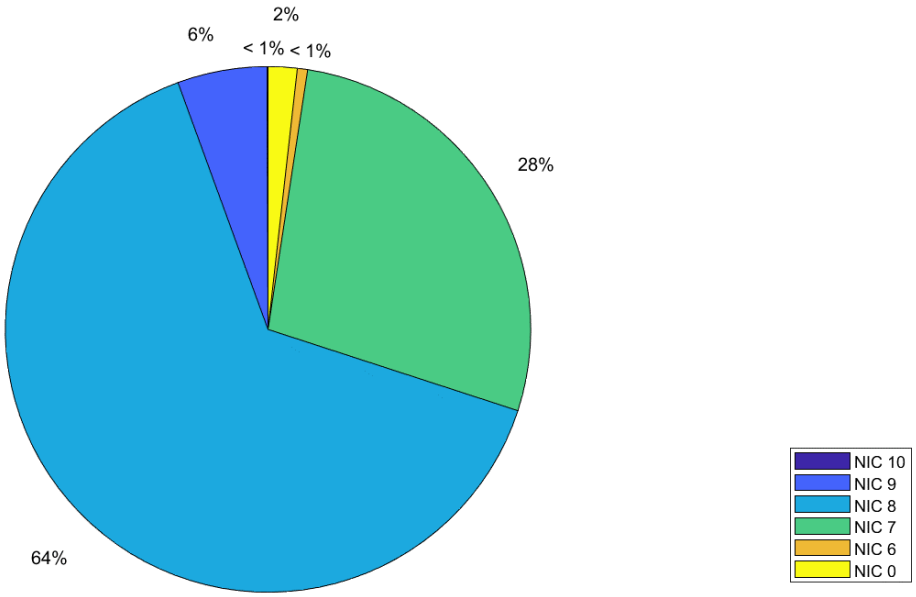
Obrázek 24: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1000 UTC do 1003 UTC.

3.2.7 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 1200 UTC do 1203 UTC



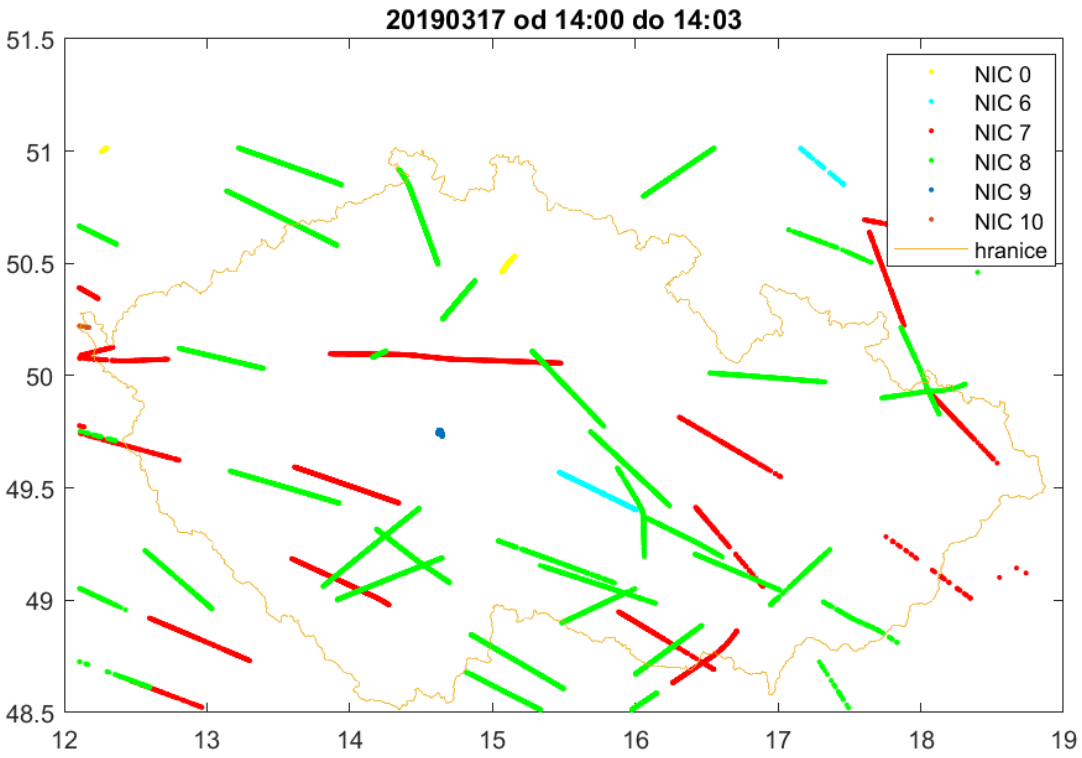
Obrázek 25: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1200 UTC do 1203 UTC.

V intervalu tří minut po 1200 UTC byly zaznamenány lety 96 letadel. Do kategorie navigační integrity 8 spadá 64 % zaznamenaných polohových údajů. V kategorii 6 poskytují svá data letadla 4B8E10 (B738) a 7805F6 (A332). V kategorii 0 pak letadlo 3C6613 (A320).



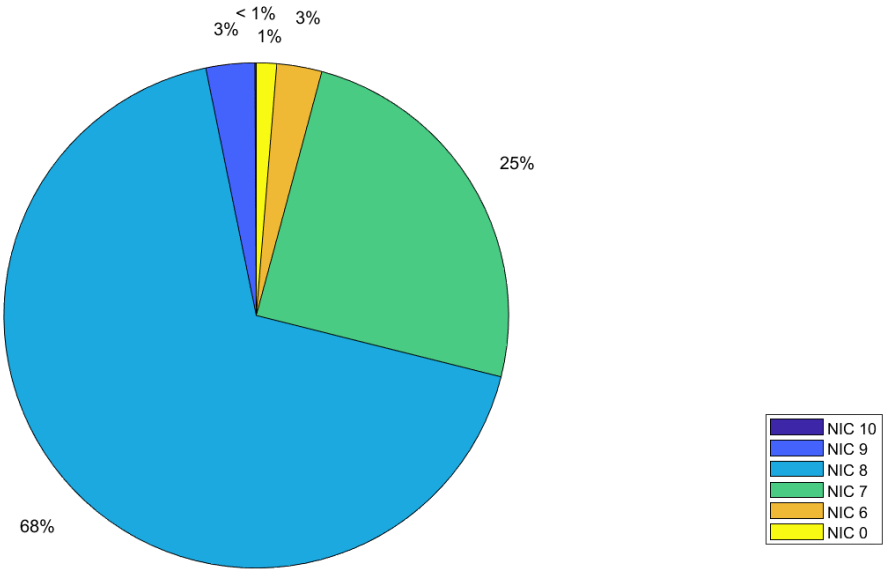
Obrázek 26: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1200 UTC do 1203 UTC.

