



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. David Šíma

Využití přehledových systémů ke zvýšení bezpečnosti
provozu v blízkosti RWY

Diplomová práce

2022



K621.....Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. David Šíma

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterské –PL– Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Využití přehledových systémů ke zvýšení bezpečnosti provozu v blízkosti RWY**

Název tématu (anglicky): **Use of surveillance systems to improve safety in areas close to RWY**

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je navrhnout technické řešení a postupy ke zvýšení provozní bezpečnosti na křižovatkách TWY v blízkosti RWY s využitím stávajících přehledových systémů.
- Vymezení problematiky určování polohy jednotlivých částí letadel (konce křídel, ocasní plochy) vyskytujících se na vyčkávacích místech RWY
- Zhodnocení potenciálu využití stávajících přehledových systémů k detekci letadla zasahujícího do průjezdného profilu přilehlých TWY
- Návrh technického řešení integrace informací o fyzických rozměrech letadel do těchto systémů
- Návrh postupů pro včasnou detekci a řešení hrozících konfliktů letadel
- Zhodnocení přínosu a efektivity navrhovaného řešení

- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: EASA, Certification Specifications and Guidance Material for Aerodrome Design (CS-ADR-DSN)
ICAO, Doc 9157, Aerodrome Design Manual, Part 2 – Taxiways, Aprons and Holding Bays

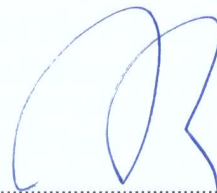
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Líkař**

Datum zadání diplomové práce: **16. července 2021**
(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: **16. května 2022**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

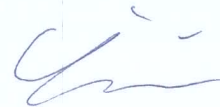


doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu Ústav letecké dopravy



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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.



Bc. David Šíma
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 16. července 2021

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi byli při psaní této práce nápomocni. Zvláště děkuji Ing. Petru Líkařovi za odborné vedení a rady, které mi při její tvorbě velice pomohly. Další poděkování patří Ing. Janu Kubíčkoví a Ing. Jakubu Noskovi za poskytnutí cenných podkladů, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout. Na závěr bych chtěl vyjádřit velké díky mé rodině a přátelům, kteří mi byli podporou po celou dobu mého 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 etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití 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 16.05.2022



Podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Využití přehledových systémů ke zvýšení bezpečnosti provozu v blízkosti RWY

Diplomová práce

květen 2022

Bc. David Šíma

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá možnostmi využití stávajících přehledových systémů pro sledování provozu na pohybové ploše letiště ke zvýšení provozní bezpečnosti na křižovatkách TWY v blízkosti vyčkávacích míst RWY, na kterých dochází k objíždění vyčkávajících letadel dalším provozem. Stávající používané systémy zobrazují pozici letadla jako bod na mapovém podkladu letiště. Z takového výstupu bohužel řídicí letového provozu nemá možnost určit, zda vyčkávající letadlo zasahuje do průjezdního profilu přilehlé TWY či nikoliv. Práce tedy mapuje potenciál současných přehledových systémů v této oblasti, navrhuje technické řešení včasné detekce hrozícího konfliktu letadel v křižovatce a analyzuje efektivitu jeho případné implementace.

ABSTRACT

This thesis addresses a possible use of current surveillance systems to improve safety of aircraft movements at TWY intersections adjacent to RWY holding points where risk of possible collision exists. Current airport surveillance systems display a target as a point on a base map without any additional information about its dimensions. Air traffic controllers cannot identify whether such threat exists or not. Therefore, this thesis analyzes characteristics of current surveillance systems and their potential in this area, proposes a technical solution for timely identification of possible collision in TWY intersection areas, and analyzes efficiency of its possible implementation.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Use of surveillance systems to improve safety in areas close to RWY

Diplomová práce

květen 2022

Bc. David Šíma

KLÍČOVÁ SLOVA

vyčkávací místo, křižovatka, přehledový systém, kolize, pohybová plocha, letiště, multilaterace, ADS-B, ASTERIX

KEY WORDS

holding point, intersection, surveillance system, collision, movement area, airport, multilateration, ADS-B, ASTERIX

Obsah

Seznam použitých zkratk	7
1 Úvod	9
2 Popis problematiky	10
2.1 Možné způsoby řešení problematiky	12
3 A-SMGCS	19
3.1 Služby	19
3.1.1 Varovná služba (Airport Safety Support Service)	20
3.2 Zdroje přehledových dat	22
3.2.1 Letištní pojezdový radar	22
3.2.2 Multilaterace	24
3.2.3 ADS-B	28
4 ASTERIX zprávy	31
5 Údaje o rozměrech letadel	39
6 Princip navrhovaného řešení v podobě algoritmu detekujícího vzdálenost mezi letadly	42
6.1 Nejistoty výpočtu vzdálenosti mezi letadly pomocí navrhovaného algoritmu	43
6.2 Způsob ověření efektivity navrhovaného algoritmu	45
7 Analýza přehledových dat	46
7.1 Analýza parametrů polohové přesnosti ADS-B zpráv	47
7.2 Analýza doplňkových ADS-B položek	52
7.3 Analýza údajů získaných z multilateračního systému	52
8 Nástroj pro analýzu multilateračních přehledových dat	53
8.1 Záložka 1 - Tvorba polygonu	53
8.2 Záložka 2 - Tvorba vstupních dat	55
8.3 Záložka 3 - Výpočet a zápis výstupních dat	57
8.3.1 Potřebné doplňkové soubory k úspěšnému výpočtu a zápisu dat	58
8.3.2 Samotný proces čtení, výpočtu a zápisu dat	60

8.4	Záložka 4 – Přepočít souřadnic	64
9	Analýza multilateračních dat získaných navrženou aplikací	65
9.1	Sledování parametrů teoretické přesnosti MLAT – rozdíl vzdáleností A a B	65
9.2	Vliv užitých rozměrů letadel na určení výsledné vzdálenosti – rozdíl vzdáleností C a D	69
9.3	Určení pravděpodobnosti chybného výpočtu vzdálenosti mezi letadly plynoucího z dat o multilaterační nepřesnosti	71
10	Vyhodnocení parametrů navrhovaného řešení	73
11	Závěr	77
	Seznam použité literatury	80
	Seznam obrázků	85
	Seznam tabulek	86
	Seznam grafů	87
	Seznam příloh	88

Seznam použitých zkratek

2D	Two Dimensional	Dvourozměrný
3D	Three Dimensional	Trojrozměrný
ACAS	Airborne Collision Avoidance System	Palubní proti-srážkový systém
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast	
APU	Auxiliary Power Unit	Pomocná motorová jednotka
A-SMGCS	Advanced Surface Movement Guidance and Control System	
ASTERIX	All Purpose Structured Eurocontrol Surveillance Information Exchange	
CATC	Conflicting ATC Clearances	Konfliktní ATC povolení
CMAC	Conformance Monitoring Alerts for Controllers	Monitorování shody s vydaným povolením
CPS	Central Processing System	Centrální procesorová jednotka
DOP	Dilution of Precision	
EDF	Empirical distribution function	Empirická distribuční funkce
GAO	GPS Antenna Offset	Offset antény satelitní navigace
GBAS	Ground Based Augmentation System	
GNSS	Global Navigation Satellite System	Globální satelitní navigační systém
HFOM	Horizontal Figure of Merit	
HPL	Horizontal Protection Level	
ICAO	International Civil Aviation Organization	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
LIDAR	Light Detection and Ranging	
LSB	Least Significant Bit	Nejméně významný bit
MLAT	Multilateration system	Multilaterační systém

NAC _p	Navigation Accuracy Category for Position	
NIC	Navigation Integrity Category	
PA	Position accuracy	Přesnost polohy
POA	Position Offset Applied	Offset polohy použit
PRI	Pulse Repetition Interval	Interval opakování pulzu
Radar	Radio Detection and Ranging	Rádiové rozpoznávání a zaměřování
REF	Reserved Expansion Field	Vyhrazené rozšiřující pole
RMCA	Runway Monitoring and Conflict Alerting	Monitorování RWY a varování o konfliktech
RWY	Runway	Dráha určená pro vzlety a přistání
SIL	Source Integrity Level	
SMGCS	Surface Movement Guidance and Control System	
SoL	Safety of Life	
STA	Status	Status
TAO	Transponder Antenna Offset	Offset antény odpovídače
TDOA	Time Difference of Arrival	Rozdíl času příjmu
TNH	True North Heading	Zeměpisný heading
TWY	Taxiway	Pojezdová dráha
UAT	Universal Access Transceiver	
WAM	Wide Area Multilateration	

1 Úvod

Narůstající hustota provozu letadel na pohybových plochách letišť s sebou přináší mnohá úskalí. V důsledku rostoucího populačního zájmu o leteckou dopravu se mnohá letiště po celém světě potýkají s problémy plynoucími z objemů provozu, jejichž hodnoty se blíží letištním kapacitním limitům. Řídící letového provozu musí organizovat provoz velkého množství letadel, která se v jeden moment na letištních pohybových plochách vyskytují. Ačkoliv je součástí jejich odpovědnosti i prevence mnoha druhů hrozících konfliktů mezi letadly, z principu věci není možné, aby právě řídící letového provozu zamezili kolizím letadel v absolutní možné míře. I přes to, že je pilotovi letadla uděleno povolení k pojíždění po určitých pojezdových drahách tak tato skutečnost nezaručuje, že se na těchto drahách, popřípadě v jejich těsné blízkosti, nemůže vyskytovat nějaká překážka, se kterou by mohly části jeho letadla přijít do kontaktu. Konečná odpovědnost, že se těmto překážkám letadlo vyhne, je tak vždy na pilotovi samotném. Vzhledem k rozměrům dopravních letadel je však v mnoha případech velice obtížné, až nereálné, z prostoru kokpitu určit, kam až části letadla zasahují.