3.2.8 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 1400 UTC do 1403 UTC



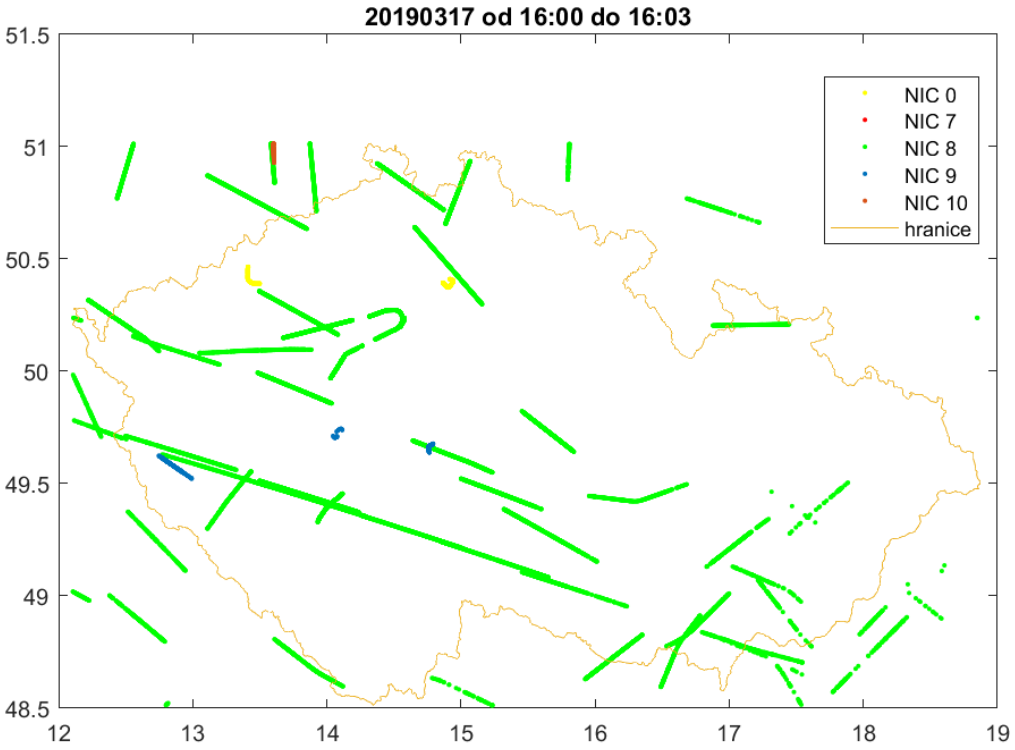
Obrázek 27: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1400 UTC do 1403 UTC.

Ve sledovaném období po 1400 UTC byly zaznamenány lety 63 letadel. Nejvíce poskytnutých polohových dat spadá do kategorie 8 – téměř 68 %. V kategorii 6 poskytují data letadla 4844C6 (B738) a 738062 (B738). V kategorii 0 pak letadla 49C179 (NG-5 Bristell) a 502C2F (B735).



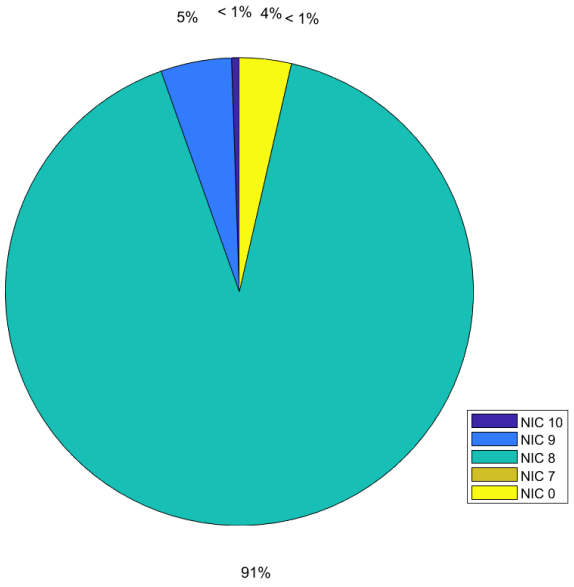
Obrázek 28: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1400 UTC do 1403 UTC.

3.2.9 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 1600 UTC do 1603 UTC



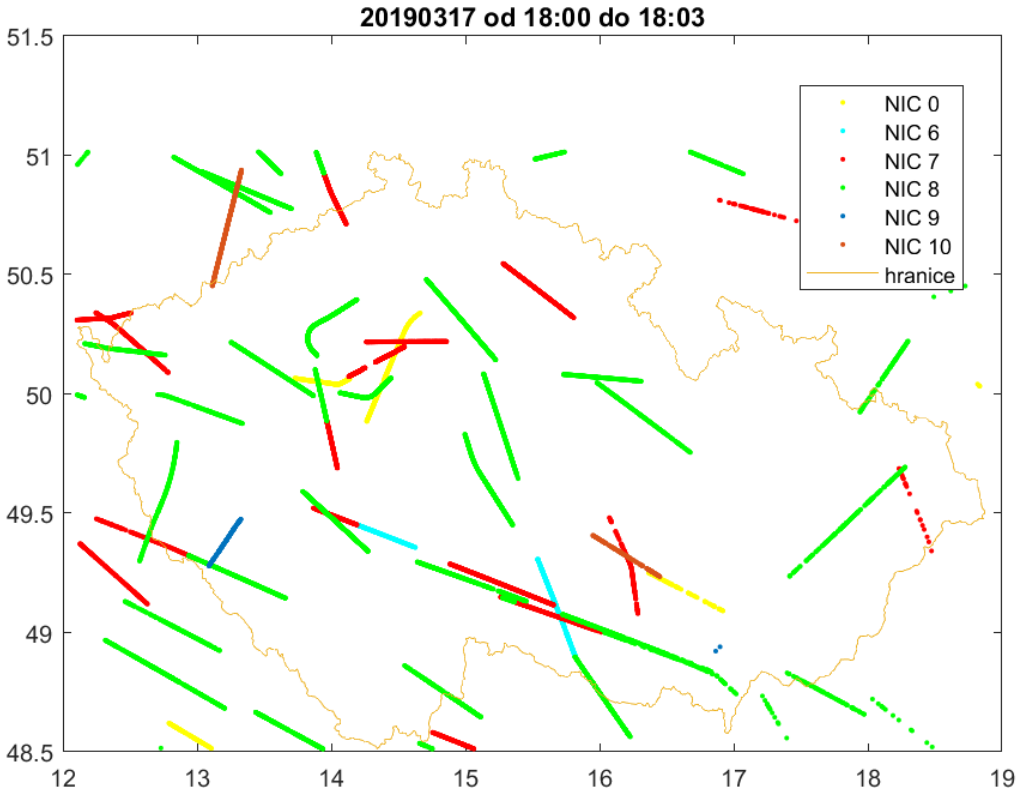
Obrázek 29: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1600 UTC do 1603 UTC.

Během tří minut po 1600 UTC byly zaznamenány lety 65 letadel. Ze zaznamenaných polohových údajů spadá 91 % do kategorie navigační integrity 8. V kategorii 0 poskytují informace letadla 49C179 (NG-5 Bristell) a 49C1FB (NG-5 Bristell).



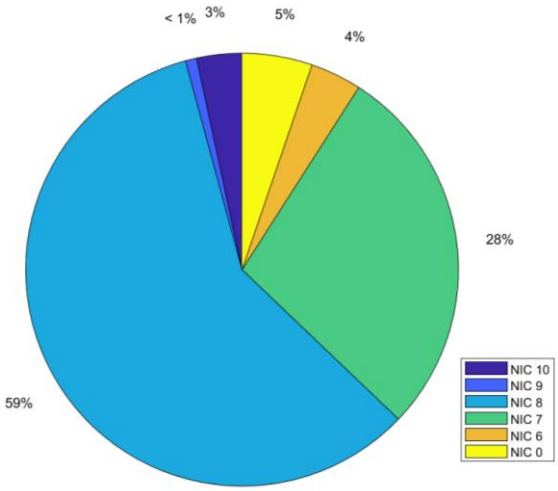
Obrázek 30: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1600 UTC do 1603 UTC.

3.2.10 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 1800 UTC do 1803 UTC



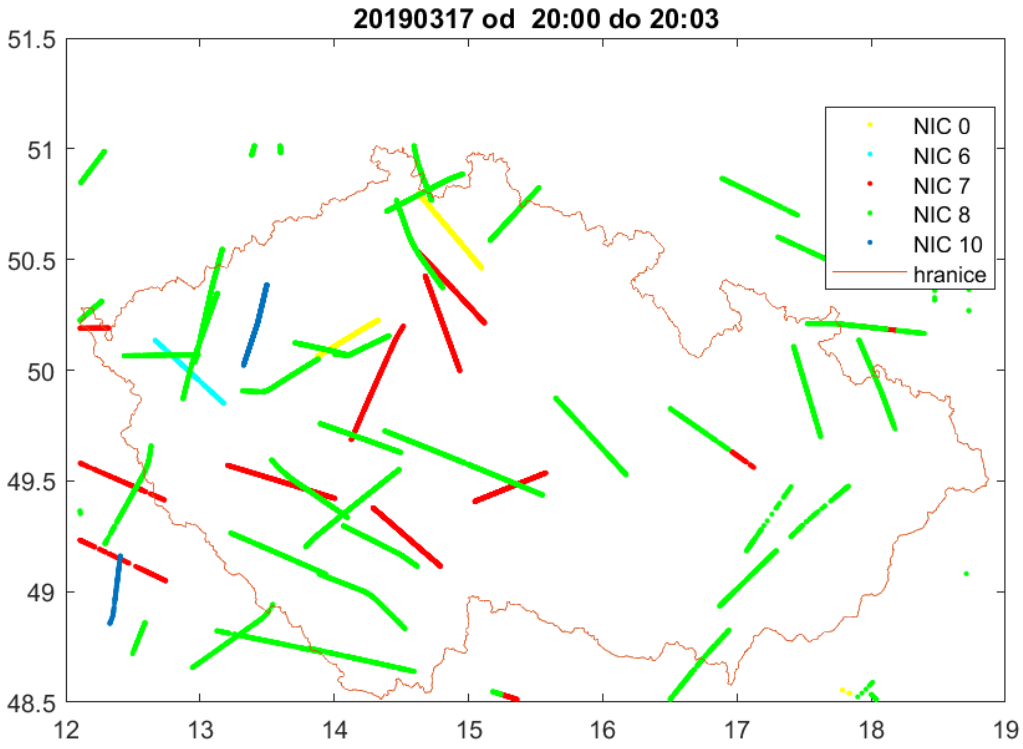
Obrázek 31: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1800 UTC do 1803 UTC.

V intervalu tří minut po 1800 UTC byly zaznamenány lety 66 letadel. Do kategorie navigační integrity 8 spadá 59 % zaznamenaných polohových údajů. V kategorii 6 poskytují informace letadla 3C49EA (B753), 44022D (A320) a 4A08E9 (B737). V kategorii 0 pak letadla 06A19D (B777), 3C4DCD (CRJ9), 400A12 (B733), 4BD8AC (A310), 505CE6 (B738).



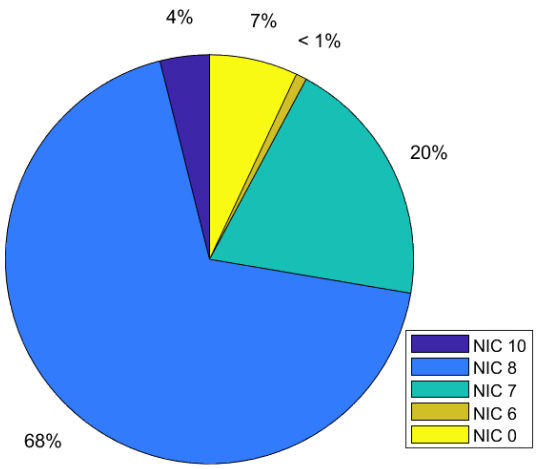
Obrázek 32: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1800 UTC do 1803 UTC.