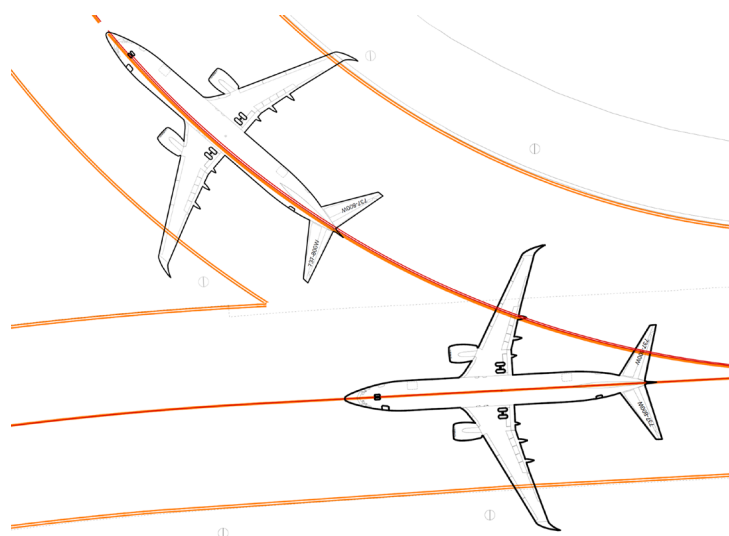
Rizikovou oblastí jsou z tohoto pohledu křižovatky pojezdových drah, zejména pak ty, které se nachází v blízkosti vyčkávacích míst RWY. V těchto místech vzniká riziko srážky 2 letadel, kdy půdorys jednoho stojícího letadla může zasahovat do průjezdního profilu letadla druhého. Právě problematice kolizí letadel v těchto místech je celá práce věnována.

Nejprve je uveden detailní popis celé problematiky. Následně práce mapuje zařízení, která byla v minulosti označena z hlediska řešení kolizí v oblastech vyčkávacích míst za potenciálně přínosná. Poté je již pozornost soustředěna výhradně na stávající přehledové systémy a jejich charakteristiky. Dále je navržena konkrétní podoba principu, díky kterému lze za pomoci těchto systémů určovat vzdálenost mezi letadly a tím pádem i identifikovat riziko potenciálního konfliktu. Za účelem ověření efektivity a vhodnosti navrhovaného řešení je v další části práce zpracovaná analýza dat vycházejících ze zpráv ASTERIX pocházejících z multilateračního a ADS-B systému na Letišti Václava Havla v Praze. Ještě před samotnou analýzou multilateračních dat je však popsán princip jejich získání, ke kterému bylo zapotřebí navrhnout a sestavit nástroj v prostředí MATLAB.

2 Popis problematiky

Při provozu na větších letištích disponujících zpevněnou dráhou se ne zřídka kdy setkáváme s hned několika vyčkávacími místy, přes která lze na danou dráhu vstupovat. Tedy není pravidlem, že by veškerý provoz vstupoval na dráhu z jejího konce a využíval tím tak její celkovou dostupnou délku. Zejména u menších letadel, než ta která jsou pro danou dráhu kritická, nebo u letadel, jejichž aktuální výkonnostní charakteristiky to dovolují, tak nastává situace, kdy toto letadlo vstupuje na dráhu z její průběžné části. Tím posádka dokáže šetřit jak palivo, tak i čas potřebný k pojiždění. Zároveň lze říci, že návrh letištní infrastruktury přilehlých pojezdových drah k RWY počítá v naprosté většině případů s tím, že podél celé této dráhy vede přibližně rovnoběžná dráha pojezdová. Ta potom slouží k pohybům letadel, která danou RWY využívají. [1]

Dalším nedílným předpokladem, aby mohla nastat situace, které je tato práce věnována, je povinnost zastavení letadla na vyčkávacím místě před vstupem na zmiňovanou RWY. Tato povinnost slouží jakožto prevence případů, aby na dráze nedocházelo ke vzájemným kolizím. Vstoupit na dráhu je možné až tehdy, kdy posádka vyčkávajícího letadla obdrží patřičné povolení od řídicího letového provozu. Po celou dobu stání letadla na vyčkávacím místě však může být umožněn průjezd druhému letadlu po přilehlé pojezdové dráze vedoucí právě za obsazeným vyčkávacím místem, čímž nastává riziko potenciální vzájemné kolize koncových ploch obou letadel. Graficky je toto riziko znázorněno na obrázku 1, kde je příklad situace, která je s touto problematikou spjata, vyobrazen.



Obrázek 1 - Riziková situace řešené problematiky [autor]

Teoreticky by se mohlo zdát, že je z pouhé znalosti orientace a vzdáleností vyčkávacího místa od os TWY a RWY možné odvodit, pro jaké kombinace letadel je takovýto průjezd bezpečný a pro jaké kombinace letadel by byl již rizikový. Problém v tomto případě však představuje hned několik faktorů.

Nejprve je nutné si uvědomit, že ne každé letadlo zastaví na vyčkávacím místě ve stejné vzdálenosti od jeho značení. Pokud je takovéto vyčkávací místo vybaveno stop příčkou, je požadováno, aby pilot zastavil na takovém místě, ze kterého dokáže vizuálně určit, zda je stop příčka aktivována, či nikoliv. V případě, kdy vyčkávací místo stop příčkou nedisponuje, může pilot teoreticky značení vyčkávacího místa ztratit z dohledu, musí si však být jist, že letadlo žádnou svojí částí za toto značení nezasahuje. Dále je třeba si také uvědomit, že ačkoliv některá vyčkávací místa mohou na první pohled působit, z pohledu řešené problematiky kvůli své velké vzdálenosti od osy přilehlé pojezdové dráhy, bezpečně, v praxi se může na takovém vyčkávacím místě vyskytovat více letadel v řadě za sebou, čímž může být, i v tomto případě, průjezdní profil přilehlé pojezdové dráhy narušen. [2, 3]

Další problém, který je třeba zohlednit, představuje fakt, že v celé této problematice hraje zásadní roli i orientace letadla, které na vyčkávacím místě zastavilo. Ta je ovlivněna jak samotnou orientací vyčkávacího místa vůči přilehlým drahám, tak i typem letadla a způsobem, jakým pilot na dané vyčkávací místo najel. V mnoha případech navíc hovoříme o vyčkávacích místech, která jsou součástí pojezdových drah pro rychlé odbočení, samotná osa vyčkávacího místa tak může svírat s přilehlými drahami úhly o velikostech pouhých několika desítek stupňů, ve výsledku nemusí být ani kritickou částí vyčkávacího letadla ocasní část, nýbrž i konce křidel. Pro letadlo pojížděcí za strojem, který stojí na vyčkávacím místě, lze z principu věci uvažovat, že jeho kritickou částí budou vždy konce křidel.

Dále hrají v této problematice, samozřejmě, také zásadní roli konkrétní rozměry a profily obou sledovaných letadel. V každém případě záleží, jaká kombinace 2 typů letadel se na takto kritických místech setká.

Ze všeho výše uvedeného tedy plyne, že v praxi nelze celou problematiku vyřešit na pouhé teoretické úrovni a například pouze některá vyčkávací místa označit za kritická. Z pohledu řešené problematiky se mohou jevit kritickými veškerá vyčkávací místa, ke kterým přiléhá pojezdová dráha, po které může být vedeno další letadlo, Tedy tak, jak

již bylo popsáno. Zároveň není z pohledu efektivity provozu vhodné pro každé vyčkávací místo stanovit pevnou hranici, za kterou již vyčkávací letadlo nesmí zasahovat, jako je tomu naopak v prostoru pásu RWY. Ten je chráněn právě stanoveným vyčkávacím místem, jehož poloha je zcela nezávislá na konkrétním typu letadla, které se v danou chvíli po dráze pohybuje. Zároveň by navíc stále vyvstávala otázka, jakým způsobem sledovat, zda není taková hranice stojícím letadlem narušena.

Je tedy patrné, že pokud chceme uvedenou problematiku řešit, je nutné do systému implementovat prvky, které by napomáhaly riziko možného střetu obou letadel redukovat. Z pohledu již dříve prováděných studií lze cesty, jakými by se k hledanému řešení bylo možné dopátrat, rozdělit do 2 základních kategorií. První možnou cestou je implementace nových zařízení, a to jak pozemních, tak i těch, která by byla pevnou součástí konstrukce letadel a která by dokázala na hrozící kolizi upozornit a nakonec jí i odvrátit. Tou druhou cestou je možnost využití a úpravy již existujících přehledových systémů, které tvoří primární zdroje informací o polohách letadel a ostatních mobilních prostředků vyskytujících se na pohybových plochách letišť. [2, 4]

Zároveň stojí za zmínku, že pravděpodobnost kolize způsobené výše popisovanou problematikou není v kontextu objemů současné letecké dopravy příliš vysoká, avšak zcela jistě také není nereálná. Dle údajů ze serveru aviation-safety.net došlo mezi lety 2010 a 2021 k minimálně 9 kolizím tohoto charakteru. Zároveň se lze domnívat, že vzhledem k dlouhodobému nárůstu poptávky po letecké dopravě a zároveň omezeným kapacitám letišť a s tím spojeným růstem hustoty provozu na letištních pohybových plochách, bude popisovaná problematika stále více aktuální. I z tohoto pohledu by tak nalezení efektivního způsobu, jakým takové riziko dále snižovat, bylo užitečné.

2.1 Možné způsoby řešení problematiky

Prvním zařízením, které by potenciálně mohlo při řešení dané problematiky pomoci, je LIDAR složený z laserového dálkoměru a snímacího mechanismu. Obecně jsou tato zařízení v letectví v současnosti využívána spíše jako dálkoměrné systémy (A-VDGS), využití jejich úhломěrného potenciálu však není vyloučeno. Princip fungování těchto zařízení umožňuje detekovat objekty ve vzdálenostech přesahujících 100 metrů a to s vysokou přesností, která se může v některých případech pohybovat v řádech milimetrů. Díky těmto charakteristikám by tak mohl být teoreticky LIDAR k detekci, zda

je průjezdní profil přilehlé pojezdové dráhy prostý od překážek v podobě koncových částí dalších letadel, využíván. [2, 5]

Dalším potenciálně vhodným zařízením může být dodatečný radarový snímač umístěný v blízkosti kritického místa. Na rozdíl od LIDARu, který využívá ke svému provozu laserové paprsky, tato zařízení pracují s elektromagnetickým vlněním v podobě rádiových vln. Opět jsou však schopna fungovat jako dálkoměrné i úhломěrné detektory. Přesnost a dosah těchto zařízení je ovlivněn frekvencí vlny, se kterou pracují, nicméně lze dohledat zařízení, jejichž charakteristiky dosahu, přesnosti a zorného pole odpovídají požadavkům pro řešení dané problematiky. Stejně jako u LIDARů je i v případě radarů komplikací fakt, že výkonnost daných zařízení je značně ovlivněna meteorologickými charakteristikami ovzduší v jejich okolí. Radary tohoto charakteru jsou nyní používány především v automobilovém průmyslu, kde představují jeden z mnoha prvků aktivní bezpečnosti. [2, 6]

V případě obou těchto zmiňovaných zařízení však narážíme hned na několik překážek, které příhodnost jejich potenciálního využití značně degradují. Prvním problémem, se kterým bychom se museli při jejich umístění do těsné blízkosti pojezdových drah potýkat je fakt, že je třeba při jejich činnosti vyloučit vliv vysoko vzrostlého travnatého porostu či vysoké sněhové pokrývky. Ani jejich malé rozměry tak nezaručují, že by tato zařízení nemohla pro provoz letadel v jejich okolí představovat překážku. Ještě zásadnějším problémem je však fakt, že i přes své vysoké potenciální přesnosti, uvedené v minulých odstavcích, nemusí být, vzhledem k charakteru řešené problematiky, dosaženo kýženého přínosného efektu. Je nutné si uvědomit, že je vhodné samotný senzor umístit do jedné pevně dané polohy v prostoru za hranou pojezdové dráhy vedoucí k vyčkávacímu místu. Vzhledem k tomu, že poloha kritické přímky, za kterou již nesmí vyčkávací letadlo zasahovat, je závislá na rozpětí letadla pojíždějícího po přilehlé pojezdové dráze. Tato přímka tedy svoji polohu mění. Pevně umístěný senzor tak v naprosté většině případů nebude náležet této přímce a případné narušení vůči ní bude snímat pod nějakým úhlem. Příklad, jakým způsobem může senzor kritickou plochu letadla snímat, je uveden na obrázku 2.