3.2.11 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 2000 UTC do 2003 UTC



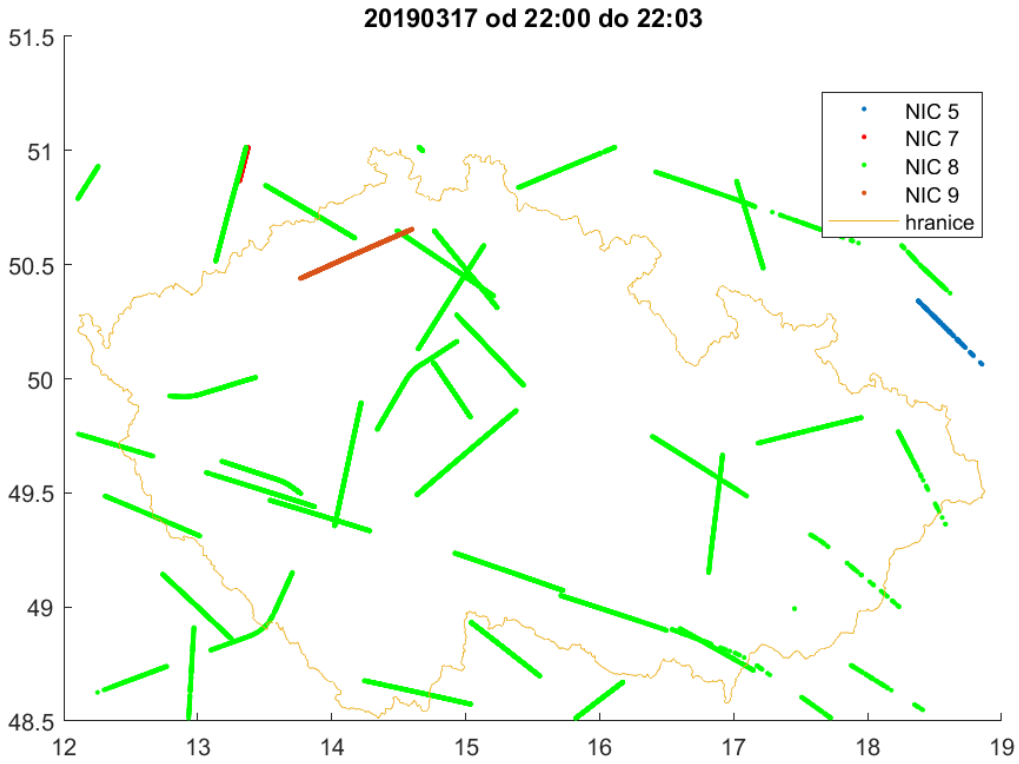
Obrázek 33: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 2000 UTC do 2003 UTC.

V intervalu tří minut po 2000 UTC byly zaznamenány lety 64 letadel. Do kategorie navigační integrity 8 spadá 68 % zaznamenaných polohových údajů. V kategorii 6 poskytuje informace letadlo 44022B (A320), v kategorii 0 pak letadla 49D2B9 (B737), 4A05A1 (B735) a 4BD14A (B738).

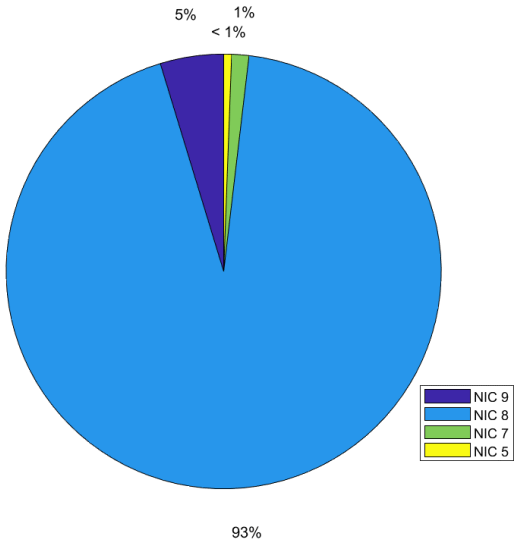


Obrázek 34: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 2000 UTC do 2003 UTC.

3.2.12 Vyhodnocení záznamu ze 17. března 2019 od 2200 UTC do 2203 UTC



Obrázek 35: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 2200 UTC do 2203 UTC.



Obrázek 36: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 2200 UTC do 2203 UTC.

V intervalu tří minut po 2200 UTC byly zaznamenány lety 45 letadel. Do kategorie navigační integrity 8 spadá 93 % zaznamenaných polohových údajů. V kategorii 5 poskytuje informace letadlo 4BBC82 (A320).

3.2.13 Shrnutí

Byla provedena analýza dat ze 17. března 2019 a vytvořena statistika kategorií navigační integrity, do kterých spadají polohové zprávy přijaté vždy v intervalu tří minut po každé sudé celé UTC hodině. Procentuální vyjádření kategorií shrnuje tabulka 13. Z tabulky je patrné, že nejvíce přijatých polohových informací patří do kategorie navigační integrity 8. Pouze po 0600UTC bylo přijato nejvíce zpráv z kategorie 7.

V kategoriích 6 a nižších (tedy kategoriích, z nichž polohové informace nejsou vhodné k použití pro zajišťování rozstupů mezi letadly) jsou jen malá procenta všech přijatých polohových údajů.

Při analýze zaznamenaných zpráv ze dne 17. března 2019 nebylo nalezeno místo, ve kterém by letadla vykazovala vlivem externích faktorů degradaci integrity svých polohových dat.

Tabulka 13: Procentuální poměr polohových údajů v jednotlivých kategoriích navigační integrity (údaje ze zpráv přijatých v prvních třech minutách po každé celé sudé UTC hodině).

	Procentuální vyjádření kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019											
UTC	*0000*	*0200*	*0400*	*0600*	*0800*	*1000*	*1200*	*1400*	*1600*	*1800*	*2000*	*2200*
NIC0				6	2	5	2	1,3	4	5	7	
NIC1												
NIC2												
NIC3												
NIC4												
NIC5				0,1								1
NIC6				3	2	0,01	0,9	2,9		4	1	
NIC7	28		0,9	50,9	27	11,7	28	24,7	0,01	28	20	1
NIC8	72	100	99,1	34	63	79	64	67,9	91	59	68	93
NIC9					5	4	5	3,1	5	1		5
NIC10				6	1	0,29	0,1	0,1	0,39	3	4	
NIC11												

4 Vytváření záznamů o příletech a odletech

Třetí část této diplomové práce se zabývá vytvořením programu, který na základě přijatých ADS-B zpráv vytvoří záznamy o letadlech, která na dané letiště přiletěla, a která z něj odletěla. Tyto záznamy mají obsahovat informace:

- ICAO adresu letadla;
- kategorii letadla;
- volací znak nebo imatrikulaci;
- zda jde o přílet nebo odlet;
- datum a čas příletu nebo odletu.