Obrázek 2 - Ocasní plochy letadla z pohledu uvažovaného senzoru [7]

Z tohoto obrázku jsou patrné 2 zásadní faktory. Je evidentní, že koncová část stabilizátoru, označená oranžovou barvou, představuje velice malou plochu, zůstává tedy otázkou, s jakou přesností by případný senzor dokázal lokalizovat právě tento bod. Ke zodpovězení této otázky může alespoň částečně pomoci studie *Localized radar-based hold line surveillance at runways*, jejíž autory jsou Ronald Stevens, Shuo Chen a Vilas Nene, kde byl sledován potenciál využití radarového senzoru, původně určeného k využití u automobilů, za účelem detekování narušení prostoru RWY za vyčkávacím místem. Výhodou, oproti řešené problematice, byla v tomto případě skutečnost, že senzor mohl náležet sledované kritické přímce, jejíž narušení bylo sledováno. První část studie byla věnována detekci narušení chráněného prostoru nosní částí letadla a druhá pak detekci jeho vyklizení částí ocasní. [8]

Z pohledu této práce je zajímavá právě část druhá. Bylo sledováno, v jaké chvíli senzor zaznamená stav, kdy celé letadlo překročilo značení vyčkávacího místa při opuštění RWY. Výsledná data ukázala, že z celkového počtu 162 sledovaných letadel u 95 % z nich senzor detekoval opuštění dráhy v rozmezí odchylek -2.25 a 0.85 metrů, u 99 % z nich pak v rozmezí -3.0 a 1.6 metrů. Záporná hodnota značí, že senzor detekoval opuštění dráhy dříve, než k tomu došlo ve skutečnosti, kladná hodnota opak. Ačkoliv jsou výsledné odchylky poměrně malé a pro účely řešené problematiky na první pohled slibné, je nutné se podívat na fakt, že měl senzor v naprosté většině případů tendenci detekovat opuštění dráhy ještě dříve, než k tomu ve skutečnosti došlo. To mohlo být zřejmě dáno tím, že měl senzor problém detekovat právě malé ocasní plochy letadla, které by byly kolmé vůči směru pozorování. Například detekování úplného konce

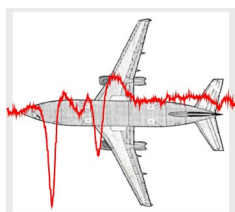
stabilizátoru, tak jak je vyznačen na obrázku 2, je pro takovéto senzory pravděpodobně příliš náročný úkol. V případě, kdy je narušení nějakého prostoru snímáno přímo z kritické přímky, je i přes tento fakt možné dosáhnout poměrně dobrých výsledků, pro účel této práce je však tato skutečnost zásadní komplikací. V případě, kdy označíme koncový bod letadla s určitou nepřesností, se může vlivem pozorování koncové části letadla pod úhlem, který není kolmý na jeho osu, tato nepřesnost dále násobit a zvětšovat. Možným řešením této překážky by teoreticky bylo mobilní umístění senzoru, který by se mohl přesouvat podle potřeby do oblasti kritické hranice, případně umístění do dané oblasti většího množství sensorů, z nichž by pracoval vždy ten, jehož poloha náleží ke kritické hranici nejbližší. Obě tato řešení však celý systém dále komplikují, ať už z pohledu technického, tak z pohledu finančního, a jsou spíše teoretická než reálná. [8]

Dalším faktorem, který takováto měření může ovlivňovat a který je z obrázku 2 také patrný, je to, že ne vždy by byl zajištěn úplný výhled na celé ocasní plochy letadla. Zkrátka přilehlá část ocasních ploch letadla může zastínit výhled na té části, která je od senzoru odlehlá, avšak může být vůči druhému pojíždějícímu letadlu blíže. Výsledná vzdálenost by tak ani v případě, kdy by senzor dokázal detekovat viditelnou koncovou plochu s dokonalou přesností, neodpovídala realitě. Oba tyto faktory tak zapříčiňují, že využití těchto sensorů v dané problematice nemusí být přínosné. [8]

Další možnou alternativou, která se může díky svému charakteru jevit jako vhodná k řešení popisované situace, je využití indukčních smyček umístěných pod povrchem pojezdové dráhy v oblasti vyčkávacího místa. Tato zařízení jsou již dnes v rámci infrastruktury pojezdových drah využívána. Slouží především pro detekci průjezdu letadla určitou oblastí, typicky hlídají narušení oblasti za značením vyčkávacího místa dráhy či jako prostředek, který poskytuje vstupní údaje do procesu řízení rozsvícení os pojezdových drah při aplikaci tzv. follow the green konceptu. Princip funkčnosti indukčních smyček spočívá v detekci narušení homogenního magnetického pole kovovými částmi objektu, který se vyskytuje v jeho blízkosti. Toto narušení zapříčiní změnu indukčnosti detekční smyčky, což se posléze může projevit jak poklesem amplitudy, tak i nárůstem frekvence či posuvem fáze signálu procházejícího vodičem. Tyto změny signálových charakteristik jsou následně detekovány a při dosažení předdefinovaných prahových hodnot je systémem detekována přítomnost objektu, který změny zapříčinil. Právě zde však tkví problém, který využití takového zařízení

za účelem řešení uvedené problematiky komplikuje. Vzhledem k povaze popisované situace, kdy kritickou částí letadla, kterou potřebujeme detekovat, jsou ocasní plochy či konce křídel, je zapotřebí, aby potenciální indukční smyčka detekovala objekty, které jsou od povrchu vozovky vzdáleny několik metrů. V případě letadel s konfigurací ocasních ploch ve tvaru T to pak mohou být i vzdálenosti v řádech desítek metrů. Oproti pouhým detektorům průjezdu by tak v tomto případě musela být indukčnost použité cívky několikanásobně větší, avšak ani to by neřešilo problém spočívající v tom, že prahová hodnota, která by odpovídala situaci, kdy všechny části letadla překročily sledovanou kritickou hranici, je závislá na konkrétním typu letadla. Zároveň je nutné si také uvědomit, že vzdálenost ploch letadla od vozovky je závislá na jeho samotné hmotnosti a poloze těžiště, ke konkrétnímu typu letadla se tedy nemůže vázat ani jedna konkrétní prahová hodnota. Charakteristiky prostředí či samotné smyčky mohou tyto prahové hodnoty také ovlivňovat. Zároveň se zde opět naráží na problém, že kritická hranice, za kterou letadlo nesmí zasahovat, je závislá na rozpětí letadla pojíždějícího po přilehlé pojezdové dráze, pevné umístění indukční smyčky tak v tomto případě není vhodné. Všechny tyto skutečnosti tak představují překážky, které nedovolují ani tento systém k řešení dané problematiky spolehlivě a efektivně využít. [2, 9]

Snímač magnetického pole Země je další alternativou, která byla v minulosti označena jako možné řešení. Konstrukce letadel obsahují feromagnetické části, které interagují s magnetickým polem Země. Principem detekce za pomoci tohoto systému je tedy snímání změny magnetického pole Země, která nastává ve chvíli, kdy se v jeho okolí vyskytuje feromagnetický objekt. Opět se zde však naráží na problém, že je třeba, aby tento objekt byl snímacímu zařízení v co nejmenší vzdálenosti, což může být v případě ocasních ploch komplikace. Navíc je toto zde ještě umocněno tím, že typickými místy koncentrace velkého množství feromagnetických materiálů na letadlech jsou části podvozku a motorů, což je i patrné z uvedeného průběhu změny magnetického pole při průjezdu letadla Boeing 737 na obrázku 3. [10]



Obrázek 3 - Příklad průběhu změny magnetického pole (červená křivka) při průjezdu Boeingu 737 [10]

Na základě studie [10] lze za použití této technologie dosáhnout přesnosti detekce přibližně 7,5 metrů na každou stranu od senzoru v až 97% případech, ovšem pouze v případě, že známe přesný magnetický podpis daného typu letadla v daném místě, což případné využití komplikuje. Skutečnost, že jsou v tomto případě detekovány části podvozku či motorů je také problémem. Ano, na základě znalosti typu konkrétního letadla by teoreticky bylo možné, při znalosti polohy například hlavního podvozku, dopočítávat, do jaké vzdálenosti ocasní polohy zasahují, komplikací však stále bude neznámá orientace letadla. Dalším, a možná ještě zásadnějším, problémem by v dané problematice bylo správné umístění senzoru. Opět zde narážíme na skutečnost, že poloha kritické hranice není pevně dána, v tomto případě je toto však ještě umocněno tím, že poloha zmiňovaných detekovatelných částí letadla, v podobě podvozku či motorů, bude ve chvíli vyklizení prostoru přílehlé pojezdové dráhy pro každý typ letadla jiná. I v případě, že by kritická hranice svoji polohu neměnila, je správné umístění senzoru závislé na typu letadla stojícího na vyčkávacím místě. Je tedy nereálné nalézt jedno umístění senzoru, které by pokrylo většinu možných typů letadel a kterým by v oblasti vyčkávacího místa hrozila kolize. [10]

Posledním zde uvedeným senzorem, který by mohl být teoreticky umístěn v blízkosti vyčkávacího místa, kde by snímal polohu vyčkávacího letadla, je optoelektronický snímač. Princip zde spočívá ve vysílání a následném přijímání světelného paprsku. Technicky tak tento systém dokáže snímat, zda nebyla cesta paprsku v některé její části přerušena vnější překážkou. Běžně jsou tyto snímače využívány například u automobilových závor, kde zajišťují ochranu před tím, aby byla závora spuštěna na automobil, který ještě nestihl prostorem závory projet. Pro účely této práce však toto řešení není vhodné, jelikož by takovýto snímač musel být ideálně umístěn do výšky, která odpovídá výšce sledovaného objektu, tedy v tomto případě primárně výšky ocasních ploch. Umístění senzoru do takovéto výšky v těsné blízkosti TWY i RWY není z hlediska bezpečnosti vhodné a v některých případech ani z legislativního hlediska možné. Teoreticky lze toto obejít umístěním senzorů v blízkosti zemského povrchu a snímat tak například polohu podvozkových nohou letadel s tím, že by byla poloha kritických ploch dopočítávána na základě známého typu letadla. Zde se však naráží na stejné komplikace, jaké byly uvedeny u obdobného principu řešení za pomoci senzorů magnetického pole Země. [2]

Všechna tato uvedená potenciální řešení by navíc představovala pro provozovatele letišť dodatečné náklady, ať už z pohledu pořízení nebo i z pohledu následného provozu, a je tak na pováženu, zda by takováto investice byla alespoň pro některé z nich opodstatněná. Zároveň jsou všechna tato uvažovaná řešení vázána na jedno konkrétní vyčkávací místo, pro pokrytí všech potenciálních krizových míst na jednom letišti by tak musela být instalována ve větším množství.