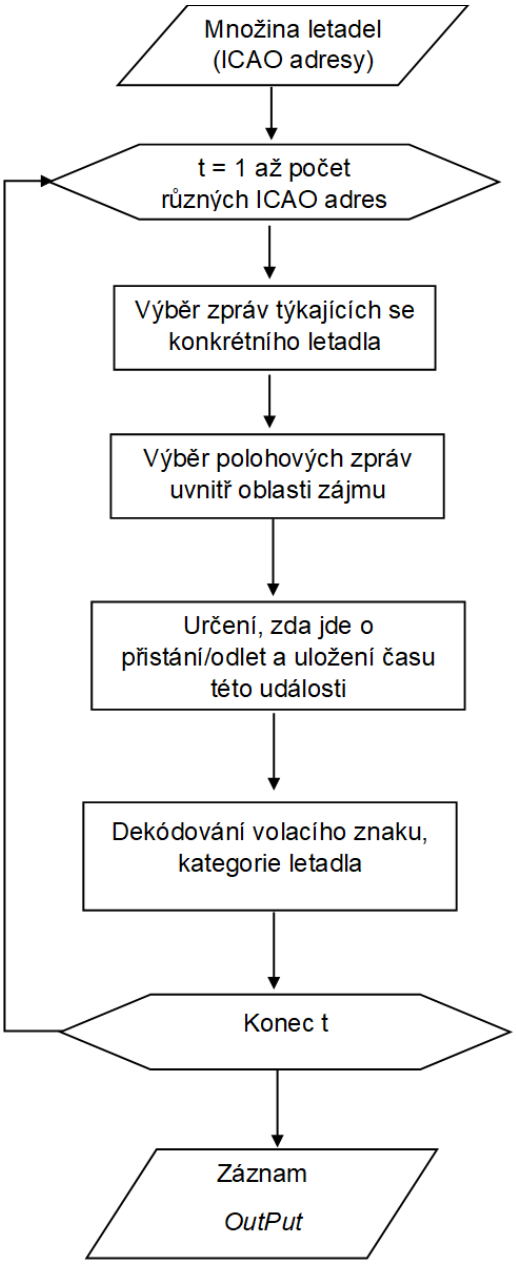
Autor se domnívá, že o takovýto program pro vytváření záznamů by mohla projevit zájem některá letiště disponující vlastním ADS-B přijímačem.

Pro načtení datového souboru s přijatými daty a následného vybrání ADS-B zpráv a jejich převedení do binární soustavy je vytvořen program *Zaznamovani1.m*. Tento program je totožný s programy *UnstabilizedApproach1.m* a *PositionIntegrity1.m.* Jeho zjednodušený vývojový diagram je zobrazen na obrázku 3.

Pro vytvoření samotného záznamu je vytvořen program *Zaznamovani2.m*. Ten načítá binární matici *MsgBin*, která obsahuje všechny ADS-B zprávy z původního datového souboru, a matici *Unix_time*. Nejprve je potřeba určit, která letadla se nacházejí v okolí oblasti zájmu, tedy v okolí letiště. Tato oblast zájmu je horizontálně definovaná proměnnými *North*, *West*, *South*, *East* a vertikálně proměnnou *FL*. Po dekódování polohových zpráv a výpočtu souřadnic dojde k odstranění těch zpráv, které nenesou informaci o poloze, která je uvnitř definované oblasti zájmu. Ze zpráv, které zůstanou, je pak dekódována ICAO adresa letadel.

Jelikož lze podle Type Code rozlišit polohové zprávy, které byly letadlem vysílány během letu (Type Code 9-18, 20-22) a zprávy, které letadlo vysílalo ze země (Type Code 5-8), jsou uvažována pouze letadla, od nichž byly zaznamenány polohové zprávy jak ve fázi letu, tak pozemní. Množina získaných ICAO adres tedy obsahuje všechna ta letadla, která se v oblasti zájmu nacházela ve vzduchu i na zemi.

V další části (zjednodušený vývojový diagram je zobrazen na obrázku 37) se program zabývá každým letadlem (jehož ICAO adresa je obsažena v množině získané v předchozím kroku) zvlášť. Pro práci s polohovými daty jsou pro každé letadlo opět ponechány jen zprávy obsahující informace o poloze uvnitř oblasti zájmu.



Obrázek 37: Zjednodušený vývojový diagram programu pro vytvoření záznamu o příletech a odletech.

4.1 Určení přistání nebo odletu

Zda jde o přistání nebo odlet program určuje na základě rozpoznání okamžiku, kdy letadlo přestane vysílat pozemní polohové zprávy a začne vysílat zprávy o poloze ve vzduchu (v případě odletu), nebo kdy letadlo přestane vysílat zprávy o poloze ve vzduchu a začne vysílat zprávy o poloze na zemi (přílet). Program pro každou polohovou zprávu určí její Type Code. Pokud je Type Code větší než 8 (jde o polohu ve fázi letu), je této zprávě navíc přiřazena 1. Pokud je Type Code menší nebo roven 8, je této zprávě navíc přiřazena 0. Poté je vypočten rozdíl mezi jednotlivými prvky tohoto vektoru obsahující pouze 1 a 0. V případě příletu je pak u poslední zprávy ve fázi letu číslo -1. V případě odletu je u poslední pozemní polohové zprávy číslo 1.

V příkladě zobrazeném na obrázku 38, kdy první sloupec obsahuje TypeCode zprávy, druhý sloupec přiřazenou 1 pro TypeCode větší než 8 a 0 pro Type Code menší nebo roven 8. Třetí sloupec pak obsahuje rozdíl prvku druhého sloupce s prvkem předchozím. Zpráva, která je na řádku odpovídajícímu řádku s číslem -1, je poslední zprávou vysílanou letadlem ve fázi letu (následující zprávy jsou již vysílány ze země). Proto je čas (ve formátu YYYYMMDD_HH:MM) této zprávy přiřazen k záznamu o přistání.