Další alternativou k pozemním sensorům mohou být senzory umístěné přímo na letadle, ideálně v koncových oblastech křídel. Této myšlence byla věnována studie *Obstacle Detection Around Aircraft on Ramps and Taxiways Through the Use of Computer Vision* od autorů Jasona Gauciho a Davida Zammit-Mangiona, která se zaměřila v tomto kontextu především na technologii počítačového vidění. Z výsledků této studie je patrné, že tento způsob detekce potenciálních překážek může být velice efektivní a danou problematiku tak spolehlivě řešit. Problém zde však představují 2 faktory. Dodatečná zástavba sensorů na již existující letadla je prakticky nemožná vzhledem k nutným potenciálním zásahům do jejich konstrukce. U nově navrhovaných letadel je situace z tohoto pohledu o něco příhodnější, avšak ani v dnešní době, 13 let od vydání zmiňované studie, žádný z výrobců dopravních letadel na konce křídel takovéto senzory neumísťuje. Lze se domnívat, že je to dáno především tím, že náklady, které by bylo nutno k návrhu a instalaci takového systému vynaložit, nejsou úměrné tomu, jak velké je riziko popisované problematiky. [4]

Poslední známou alternativou, která by mohla k vyřešení dané problematiky posloužit, je využití některého z již existujících přehledových systémů využívaných k monitorování provozu letadel a mobilních prostředků na pohybových plochách letišť, případně pak jejich kombinace. Mezi tyto systémy patří pojezdový radar, multilaterace a ADS-B. Vzhledem k již uvedeným skutečnostem, na základě kterých se lze domnívat, že využití dodatečných sensorů v oblastech vyčkávacích míst není tou správnou cestou k nalezení kýženého řešení, bude zbývající část této práce věnována přehledovým systémům a zodpovězení otázky, zda právě tyto systémy mohou k řešení dané problematiky napomoci. Pozornost se bude ubírat zejména na parametr přesnosti, s jakou lze za pomoci daných přehledových systémů polohu kritických ploch, kterým hrozí riziko potenciálního konfliktu, určit. Přesnost jednotlivých přehledových systémů je úzce spjata s principem, na jakém fungují, tyto principy jsou tak rozebrány v kapitole 3 věnované konceptu A-SMGCS. [2]

3 A-SMGCS

Další část této práce je věnována konceptu A-SMGCS, který hraje v dnešní době při řešení problematiky detekování letadel na pohybových plochách letišť zásadní roli.

Narůstající zájem o leteckou dopravu v průběhu posledních několika desetiletí zapříčinil, že se hustota provozu letadel na letištních pohybových plochách několikanásobně zvýšila. Jelikož je však z bezpečnostního hlediska zcela zásadní, aby byl veškerý provoz na těchto plochách kontrolován a řízen, bylo nutné do systému implementovat takový koncept, který dokáže řídicím letového provozu dodávat spolehlivé a včasné informace, na základě kterých se efektivita jejich práce výrazně zlepší.

První myšlenky o zavedení takového konceptu spadají do 70. let minulého století. Problematikou, kterou měl tento koncept řešit, byla snaha o zvýšení přehledu o provozu a s tím spojená lepší predikce pozemních konfliktů. V té době ICAO zveřejnilo několik dokumentů pod souhrnným názvem *Surface Movement Guidance and Control System* a v roce 1986 poté vydalo *Doc. 9476 Manual of SMGCS*, který definoval postupy pro implementaci na jednotlivých letištích. Lze říci, že zejména díky nedostatkům technologií tehdejší doby se celý koncept SMGCS opíral o pravidlo „vidět a být viděn“, což nebylo v mnoha případech ideálním řešením. Zejména pak provoz za snížené viditelnosti byl stále ještě skutečnou výzvou. Prakticky jediným přehledovým systémem, který v konceptu SMGCS figuroval byl pozemní přehledový radar fungující na bázi vysokofrekvenčního primárního radaru, s čímž jsou zákonitě spojeny i mnohé provozní nedostatky, se kterými je tento přehledový systém spjat. [11]

Až příchod nových technologií, především multilaterace a ADS-B, zapříčinil změnu označení nového konceptu na *Advanced Surface Movement Guidance and Control System*. Díky těmto technologiím se dosáhlo vyšší spolehlivosti přenášených přehledových dat a s tím spojené vyšší bezpečnosti provozu na pohybových plochách letišť. [11]

3.1 Služby

Z předchozí podkapitoly je patrné, že koncept A-SMGCS slouží ke zvýšení spolehlivosti a přesnosti informací o poloze pohyblivých prostředků na pohybových plochách letišť, celý koncept však v sobě zahrnuje i určité automatizované služby,

kteře napomáhají ke snížení pracovní zátěže řídicích letového provozu. Ti pak mohou svoji pozornost věnovat jiným záležitostem, které si to vyžadují. [12]

Celý koncept A-SMGCS je tak složen ze čtyř základních služeb, které mohou, ale nemusí, být ve finální implementaci zastoupeny. Konkrétně se jedná o následující. [12]
[13]

- **Přehledová služba (Surveillance Service)**

Základní služba systému, díky které má řídicí letového provozu ucelený přehled o poloze jednotlivých letadel a mobilních prostředků na pohybových plochách. Data o poloze jsou získávána z pozemního pojezdového radaru, multilateračního systému a ADS-B. Konkrétní kombinace zdrojů dat se liší v závislosti na jednotlivých letištích.

- **Varovná služba (Airport Safety Support Service)**

Někdy též nazývána jakožto služba Airport Safety Nets. Díky této službě je řídicí letového provozu automaticky upozorněn na případné nebezpečné situace, které mohou na pohybových plochách nastávat. Svým charakterem spadá navrhované řešení problematiky kolizí v oblastech vyčkávacích míst, popsané na dalších stranách této práce, právě do této služby, proto je podrobněji popsána v kapitole 3.1.1.

- **Služba směrování (Routing Service)**

Služba, která vygeneruje optimální trasu pro letadlo nebo mobilní prostředek na základě známých parametrů po dostupných pojezdových drahách. Řídicí tak nemusí sám vymýšlet, kudy bude letadla a mobilní prostředky směřovat.

- **Služba vedení (Guidance Service)**

Služba vedení usnadňuje pilotům, případně řidičům mobilních prostředků, orientaci na pohybových plochách díky pomocným vizuálním prostředkům, jako jsou například automaticky se rozsvěčující osvětlení pojezdových drah, stop příček, dokovacích systémů a dalších.

3.1.1 Varovná služba (Airport Safety Support Service)

Varovná služba slouží k prevenci střetů mezi letadly a mobilními prostředky, pohybujícími se po pohybových plochách řízených letišť, způsobenými chybou pilotů, řidičů nebo samotných řídicích letového provozu. Tato služba je přímo závislá na

službě přehledové, která je poskytovatelem polohových dat, a poskytuje řídícím tyto informace. [12]

- Předpověď potenciálních konfliktů
- Identifikaci konfliktů a narušení prostorů
- Identifikaci cílů, které nedodrží obdržena povolení
- Vygenerování upozornění

Základem této služby jsou 3 funkce, z nichž ne všechny musí být vždy nutně implementovány. V závislosti na požadavcích jednotlivých letišť a schopnostech užitých zdrojů přehledových dat se funkční vybavenost jednotlivých systémů liší. Užívané funkce a k nim přidružené příklady konkrétních situací, které jsou již Eurocontrole definovány, jsou následující. [12]

- RMCA – Monitorování RWY a varování o konfliktech
 - Varování v případě narušení ochranného pásma RWY mobilním prostředkem/letadlem před přistávajícím/vzlétajícím letadlem.
- CATC – Konfliktní ATC povolení
 - Varování v momentě, kdy jsou dvěma letadlům vydána povolení, která si navzájem odporují. Příkladem může být situace, kdy je v jednu chvíli vydáno povolení dvěma letadlům k pojezdění po shodné pojezdové dráze, avšak v opačném směru.
- CMAC – Monitorování shody s vydaným povolením
 - Varování v momentě, kdy pohyb některého z letadel neodpovídá přidělenému povolení. Příkladem může být situace, kdy letadlo pojíždí po pojezdových drahách, které nejsou v souladu s přiděleným povolením.

Upozornění, která jsou generována na obrazovky řídicí letového provozu se dělí do dvou úrovní. Úroveň 1 je spjata se situacemi, které mohou být potenciálně nebezpečné, avšak v danou chvíli nehrozí riziko bezprostřední srážky, řídicí letového provozu tak má stále dostatek času na promyšlení řešení celé situace. Upozornění této úrovně je znázorněno na řídicích obrazovkách černým textem na žlutém pozadí. Úroveň 2 je pak spjata se situacemi, které vyžadují okamžitý zásah řídicích, jelikož je v takovém okamžiku riziko střetu vysoké. [12]

Aby mohla funkce RMCA spolehlivě fungovat, je třeba v systému vydefinovat ochranné pásmo dráhy, které bude neustále monitorováno a ve kterém se nesmí vyskytovat žádné letadlo nebo mobilní prostředek bez povolení. Na podobném principu by byla založena i navrhovaná funkce identifikace konfliktu v oblasti vyčkávacího místa dráhy. V tomto případě se však počítá s tím, že by bylo naopak sledováno to, zda se nějaká část letadla ve vydefinované oblasti vyskytuje. [12]

3.2 Zdroje přehledových dat

Jak již bylo zmíněno, stěžejní schopností, na které je celý koncept A-SMGCS založen, je získání údajů o poloze sledovaných pozemních cílů. Tato data jsou na rozsáhlých letištních plochách získávána za pomoci pojezdového radaru, multilaterace nebo ADS-B. Dále mohou být do systému doplněny další senzory, které sledují polohu cílů pouze v určitých oblastech letištních ploch, jako jsou například plochy odbavovací či hranice ochranných pásem. V těchto případech mohou být zdroje přehledových dat doplněny o dokovací systémy, optické senzory, magnetické senzory nebo senzory magnetického pole země. Není konkrétně specifikováno, kterými ze zmíněných systémů musí být letiště vybaveno, nicméně Eurocontrol v dokumentu [12] definuje, že by měl každý systém A-SMGCS pracovat alespoň s jedním kooperativním a jedním nekooperativním přehledovým zařízením. Systémy, které hrají v řešené problematice zásadní roli, jsou dále podrobněji popsány. [12]

3.2.1 Letištní pojezdový radar

Vůbec prvním zdrojem pozemních přehledových dat, který se začal využívat, byl radar primární s impulsním vysíláním signálu. Tento druh radaru není v letectví výhradně využíván k získávání dat o poloze letadel na pozemních plochách letišť, jsou vhodné i pro sledování vzdušných cílů, nicméně ke každému z těchto 2 druhů aplikací se pojí určité odlišné systémové charakteristiky, kterými musí takové radary disponovat.

Základním principem, na kterém tyto radary pracují, je neustálé střídání intervalů, ve kterých radar vysílá tzv. dotazovací pulzy, s intervaly, ve kterých radar „poslouchá“ případné odražené signály. Anténa radaru zároveň zpravidla rotuje tak, aby snímala oblast ležící v mezikruží, jehož vnitřním poloměrem je minimální a vnějším maximální dosah takového radaru. [14]

Dosah radaru je závislý na několika veličinách a je definován radiolokační rovnicí (rovnice 1). [14]

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_v * G^2 * \lambda^2 * \sigma}{(4\pi)^3 * P_{p \min}}} \quad (1)$$

Kde:

R = dosah radaru

P_v = vysílaný impulsní výkon

G = výkonový zisk antény

λ = vlnová délka vysílání

σ = ekvivalentní odrazová plocha cíle

$P_{p \min}$ = minimální detekovaný odražený výkon

Princip měření vzdálenosti spočívá v měření intervalu mezi vysláním a příjmem odraženého pulzu. Vzdálenost cíle je určována na základě rovnice 2. [14]

$$R_c = \frac{c * \Delta t}{2} \quad (2)$$

Kde:

R_c = vzdálenost k cíli

c = rychlost, jakou se elektromagnetické vlnění šíří prostorem (rychlost světla)

Δt = měřený časový interval mezi vyslaným a přijatým pulzem

Teoretická minimální detekční vzdálenost pulzního radaru je charakterizována délkou vysílaných pulzů. To je zapříčiněno tím, že radar střídá periody vysílání a příjmu elektromagnetických vln, ve stejnou chvíli tedy nezvládá obojí zároveň. U velmi blízkých objektů tedy nastává efekt, kdy vyslaný pulz doputuje k cíli, odrazí se a doputuje zpět ještě dříve, než se radar přepne do režimu příjmu. Takový objekt není detekován. Tento fakt je u pojezdových radarů zcela zásadní, jelikož právě tyto jsou určeny ke sledování cílů, které jsou od radarové antény vzdáleny v některých případech jen pouhé desítky až stovky metrů. Je tedy patrné, že pojezdové radary musí pracovat s velmi krátkými vysílanými pulzy, řádově o délce jen několik desítek nanosekund. [14]

Naopak teoretický maximální dosah je ovlivněn délkou periody mezi počátkem vysílání jednotlivých pulzů (PRI). Vyslaný signál musí doputovat od sledovaného cíle zpět k přijímači dříve, než je zahájeno vysílání pulzu nového. [14]

Pozemní radary jsou dále charakteristické svým úzkým vyzařovacím paprskem v řádech desetin stupňů, díky kterému je dosahováno přesnějšího úhlového zaměření cíle. Problémem snižování šířky vyzařovaného paprsku však je s tím spojená potřeba použití vysílací antény větších rozměrů, která musí rotovat rychlostí 60-120 otáček za minutu. K dosažení potřebné přesnosti určované vzdálenosti cíle od radaru je dosaženo tím, že tyto radary pracují se signály o vysokých frekvencích. Většina pozemních radarů vyzařuje elektromagnetický signál ve frekvenčních pásmech X a Ku. Dosažovaná přesnost určované vzdálenosti těchto radarů se pohybuje v řádech jednotek až desítek metrů. Teoreticky vyšších přesností by bylo dosaženo při použití radarů, které by pracovaly ještě ve vyšších frekvenčních spektrech. Výsledný efekt by však byl kontraproduktivní vzhledem k tomu, že by takový radar pracoval spolehlivě pouze za příznivého počasí, kdy se ve vzduchu nevyskytují žádné částice, které by způsobovaly rušení a útlum vysílaného signálu. Bylo prokázáno, že radar pracující na frekvenci 95 GHz může vykazovat spolehlivé údaje o poloze cílů do vzdálenosti 3000 m při příznivém počasí, nicméně v situaci, kdy se v jeho okolí vyskytuje prostředí, ve kterém panuje snížená dohlednost na 50 m v důsledku nasycení vodní párou, se dosah takového radaru může snížit na 2000 m. V případě deště, kdy je srážkový úhrn 16 mm/h, což odpovídá úhrnu, který organizace ICAO stanovila jakožto limitní, při kterém by letištní přehledové systémy měly spolehlivě fungovat, se dosah radaru sníží na pouhých 1200 m. V mnohých oblastech navíc srážkové úhrny přesahující 16 mm/h nepředstavují nic výjimečného. Radary v pásmech X a Ku tedy představují jakýsi kompromis mezi dostatečnou odolností vůči meteorologickým podmínkám a dostatečnou přesností v určování vzdálenosti cíle od radaru. [15]

Kromě problematiky vlivu meteorologických podmínek na spolehlivost a přesnost poskytovaných dat disponují primární pojezdové radary ještě dalšími nedostatky. Za zmínku stojí nemožnost poskytnutí dodatečných informací o sledovaném objektu. Tento nedostatek však může být řešen právě kombinací dat z některého z dalších dostupných přehledových systémů. [14]

3.2.2 Multilaterace

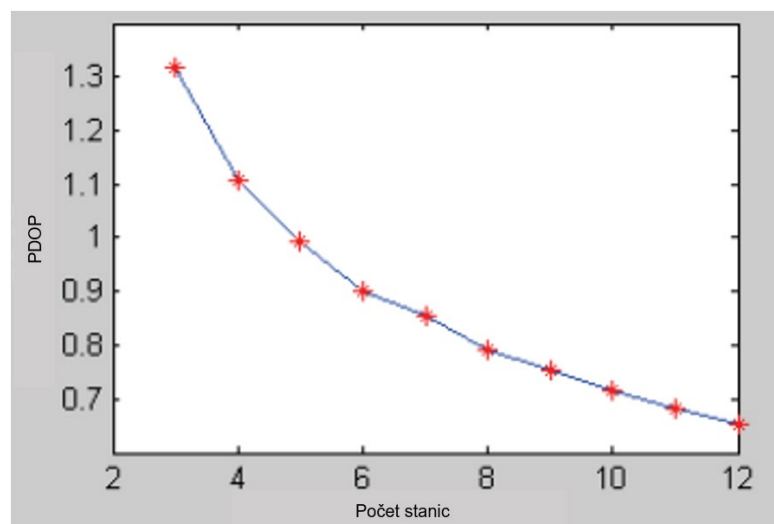
Multilaterační systém představuje poměrně nový a efektivní způsob, jakým lze získávat polohové informace sledovaných cílů. Takovéto získávání polohové informace spočívá na časově hyperbolickém principu, respektive na principu triangulace. Nedílnou

součástí multilateračního systému, který je schopen poskytovat polohové informace v prostoru o 3 dimenzích, jsou minimálně 4 pozemní přijímací stanice o známé poloze, které jsou schopny zaznamenat tentýž signál vyslaný sledovaným cílem. Pro 2D prostor by teoreticky postačovaly stanice 3, ovšem i u letištních multilateračních systémů, které primárně poskytují údaje o poloze objektů na pozemních plochách letišť se v mnohých případech využívá princip výpočtu ve 3 dimenzích. Dále je nutné, aby byl celý systém napojen na centrální procesorovou jednotku (CPS), která informace z jednotlivých přijímacích stanic zpracovává a vytváří zprávy obsahující, mimo jiné, informaci o poloze cíle. Bližší informace k údajům, které může multilaterační systém koncovému uživateli poskytovat, jsou uvedeny v kapitole 4 věnované zprávám standardu ASTERIX. [16, 17]

Zmiňovaný princip a nutnost přítomnosti alespoň 4 pozemních přijímacích stanic spočívá v tom, že systém hledá polohu cíle na hyperboloidech, které jsou matematicky vytvářeny ze znalosti rozdílu časů (TDOA) příjmu shodného signálu na dvojici různých stanic, jejichž vzájemná vzdálenost je známa, a dále z faktu, že se signál v daném prostředí šíří rychlostí světla. Systém tedy musí vytvořit alespoň 3 hyperboloidy, které se ve finálním výpočtu protnou právě v jednom bodě. V této chvíli je již systém schopný určit polohu sledovaného cíle. [16]