18	1	0
18	1	0
18	1	0
18	1	0
18	1	0
18	1	0
18	1	-1
8	0	0
8	0	0
8	0	0
8	0	0
8	0	0

Obrázek 38: První sloupec obsahuje Type Code. Druhý sloupec obsahuje 1 pro TC > 8, a 0 pro TC ≤8. Třetí sloupec obsahuje rozdíl mezi prvkem druhého sloupce s předchozím prvkem. Číslo -1 značí, že jde o přílet.

4.2 Určení kategorie letadla

Informace o kategorii letadla je obsažena ve zprávách s Type Code 3 nebo Type Code 4. Pro každé letadlo jsou tyto zprávy dekódovány. Kategorie letadla je určena v bitech 38 až 40. Tyto bity je nutné převést do desítkové soustavy a následně lze podle tabulek 14 a 15 letadlu přiřadit jeho danou kategorii.

Tabulka 14: Kategorie letadel vysílané ve zprávách s TC=4. [12]

Kategorie letadla – Type Code 4	
Bity 38 až 40 v desítkové soustavě	**Význam**
0	Bez informace o kategorii
1	Light
2	Small
3	Large
4	High-Vortex Large (B757)
5	Heavy
6	High-Performance (>5g zrychlení a rychlost >400 kt)
7	Rotorcraft

Tabulka 15: Kategorie letadel vysílané ve zprávách s TC=3. [12]

Kategorie letadla – Type Code 3	
Bity 38 až 40 v desítkové soustavě	**Význam**
0	Bez informace o kategorii
1	Kluzák
2	Lehčí než vzduch
3	Padák
4	Ultralight
5	Rezervováno
6	Bezpilotní letoun
7	Vesmírný letoun

4.3 Dekódování volacího znaku

Volací znak je také vysílán ve zprávách s Type Code 3 nebo Type Code 4 (podle kategorie letadla). Dekódovat jej lze z bitů 41 až 88. Volací znak se skládá z osmi znaků – každý je kódovaný pomocí šesti bitů. Po převedení každé šestice bitů do desítkové soustavy lze podle tabulky 16 kódovaný znak určit.

Tabulka 16: Pro určení volacího znaku je potřeba převést šestice bitů do desítkové soustavy a poté lze na základě této tabulky určit volací znak. [16]

Kódování	Znak	Kódování	Znak	Kódování	Znak
1	A	14	N	32	_
2	B	15	O		
3	C	16	P		
4	D	17	Q	48	0
5	E	18	R	49	1
6	F	19	S	50	2
7	G	20	T	51	3
8	H	21	U	52	4
9	I	22	V	53	5
10	J	23	W	54	6
11	K	24	X	55	7
12	L	25	Y	56	8
13	M	26	Z	57	9

4.4 Výsledný záznam

Finální záznam o příletech a odletech je uložen v proměnné *OutPut*. Jeho podoba je zobrazena na následujícím obrázku 39. Pro tento příklad byla použita data ze 17. března 2019 mezi 1600 UTC a 1620 UTC a jako oblast zájmu bylo zvoleno letiště Václava Havla v Praze. Pro definování oblasti zájmu byly v programu použity hodnoty:

- *North*=50.5;
- *West*=13.4;
- *South*=49.8;
- *East=15 ;*
- *FL*=40 (pro výšku 4000 ft).

	1	2	3	4	5
1	424377	Large	AFL2015_	Departure	20190317_16:03
2	3C6DCB	No Category Info	EWG9TU__	Arrival	20190317_16:05
3	44CDC2	No Category Info	BEL3PR__	Arrival	20190317_16:08
4	4CA2D4	Large	RYR62EV_	Arrival	20190317_16:11
5	49D056	No Category Info	CSA481__	Arrival	20190317_16:16
6	471E16	No Category Info	CSA726__	Departure	20190317_16:18
7	4CA806	No Category Info	RYR58K__	Arrival	20190317_16:19

Obrázek 39: Finální záznam příletů a odletů, letiště Václava Havla Praha, 17. března 2019 mezi 1600 UTC a 1620 UTC. První sloupec obsahuje ICAO adresu letadla, druhý sloupec jeho kategorii, třetí sloupec obsahuje volací znak. Ve čtvrtém sloupci je určeno, zda jde o přílet nebo odlet. V pátém sloupci je datum a čas této události.

Závěr

Automatické závislé sledování se bezesporu stává součástí technik pro sledování letadel. ADS-B zprávy, které jsou z letadla vysílány, nesou cenné informace o poloze a stavu letadla, které mají v budoucnu sloužit pro zajištění rozstupů mezi letadly v rámci řízení letového provozu. Tato diplomová práce se primárně zabývá dalšími možnostmi, jak ADS-B zprávy využít.

V úvodní kapitole je poskytnut přehled základních přehledových systémů a popis principu jejich fungování. Prostor je věnován také právě automatickému závislému sledování a popisu ADS-B zprávy. Jejich využití pro získávání provozních informací je dále v práci zkoumáno pro vyhodnocení, zda přiblížení letadel jsou stabilizovaná, pro vyhodnocení integrity polohové informace a pro ukládání záznamů o příletech na letiště a odletech z něj.

Pro vyhodnocování, zda jsou přiblížení letadel k letištím stabilizovaná, autor zvolil jako jednoznačné kritérium vertikální rychlost letadla. Ta nesmí být větší, než 1000 ft/min v klesání. Byl vytvořen a představen program, který ADS-B zprávy dekóduje a na základě získaných dat vyhodnocuje, zda jsou přiblížení stabilizovaná. V konkrétním řešeném příkladě jsou využita data ze dne 31. května 2018 mezi 2140 UTC a 2200 UTC a jako vyhodnocovaná oblast je zvoleno přiblížení na RWY 24 na letišti Václava Havla v Praze. Pomocí vytvořeného programu bylo z těchto dat nalezeno nestabilizované přiblížení letadla s ICAO adresou 49D14C.

V části, která se věnuje vyhodnocení integrity polohové informace, autor představuje program, který rozděluje přijaté polohové zprávy do kategorií navigační integrity. Tento program umožňuje také vykreslení situace do mapy České republiky s barevným rozlišením trajektorií letů podle příslušného zařazení polohových zpráv do kategorie navigační integrity. Výstupem je navíc statistika vystihující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií. Cílem také bylo vyhodnotit, zda nad územím České republiky existuje místo, kde vlivem externích faktorů dochází k degradaci integrity polohových informací letadel. Na základě analýzy dat ze dne 17. března 2019 nebylo takové místo nalezeno.