Takto určená poloha je však stále předmětem určité nepřesnosti, která může být dána, mimo jiné, principem jejího výpočtu [18] či přesností určení skutečného rozdílu časů příjmu signálu na jednotlivé stanice. Toto zapříčiní, že výsledná poloha nemusí být přímo na vypočteném hyperboloidu, nýbrž i někde v jeho blízkém okolí. Proto je u multilateračních systémů, stejně jako u systémů GNSS, sledován parametr DOP, který uvažuje, jak příhodná je konstelace pozemních stanic pro určení cíle v dané poloze. Zjednodušeně řečeno se jedná o to, pod jakým úhlem se jednotlivé hyperboloidy, v potenciální poloze cíle, protínají. Čím větší bude úhel průniku, tím menší je oblast potenciálního výskytu cíle. Aby byl tento problém určitým způsobem eliminován, multilaterační systémy disponují vyšším počtem pozemních stanic, než je nezbytné zmiňované minimum 4 přijímačů. Systém následně provádí výpočet mezi více než 3 hyperboloidy a tím polohovou nepřesnost tak do jisté míry eliminuje. Jak však znázorňuje obrázek 4, vztažený k jednomu konkrétnímu příkladu, který by se však mohl opakovat prakticky pro jakoukoliv situaci, efektivita navyšování počtu pozemních stanic s jejich rostoucím počtem postupně klesá. Je tedy nutné nalézt

mezní hodnotu počtu stanic, která je pro danou aplikaci multilateračního systému ještě vhodná a kdy už se, vzhledem k nákladům na doplnění, instalace další stanice nevyplatí. Zároveň je však nutné při návrhu konstelace pozemních stanic zohlednit, že ne vždy se signál dostane ke všem dostupným stanicím. Mezi cílem a některou z pozemních stanic se může vyskytovat překážka, což je typické zejména právě pro multilaterační systémy sloužící ke sledování pozemního provozu na letištích. Poté potřeba pozemních stanic v konstelaci roste. Příliš vysoký počet stanic však může být neefektivní také z pohledu rostoucí výpočetní náročnosti. Typicky se počet pozemních stanic letištních multilateračních systémů pohybuje na velkých mezinárodních letištích mezi 10 až 20. [17–20]



Obrázek 4 – Možná závislost PDOP parametru na počtu pozemních stanic [19]

Dalším řešením, jak zdokonalit přesnost udávané polohy multilateračních systémů, je využití dodatečné eliptické metody měření. V zásadě se jedná o velice blízký princip metodě hyperbolické, nicméně v tomto případě je jednou z pozemních stanic vysílán adresný dotaz k cíli, odpověď cíle je poté přijímána na druhé pozemní stanici a sleduje se právě čas uplynulý mezi vyslaným a přijatým signálem. Z tohoto údaje lze při znalosti rychlosti, jakou signál v prostředí putuje, vytvořit obrazec, který je charakterizován konstantním součtem vzdáleností od pozemního vysílače a přijímače. Tímto obrazcem je v tomto případě elipsoid. Další postup je již totožný s metodou hyperbolickou, centrální procesorová stanice vyhledává průniky jednotlivých obrazců. [17]

Algoritmus, který dopočítává zmiňované hyperboloidy, je založen na rovnici 3, která udává vzdálenost mezi dvěma body 1 a 2 ve 3D prostoru. [16]

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (3)$$

Kde:

d = vzdálenost mezi dvěma body

x, y, z = složky souřadnic jednotlivých bodů 1 a 2

Aplikace této rovnice při výpočtu výsledné polohy je pak uvedena formou rovnic 4 - 6. [16]

$$ct_1 = R_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \quad (4)$$

$$ct_2 = R_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} \quad (5)$$

$$ct_3 = R_3 = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} \quad (6)$$

Kde:

c = rychlost světla v daném prostředí

$x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3$ = známé polohové souřadnice 3 pozemních přijímacích stanic

x, y, z = polohové souřadnice hledaného cíle

Takovýto výpočet tedy spočívá v hledání výsledku soustavy 3 rovnic o 3 neznámých. Teoreticky lze vytvořit takovou soustavu rovnic i za použití pouhých 3 pozemních přijímacích stanic, nicméně v takovém případě by každá z rovnic tvořila lineární kombinaci rovnic zbývajících, proto je nutné pro výpočty ve 3D prostoru využívat stanice alespoň 4. [16]

Co se týče legislativních požadavků na přesnost multilateračních systémů, existují 2 standardy, které ji definují. Podle těchto standardů jsou systémy navrhovány a ověřovány. Starší standard EUROCAE ED-117 požaduje, aby byla udávaná poloha cílů na TWY, RWY a osách v oblastech odbavovacích ploch na hladině významnosti 95 % uvnitř kružnice o poloměru 7.5 m, potažmo na hladině významnosti 99 % uvnitř kružnice o poloměru 12 m. Novější standard EUROCAE ED-117A požaduje poloměr kružnice 12 m v 95 % případů na provozních plochách, 20 m v 95 % případů na pojezdových drahách na odbavovacích plochách a 25 m v 95 % případů na stáních letadel. [21, 22]

3.2.3 ADS-B

ADS-B je dalším z novodobých zdrojů přehledových informací, který se mimo jiné využívá k lokalizaci cílů na plochách letištní infrastruktury. Jak už samotný název napovídá, jedná se o závislou přehledovou technologii, která sama o sobě informace o poloze nevytváří, nýbrž spoléhá na polohové informace, které si cíl, kterým je v našem případě letadlo, vytváří přímo na palubě za pomoci svého navigačního vybavení. Takto získaná polohová informace je spolu s mnoha dalšími údaji přenesena na přijímací stanici, kterou může být jak stanice pozemní, tak stanice v podobě jiného letadla. V případě námi řešené problematiky takováto pozemní stanice informace přijme a vytvoří výstup v podobě zprávy ASTERIX, který putuje do navazujících systémů k dalšímu zpracování. Celý proces tvorby a vysílání zpráv si řídí avionika sama nezávisle na jakékoliv komunikaci s pozemními stanicemi. [23]

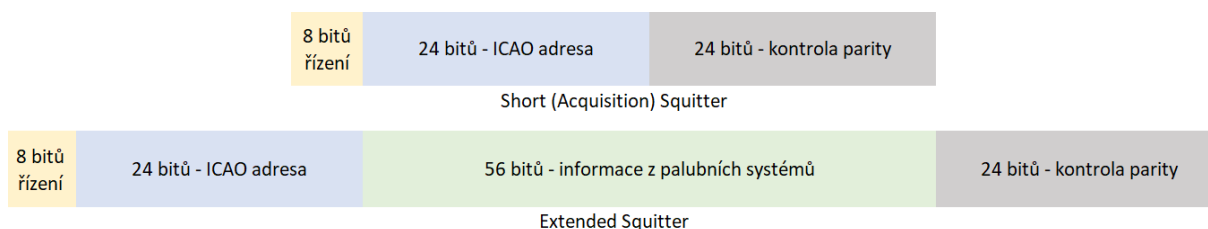
K přenosu ADS-B zpráv jsou využívány 3 různé technologie.

- Základní a mezinárodně uznávanou technologií je tzv. 1090ES, neboli přenos ADS-B zpráv na frekvenci 1090 MHz. Tedy na stejné frekvenci, na které jsou přenášeny odpovědi palubních odpovídačů na dotazy od pozemních sekundárních radarů. Tato technologie představuje celosvětový standard pro dopravní letadla využívaná v obchodní letecké dopravě. V určitých částech světa, mezi které se řadí například i Evropa, je však ADS-B založeno na této technologii i pro letadla všeobecného letectví. [24]
- Alternativu k 1090ES představuje Universal Access Transceiver (UAT). Tato technologie využívá k přenosu ADS-B zpráv frekvenci 978 MHz a je využívána na regionální úrovni. Typický příklad představují Spojené státy americké, kde je UAT využíváno pro všeobecné letectví. [24]
- Poslední technologií, která je s potenciálním využitím pro ADS-B spjata, je VDL Mode 4. Původně měla představovat pro ADS-B přenos primární technologii, následně však byla nahrazena 1090ES. V současnosti je tak využívána velice zřídka na regionálních úrovních. [24]

Technologii ADS-B můžeme dále rozdělit na ADS-B Out a ADS-B In. Zjednodušeně řečeno, letadlo vybavené technologií out je schopno vysílat zprávy, které jsou vztažené k aktuálnímu stavu letadlových systémů, na druhou stranu letadlo doplněné

o technologii in je pak schopno přijímat doplňkové informace z pozemních stanic o počasí či okolním provozu. [25]

Letadlo vybavené technologií ADS-B Out vysílá své zprávy v podobě tzv. Short, případně Extended, Squitteru. Tyto dva odlišné pojmy definují, jaký bude obsah informací ve vysílaných zprávách. Short Squitter, někdy nazývaný také jako Acquisition Squitter, poskytne přijímací stanici pouhý údaj o identifikaci letadla, které danou zprávu vyslalo. Takováto zpráva může být využitelná především v systémech ACAS nebo již zmiňované multilateraci a její délka činí 56 bitů. Lze říci, že Extended Squitter je v principu založen na Short Squitteru, avšak jeho délka je v tomto případě dvojnásobná. Jedná se prakticky o Short Squitter zprávu doplněnou o dalších 56 bitů, které reprezentují právě dodatečné informace z palubních systémů. Toto je znázorněno na obrázku 5. [24]



Obrázek 5 - Srovnání Short a Extended Squitteru [24]

Z pohledu této práce je zajímavých právě 56 bitů, které v Extended Squitteru nesou informace z palubních systémů, jelikož právě z této části zpráv lze získávat informace o poloze, její přesnosti, headingu nebo rozměrech daného letadla. Přesný obsah informací, které se v těchto 56 bitech vyskytují, však není pevně stanoven. V závislosti na typu avioniky, stavu palubních systémů nebo například faktu, zda je letadlo ve vzduchu, či na zemi, se druh informací, obsažených v této části zprávy, může lišit. [24]

Tato část zprávy je tvořena tzv. BDS registry, které se liší právě druhem obsažených informací. Kupříkladu polohové informace letadla na zemi jsou vysílány v rámci BDS 0,6, zatímco polohové informace letadla za letu jsou vysílány v rámci BDS 0,5. [24]

Právě typy BDS registrů, které je avionika schopna ve svých zprávách vysílat, definují ADS-B verzi, kterou daná avionika disponuje. S postupem času se množství informací, které zvládají avioniky vysílat, rozšiřuje, k dnešnímu dni tak lze hovořit o 4 ADS-B verzích. [24]

- Verze 0 = DO-260/ED-102
- Verze 1 = DO-260A
- Verze 2 = DO-260B/ED-102A
- Verze 3 = DO-260C

V praxi jsou v současnosti využívány pouze verze DO-260 a DO-260B. Typicky je verze DO-260 vyžadována v prostorech s nižší hustotou provozu a verze DO-260B pak v prostorech s vysokou hustotou provozu, jako je například vzdušný prostor nad Evropou či Spojenými státy americkými. V Evropě musí být od 7. 7. 2020 vybavena verzí DO-260B všechna letadla, jejichž maximální vzletová hmotnost přesahuje 5700 kg nebo jejichž cestovní rychlost je vyšší než 250 uzlů. Verze DO-260A byla navrhována, nicméně v praxi nikdy využívána nebyla. [24, 26, 27]