V poslední části této diplomové práce autor představuje program, který na základě přijatých ADS-B zpráv vytvoří přehledný záznam o příletech letadel na dané letiště a odletech z něj. Tento záznam obsahuje informace: ICAO adresu letadla, kategorii letadla, volací znak letadla, zda se jedná o odlet či přílet a datum a čas této události.

Všechny programy byly vytvořeny v prostředí MATLAB.

Příjem ADS-B zpráv může tedy být přínosný i pro provozovatele aerolinií nebo letišť, kteří data z nich získaná mohou využívat pro vyhodnocování provozních situací. Autor práce vybral tři

provozní oblasti a navrhl algoritmy, kterými lze přijaté ADS-B zprávy dekódovat a získat z nich potřebné informace. Prokázal tak, že ADS-B zprávy lze využít pro provozní účely.

Použité zdroje

Literatura

[1] KAYTON, Myron a FRIED, Walter, R. *Avionics Navigation Systems*. 2. vyd. New York: Wiley, 1997. ISBN 0-471-54795-6.

[2] VOSECKÝ, S. a DANĚK, V. *Radionavigace (062 00 00 00): učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-764-2.

[3] SEDLÁČEK, M. a ŠMÍD, R. *MATLAB v měření*. 3., přeprac. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05121-4.

Internetové zdroje

[4] Ministerstvo dopravy České republiky. *Letecký předpis L8168 Provoz letadel – letové postupy* [online]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm

[5] Ministerstvo dopravy České republiky. *Letecký předpis L10/IV O civilní letecké telekomunikační službě* [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm

[6] Ministerstvo dopravy České republiky. *Letecký předpis L10/III O civilní letecké telekomunikační službě* [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm

[7] Ministerstvo dopravy České republiky. *Letecký předpis L4444 Postupy pro letové navigační služby – Uspořádání letového provozu* [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm

[8] DUNSTONE, G. *ADS-B Basics* [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: https://www.icao.int/APAC/Meetings/2012_SEA_BOB_ADSB_WG8/SP01_AUS%20-%20ADS-B%20Basics.pdf

[9] IATA. *Unstable Approaches* [online]. 2017. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: https://www.iata.org/whatwedo/safety/runway-safety/Documents/IATA-Guidance-Unstable-Approaches.pdf

[10] AIRBUS. *Flight Operations Briefing Notes – Flying Stabilized Approaches* [online]. 2006. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: https://www.scribd.com/document/21127427/Airbus-Flight-Operation-Briefing-Notes-Approach-Techniques-Flying-stabilized-approaches

[11] MATTHEWS, S. a kolektiv. *Flying Safety Digest, Vol. 17 and 18* [online]. 1999. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: https://flightsafety.org/fsd/fsd_nov-feb99.pdf

[12] AUSTRO CONTROL GESELLSCHAFT FÜR ZIVILLUFTFAHRT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG. *Luftfahrthandbuch Österreich / AIP Austria – AD 2 LOWI* [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: https://eaip.austrocontrol.at/lo/190426/ad_2_lowi.htm

[13] RTCA. *DO-260B - Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services - Broadcast (TISB)* [online]. Dostupné z: http://www.anteni.net/adsb/Doc/1090-WP30-18-DRAFT_DO-260B-V42.pdf

[14] ŘLP ČR, s. p. *Letecká informační příručka – AD 2 LKPR* [online]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/ais_data/www_main_control/frm_cz_aip.htm

[15] ICAO. *ADS-B Implementation and Operations Guidance Document* [online]. 2011. Dostupné z: https://www.icao.int/APAC/Documents/edocs/adsb_aigd4.pdf

[16] ICAO. Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter [online]. Dostupné z: http://www.aviationchief.com/uploads/9/2/0/9/92098238/icao_doc_9871_-_technical_provisions_for_mode_s_-_advanced_edition_1.pdf

[17] SUN, J. *The 1090 MHz Riddle* [online]. Dostupné z: https://mode-s.org/decode/index.html

[18] ICAO. *Aeronautical Surveillance Manual* (Doc 9924) [online]. 2010. Dostupné z: http://www.aviationchief.com/uploads/9/2/0/9/92098238/icao_doc_9924_-_aeronautical_surveillance_manual_-_1st_edition_-_2011.pdf

[19] FLIGHTRADAR24. How It Works [online]. Dostupné z: https://www.flightradar24.com/how-it-works

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma systému ADS-B. ..... - 13 -
Obrázek 2: Část přibližovací mapy na RWY 26 letiště Innsbruck znázorňující strmé přiblížení 3,5°. [11] ..... - 24 -
Obrázek 3: Zjednodušený vývojový diagram výběru ADS-B zpráv ze získaného datového souboru..... - 26 -
Obrázek 4: Zjednodušený vývojový diagram znázorňující zjišťování, která letadla se nacházejí v oblasti zájmu. ..... - 29 -
Obrázek 5: Zjednodušený vývojový diagram znázorňující výpočet vertikální rychlosti konkrétního letadla. ..... - 33 -
Obrázek 6: Definování oblasti zájmu v programu UnstabilizedApproach2.m. ..... - 35 -
Obrázek 7: ICAO adresy letadel nalezených v oblasti zájmu (po převedení zpět do hexadecimální soustavy). ..... - 36 -
Obrázek 8: Průběh vertikální rychlosti a výšky letu letadla 407510. ..... - 37 -
Obrázek 9: Průběh vertikální rychlosti a výšky letu letadla 49D095..... - 38 -
Obrázek 10: Průběh vertikální rychlosti a výšky letu letadla 49D14C. ..... - 39 -
Obrázek 11: Průběh vertikální rychlosti a výšky letu letadla 49D369..... - 40 -
Obrázek 12: Zjednodušený vývojový diagram programu pro zjištění kategorie navigační integrity. ..... - 44 -
Obrázek 13: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0000 UTC do 0003 UTC. ..... - 46 -
Obrázek 14: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0000 UTC do 0003 UTC. ..... - 46 -
Obrázek 15: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0200 UTC do 0203 UTC. ..... - 47 -
Obrázek 16: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0200 UTC do 0203 UTC. ..... - 47 -
Obrázek 17: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0400 UTC do 0403 UTC. ..... - 48 -
Obrázek 18: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0400 UTC do 0403 UTC. ..... - 48 -
Obrázek 19: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0600 UTC do 0603 UTC. ..... - 49 -
Obrázek 20: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0600 UTC do 0603 UTC. ..... - 49 -