Poslední a zároveň nejnovější verze DO-260C prošla v prosinci roku 2020 schvalovacím procesem. V současnosti není tento standard nikde vyžadován, avšak lze očekávat, že v budoucnu nahradí ve vytížených prostorech požadavek na verzi DO-260B. Z pohledu této práce je tento nový standard obzvláště zajímavý, jelikož definuje, jakým způsobem lze do ADS-B zpráv zakomponovat informaci o poloze antény odpovídače na letadle. V praxi tak bude v budoucnu možné určit, jak je anténa odpovídače vzdálena od přední části letadla. Právě tento údaj je zcela zásadní pro dosažení lepší přesnosti určování polohy letadel pomocí multilateračních systémů na letištních plochách. V současnosti není získání takového údaje z jakýchkoliv provozních zpráv přenášených z letadel možné. Letištní přehledové systémy tedy s tímto údajem v současnosti nepracují, což by se mohlo do budoucna změnit. [24, 28]

Každá vyšší verze pak je v rámci kritických informací, jako je například poloha či rychlost, zpětně kompatibilní s verzí předchozí, co se týče ostatních dat, může docházet mezi jednotlivými verzemi k drobným nuancím ve způsobu kódování informací do zpráv. [29]

4 ASTERIX zprávy

Do 80. let 20. století neexistoval prakticky žádný standard, který by definoval, v jakém formátu mají být data z přehledových systémů dále šířena ke svým uživatelům. Formáty, v jakých byla tato data šířena, se tak mohly mezi jednotlivými středisky lišit. V praxi to znamenalo, že např. řízení letového provozu v rámci jednoho státu nebylo schopno využívat údaje z přehledového systému umístěného ve státě sousedním. Množství přehledových systémů navíc neustále narůstalo a situace se tak stávala dále neudržitelná. Evropa byla v tomto ohledu jednou z nejvíce postižených oblastí vzhledem k objemům zdejší letecké dopravy v kombinaci s velkým množstvím vzdušných prostorů řízených z odlišných států. Proto se v 80. letech zrodila myšlenka formáty jednotlivých středisek sjednotit a umožnit tak lepší interoperabilitu jejich přehledových systémů. [30]

V průběhu následujících let vznikl standardizovaný evropský protokol ASTERIX, který definuje, jakým způsobem jsou přehledová data přenášena na bitové úrovni. Vzhledem k potenciálnímu velkému objemu zpráv, který může být v tomto formátu přenášen, a zároveň k možné pomalé přenosové rychlosti, byl při tvorbě protokolu ASTERIX kladen důraz na co nejmenší datovou zátěž. Toto se tedy v podobě a údajích zakomponovaných v těchto zprávách odráží. Správcem a tvůrcem tohoto standardu je Eurocontrol na jehož webu jsou zveřejněny detailní informace o jeho podobě. [31]

Přenášená data jsou na základě svého původu přidělena jednotlivým numericky značeným datovým kategoriím, kdy každá z nich má definovaný způsob kódování, který je veřejně znám. Podle účelu, ke kterému přenášená data slouží, jsou datové kategorie přidělovány z následujících intervalů. [31]

- 000 – 127: Standardní civilní a vojenské aplikace
- 128 – 240: Speciální civilní a vojenské aplikace
- 241 – 255: Civilní a vojenské nestandardní aplikace

Pro účely šíření dat z letištních přehledových systémů pak slouží kategorie následující:

- CAT010 – Zprávy pojezdového radaru
- CAT011 – A-SMGCS zprávy
- CAT020 – Multilaterační zprávy
- CAT021 – ADS-B zprávy

Tyto kategorie jsou dále děleny na tzv. datové položky. Každá datová položka již reprezentuje konkrétní údaj, který lze z takové zprávy získat. Datové položky mohou být povinné, v takovém případě jsou obsaženy ve veškerých zprávách dané kategorie, typicky to bude například polohový údaj ve formátu geodetických souřadnic. Naopak volitelné datové položky ve zprávách zastoupeny být nemusí. V tomto případě se může jednat kupříkladu o datovou položku vztaženou k rozměrům letadla ve zprávách CAT021. Datové položky jsou tvořeny datovými poli v podobě oktety. Každá datová položka může být tvořena 1 i více oktety. [32]

Ne všechny datové položky jsou obsaženy v základním definičním souboru dané kategorie. Některé datové položky vybraných přehledových zařízení mohou být obsaženy v tzv. vyhrazeném rozšiřujícím poli (Reserved Expansion Field), které slouží pro postupné doplňování nových údajů do již existujících kategorií.

Dále jsou uvedeny položky reprezentující stěžejní údaje, které mohou k řešení problematiky detekce přesné polohy koncových částí letadel v oblastech vyčkávacích míst přispívat. Některé z nich budou v následujících částech této práce využívány za účelem ověření efektivity potenciálního řešení problematiky kolizí letadel v oblastech vyčkávacích míst právě za pomoci současných přehledových systémů.

U vysvětlení jednotlivých položek je často využíván pojem nejmenší významný bit (LSB), ten vzhledem k použitému principu kódování údajů do binárního tvaru reprezentuje nejmenší možný odstup 2 po sobě jdoucích hodnot, kupříkladu je-li veličinou dané položky vzdálenost a LSB odpovídá 10 m, potom je z takto kódovaných zpráv možné získat pouze údaje ..., 0, 10, 20, 30, ... metrů.

U **pojezdového radaru** jsou to položky následující.

- I010/041 – Souřadnice WGS-84
Položka tvořená 8 oktety obsahující geodetické souřadnice zeměpisné šířky i délky. LSB je v tomto případě $180/2^{31}$ stupňů. [33]
- I010/042 – Kartézské souřadnice
Některé přehledové systémy pracují také v souřadnicích kartézských, v případě pojezdového radaru je to soustava souřadnic, která má střed v místě výskytu radaru, je tečná k elipsoidu WGS-84, osa y směřuje k zeměpisnému severu, osa x je k ní kolmá a směřuje k východu a jejich 1 jednotka odpovídá LSB o hodnotě 1 m. Tato položka je tvořena

4 oktety, jedné ose tedy připadají oktety 2, což definuje maximální možnou hodnotu na jednotlivých osách ± 32768 m. [33]

- I010/500 – Přesnost polohy

Pojezdové radary dokáží na základě znalosti svých charakteristik odhadovat parametry přesnosti. Tyto údaje jsou zde indikovány za pomoci 4 oktetů. První oktet reprezentuje směrodatnou odchylku chyby na ose x, druhý pak na ose y. LSB je v obou případech 0,25 m. Poslední dva oktety představují kovarianci těchto 2 hodnot s LSB 0,25 m². [33]

U **multilaterace** jsou to položky následující.

- I020/020 – Deskriptor cílové zprávy

Z této položky lze získat tzv. ground bit, který indikuje, zda je letadlo na zemi. [34]

- I020/041 – Souřadnice WGS-84

Položka tvořená 8 oktety obsahující geodetické souřadnice zeměpisné šířky i délky. LSB je v tomto případě $180/2^{25}$ stupňů. Tento údaj je povinný pouze u multilateračních systémů, které sledují vzdušné cíle (WAM), při letištním užití je tato položka volitelná, pokud je přítomna položka I020/042. [34]

- I020/042 – Kartézské souřadnice

Letištní multilaterační systémy pracují primárně s kartézskými souřadnicemi. Na rozdíl od pojezdového radaru je zde každá souřadná osa reprezentována 3 oktety, LSB odpovídá v tomto případě 0,5 m. Středem této soustavy souřadnic je zpravidla vztažený bod letiště. [34]

- I020/500 – Přesnost polohy

Stejně jako u pojezdového radaru, i multilaterační systémy dokáží odhadovat parametry svojí přesnosti. Jak plyne z popisu principu funkce tohoto systému, uvedeného na předchozích stranách, přesnost udávané polohy je v tomto případě primárně ovlivňována konstelací přijímacích stanic, na které daný signál doputoval a které byly při výpočtech použity jakožto ohniska hyperboloidů a elipsoidů. Z této znalosti pak systém vytváří a dále šíří parametry přesnosti, opět v podobě směrodatné odchylky na osách x a y, kdy LSB odpovídá 0.25 m. V tomto případě je však jedna směrodatná odchylka tvořena 2 oktety, čímž je dosaženo její

vyšší maximální hodnoty. Dalším rozdílem je zde přítomnost korelačního koeficientu namísto kovariance. Ten je reprezentován 2 oktety s LSB = 0,25. Dále jsou ještě součástí této položky parametry DOP a směrodatná odchylka geometrické výšky. [34]

- REF-PA – Přesnost polohy

Nově se v posledních verzích zpráv ASTERIX objevuje v poli REF další údaj o přesnosti polohové informace. Primárním rozdílem je doplnění informací o přesnosti v geodetických souřadnicích, zatímco na poli I020/500 jsou obsaženy údaje o přesnosti vztažené pouze k souřadnicím kartézským. To však při využití multilaterace, jakožto pozemního letištního přehledového systému, nepředstavuje významný benefit. Ovšem i přesnost v kartézských souřadnicích může být v poli REF obsažena. Zde je hlavním rozdílem přítomnost kovariance namísto korelačního koeficientu. LSB pro kovarianci činí opět 0,25 m². V položce I020/500 může korelační koeficient nabývat ve svém intervalu od -1 do 1 pouze 9 hodnot, což může mít negativní dopad na přesnost posléze vytvářených konfidenčních elips. V případě, kdy je v položce REF-PA k dispozici přímo kovariance, by mělo být ze zpráv možné vytvářet konfidenční elipsy s přesněji určenou orientací. Zároveň je nutné zmínit, že položky udávající přesnost multilateračního systému jsou zařazeny mezi volitelné, a tedy zda a případně v rámci jaké z těchto 2 položek budou ve zprávách zastoupeny je čistě v kompetenci výrobců multilaterační techniky. Novější systémy by měly využívat spíše položku REF-PA. [35]

U **ADS-B** jsou to položky následující.