Obrázek 21: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0800 UTC do 0803 UTC. .....- 50 -
Obrázek 22: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 0800 UTC do 0803 UTC. .....- 50 -
Obrázek 23: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1000 UTC do 1003 UTC. .....- 51 -
Obrázek 24: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1000 UTC do 1003 UTC. .....- 51 -
Obrázek 25: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1200 UTC do 1203 UTC. .....- 52 -
Obrázek 26: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1200 UTC do 1203 UTC. .....- 52 -
Obrázek 27: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1400 UTC do 1403 UTC. .....- 53 -
Obrázek 28: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1400 UTC do 1403 UTC. .....- 53 -
Obrázek 29: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1600 UTC do 1603 UTC. .....- 54 -
Obrázek 30: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1600 UTC do 1603 UTC. .....- 54 -
Obrázek 31: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1800 UTC do 1803 UTC. .....- 55 -
Obrázek 32: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 1800 UTC do 1803 UTC. .....- 55 -
Obrázek 33: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 2000 UTC do 2003 UTC. .....- 56 -
Obrázek 34: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 2000 UTC do 2003 UTC. .....- 56 -
Obrázek 35: Mapa České republiky se znázorněním trajektorií letů zbarvených podle příslušné kategorie navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 2200 UTC do 2203 UTC. .....- 57 -
Obrázek 36: Výsečový graf znázorňující procentuální zastoupení jednotlivých kategorií navigační integrity ze dne 17. března 2019 od 2200 UTC do 2203 UTC. .....- 57 -
Obrázek 37: Zjednodušený vývojový diagram programu pro vytvoření záznamu o příletech a odletech. .....- 60 -
Obrázek 38: První sloupec obsahuje Type Code. Druhý sloupec obsahuje 1 pro TC > 8, a 0 pro TC ≤8. Třetí sloupec obsahuje rozdíl mezi prvkem druhého sloupce s předchozím prvkem. Číslo -1 značí, že jde o přílet. .....- 61 -

Obrázek 39: Finální záznam příletů a odletů, letiště Václava Havla Praha, 17. března 2019 mezi 1600 UTC a 1620 UTC. První sloupec obsahuje ICAO adresu letadla, druhý sloupec jeho kategorii, třetí sloupec obsahuje volací znak. Ve čtvrtém sloupci je určeno, zda jde o přílet nebo odlet. V pátém sloupci je datum a čas této události. ..... - 63 -

Seznam tabulek

Tabulka 1: Struktura zprávy sestupného spoje formátu 17. ..... - 14 -
Tabulka 2: Struktura polohové ADS-B zprávy. ..... - 15 -
Tabulka 3: Struktura ADS-B zprávy o rychlostech. ..... - 15 -
Tabulka 4: Struktura polohové pozemní ADS-B zprávy. ..... - 15 -
Tabulka 5: Struktura ADS-B zprávy s volacím znakem. ..... - 15 -
Tabulka 6: Struktura příležitostné ADS-B zprávy. ..... - 16 -
Tabulka 7: Parametry stabilizovaného přiblížení a jejich kritéria. ..... - 21 -
Tabulka 8: Rozpoznání záznamu sestupného spoje typu 17 je možné pomocí prvních pěti bitů. V kombinaci s následujícími třemi bity lze tyto záznamy identifikovat i v hexadecimálním formátu. ..... - 27 -
Tabulka 9: Type Code zpráv obsahujících data o vzdušné poloze. ..... - 30 -
Tabulka 10: Určení, zda jde o let ve stoupání nebo v klesání. ..... - 32 -
Tabulka 11: Kategorie navigační integrity a Type Code, který je charakterizuje. [12] ..... - 42 -
Tabulka 12: Hodnota úrovně integrity zdroje a bity, kterými ji lze dekódovat. Pro Type Code 29 jde o bity 77 a 78, pro Type Code 31 jde o bity 83 a 84. ..... - 43 -
Tabulka 13: Procentuální poměr polohových údajů v jednotlivých kategoriích navigační integrity (údaje ze zpráv přijatých v prvních třech minutách po každé celé sudé UTC hodině). ..... - 58 -
Tabulka 14: Kategorie letadel vysílané ve zprávách s TC=4. [12] ..... - 61 -
Tabulka 15: Kategorie letadel vysílané ve zprávách s TC=3. [12] ..... - 62 -
Tabulka 16: Pro určení volacího znaku je potřeba převést šestice bitů do desítkové soustavy a poté lze na základě této tabulky určit volací znak. [16] ..... - 62 -

Seznam příloh na CD

Nestabilizované přiblížení

- **Archiv**
- **MsgBin_Archiv**
    - MsgBin_1805312140.mat
- **UnixTime_Archiv**
    - Unix_time_1805312140.mat
- Binary_Message.m
- *crc_division4.m
- *DF17_poloha.m
- *DF17_TC9_18_vyska.m
- UnstabilizedApproach1.m
- UnstabilizedApproach2.m
- **AC_Information**

Integrita polohové informace

- **Archiv**
- **MsgBin_Archiv**
    - MsgBin_1903171000.mat
    - MsgBin_1903171200.mat
    - MsgBin_1903171400.mat
    - MsgBin_1903171600.mat
    - MsgBin_1903171800.mat
    - MsgBin_1903172000.mat
- **UnixTime_Archiv**
    - Unix_time _1903171000.mat
    - Unix_time _1903171200.mat
    - Unix_time _1903171400.mat
    - Unix_time _1903171600.mat
    - Unix_time _1903171800.mat
    - Unix_time _1903172000.mat

- Binary_Message.m
- *crc_division4.m
- *DF17_poloha.m

- *DF17_TC9_18_vyska.m
- hraniceCR.mat
- PositionIntegrity1.m
- PositionIntegrity2.m

Záznamy příletů a odletů

- **Archiv**
- **MsgBin_Archiv**
    - MsgBin_1903171600.mat
- **UnixTime_Archiv**
    - Unix_time _1903171600.mat
- Binary_Message.m
- *crc_division4.m
- *DF17_poloha.m
- *DF17_TC9_18_vyska.m
- hraniceCR.mat
- Zaznamovani1.m
- Zaznamovani2.m
- **AC_Data**

*Takto označené položky autor obdržel od členů laboratoře ATM.