- I021/020 – Deskriptor cílové zprávy

Z této položky lze opět získat již zmiňovaný ground bit. [32]

- I021/090 – Indikátory kvality

Tato položka je povinná a obsahuje údaje o přesnosti a integritě daného systému. S každou další verzí ADS-B se přenášené informace vztažené k těmto parametrům odlišují. Vzhledem k povinné implementaci verze 2 na většině rušných letišť jsou zde uvedené údaje odpovídající právě této verzi. Zároveň ne všechny indikátory kvality jsou z hlediska řešené

problematiky podstatné, proto budou uvedeny pouze některé. Pro přesnost je stěžejní parametr NAC_p , který vychází z parametru HFOM a lze z něho tedy získat poloměr kružnice, jejímž středem je udávaná poloha a uvnitř které se s 95% pravděpodobností cílový objekt skutečně nachází. Způsob výpočtu tohoto parametru není striktně daný a zároveň by neměl být využíván k SoL aplikacím. Základní údaj o přesnosti z něho však získat lze. NAC_p může nabývat hodnot v decimálním tvaru 0 až 15 s tím, že každé číslo reprezentuje definovaný poloměr kružnice. Nejmenší možná kružnice pro NAC_p má poloměr 3 m, ovšem této hodnoty by mělo být stabilně dosahováno pouze v oblastech s pokrytím GBAS. Další 2 přenášené parametry se již týkají integrity, určitou představu o přesnosti z nich však vyčíst lze. SIL parametr představuje pravděpodobnost překročení NIC parametru, aniž by to bylo detekováno (tabulky 1 a 2). NIC parametr udává, z jakého intervalu je v danou chvíli hodnota HPL, se kterou letadlový navigační systém pracuje. [32, 36]

Tabulka 1 - Poloměry kružnic NIC parametru při pozemním provozu [36]

NIC (decimální)	Poloměr kružnice (HPL)
0	Neznámý nebo $1111,2 \text{ m} < R_c$
6	$926 \text{ m} < R_c < 1111,2 \text{ m}$
	$555,6 \text{ m} < R_c < 926 \text{ m}$
	$370,4 \text{ m} < R_c < 555,6 \text{ m}$
7	$185,2 \text{ m} < R_c < 370,4 \text{ m}$
8	$75 \text{ m} < R_c < 185,2 \text{ m}$
9	$25 \text{ m} < R_c < 75 \text{ m}$
10	$7,5 \text{ m} < R_c < 25 \text{ m}$
11	$R_c < 7,5 \text{ m}$

Tabulka 2 - Pravděpodobnosti vztažené k SIL [36]

SIL (decimální)	Pravděpodobnost překročení poloměru daného NIC
0	Neznámý nebo $p > 1 \times 10^{-3}$
1	$p \leq 1 \times 10^{-3}$
2	$p \leq 1 \times 10^{-5}$
3	$p \leq 1 \times 10^{-7}$

- I021/130 – Souřadnice WGS-84
 Položka tvořená 6 oktety obsahující geodetické souřadnice zeměpisné šířky i délky. LSB je v tomto případě $180/2^{23}$ stupňů. To zajišťuje rozlišení minimálně 2,4 m. V každé zprávě musí být přenášena 1 z položek I021/130 a I021/131. [32]
- I021/131 – Souřadnice WGS-84 ve vysokém rozlišení
 Položka tvořená 8 oktety obsahující geodetické souřadnice zeměpisné šířky i délky. LSB je v tomto případě $180/2^{30}$ stupňů. To zajišťuje rozlišení minimálně 2 cm. [32]
- I021/152 – Magnetický heading
 Volitelná položka obsahující magnetický heading, kde LSB odpovídá přibližně 0.0055° . [32]
- I021/271 – Pozemní schopnosti a charakteristiky
 Položka tvořená 2 oktety, na základě 6. bitu z prvního oktetu lze zjistit tzv. parametr POA, tedy zda je udávaná poloha pouhou polohou GNSS antény (bit=0), či zda je aplikován offset GNSS antény a udávaná poloha odpovídá tzv. ADS-B referenční poloze, která je definována jakožto střed obdélníku, jehož strany jsou rovny rozpětí a délce letadla a který je půdorysu letadla opsán (bit=1). Druhou cestou, jak řešit problematiku offsetu GNSS antény, je vysílání hodnoty vzdálenosti antény od přední části letadla v položce REF-GAO. [32, 36, 37]
 Další podstatný údaj, který lze z této položky získat, je kódován v bitech 5-8 druhého oktetu. Tyto bity reprezentují decimální číslice od 0 do 15, kde každé číslo představuje určitou kombinaci šířky a délky letadla (tabulka 3). Tyto údaje pak spadají vždy do určitého intervalu, podobně, jako tomu bylo u parametrů NAC_p, NIC a SIL. [32, 37]

Tabulka 3 - Kódování rozměrů letadel v ASTERIX zprávách u ADS-B verze 2 a vyšší [32]

Decimální hodnota z ASTERIX zprávy	Délka (m)	Šířka (m)
0	L < 15	W < 11,5
1		W < 23
2	L < 25	W < 28,5
3		W < 34
4	L < 35	W < 33
5		W < 38
6	L < 45	W < 39,5
7		W < 45
8	L < 55	W < 45
9		W < 52
10	L < 65	W < 59,5
11		W < 67
12	L < 75	W < 72,5
13		W < 80
14	L < 85	W < 80
15	L > 85	W > 80

- REF-GAO – Offset GNSS antény
Volitelná položka tvořená 1 oktetem, který definuje podélný i příčný offset GNSS antény. LSB v tomto případě odpovídá 2 m. [38]
- REF-STA – Status letadla
Volitelná položka složená až z 6 oktetů. Informace z 2. až 6. oktetu jsou získávány pouze při použití ADS-B verze 3 a byly definovány až v prosinci roku 2021. V současnosti tedy představují spíše přípravu na implementaci této ADS-B verze do provozu. Mezi těmito oktety lze však nalézt jeden, který je částečně vyhrazen pro přenášení informací o podélném offsetu antény odpovídače (TAO), což představuje významný benefit pro letištní multilaterační systémy. Rozlišovací schopnost je zde 1 m pro hodnoty od 0 do 2 m a dále pak 2 m pro hodnoty od 2 do 58 m. Je však nutné si uvědomit, že ne ve všech

případech jsou antény odpovídačů umístovány přímo do oblasti podélné osy letadla. Kupříkladu u Boeingu 737 se tato anténa, umístěná v horní části trupu, skutečně nachází v oblasti jeho podélné osy, oproti tomu Airbus A320 má však v horní části antény umístěné dvě, a to symetricky ve vzdálenosti přibližně 0,5 m na každou stranu od jeho podélné osy. Multilaterační systém není schopen určit, ze které z těchto 2 antén signál přijal, tato skutečnost by tak do procesu přesné lokalizace letadla, za pomoci multilaterace, mohla vnášet určitou nejistotu. [38–40]

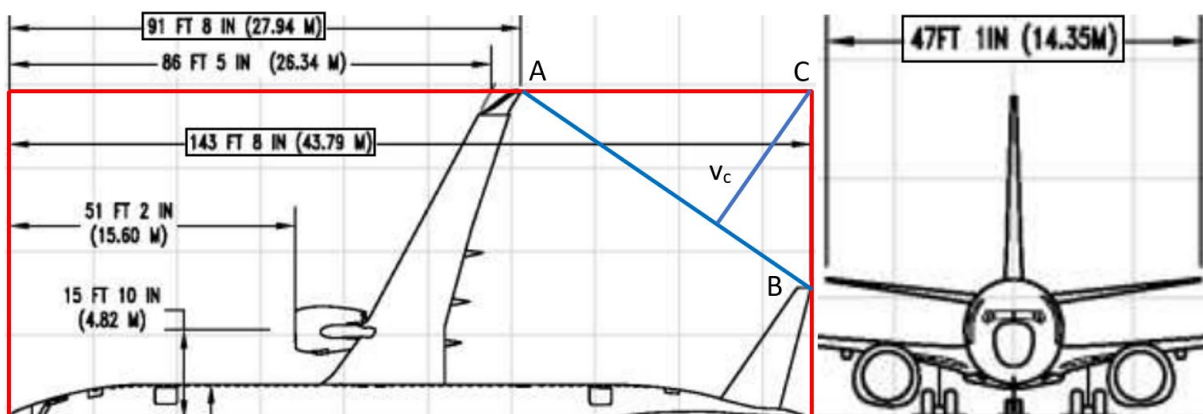
- REF-TNH – Zeměpisný heading
Volitelná položka obsahující zeměpisný heading, kde LSB odpovídá přibližně 0.0055° . [38]

U **A-SMGCS** jsou to položky následující.

- I011/041 – Souřadnice WGS-84
Položka tvořená 8 oktety obsahující geodetické souřadnice zeměpisné šířky i délky. LSB je v tomto případě $180/2^{31}$ stupňů. [41]
- I011/042 – Vypočtené kartézské souřadnice
Tato položka je tvořena 4 oktety, jedné ose tedy připadají oktety 2, což definuje při LSB = 1 m maximální možnou hodnotu na jednotlivých osách ± 32768 m. Osy jsou opět směřovány k zeměpisnému severu pro osu y a východu pro osu x. [41]
- I011/170 – Status tracku
Z této položky lze opět získat již zmiňovaný ground bit. [41]
- I011/500 – Odhadovaná přesnost polohy
Údaje o přesnosti udávané polohy jsou zde dopočítávány na základě toho, z jakých zdrojů byla data fúzována a jaká byla jejich původní přesnost. Konkrétní algoritmus, jakým by toto mělo být prováděno však definován není. V této položce jsou obsaženy údaje o směrodatné odchylce dat na jednotlivých osách jak v kartézských, tak v geodetických souřadnicích. Nevystupuje zde však žádný údaj o vzájemné korelaci těchto dat, což jejich další zpracování komplikuje. [41]

5 Údaje o rozměrech letadel

Jak plyne z informací uvedených v kapitole 4, díky systému ADS-B může A-SMGCS v dnešní době, bez jakékoliv další databáze, pracovat s údaji o délce a šířce letadla, poloze jeho GNSS antény a po zavedení ADS-B verze 3 také s údaji o poloze antény palubního odpovídače. Pro určování koncových poloh letadla je pak také důležitá schopnost zpracování aktuálního headingu. V případě, kdy bychom řešili v problematice míjení letadel v oblastech vyčkávacích míst situaci, kdy jsou orientace obou letadel na sebe kolmé, jsou tyto údaje dostatečné. Jediným zdrojem nejistoty bude v tomto případě, při využití multilateračního systému, přesnost určení samotné polohy odpovídače v prostoru a posléze nutnost uvažování nejhoršího možného scénáře, tedy pokud letadlo poskytuje informaci o poloze antény odpovídače v rozmezí 2 m, například 6 až 8 m od přední části letadla, je třeba uvažovat pro tento rozměr hodnotu 6 m, aby byla celá situace posunuta bezpečným směrem. Stejný princip je nutné aplikovat i na samotné rozměry letadla, tedy v tomto případě jeho délku. Problém však nastává v případě, kdy orientace obou letadel na sebe nejsou kolmé. V takovém případě již pouhý údaj o rozpětí a délce letadla není dostatečný. V tomto případě je třeba pro efektivní řešení problematiky kolizí 2 letadel znát ještě údaje o rozpětí stabilizátoru a vzdálenosti kolmému průmětu konce křídla (A) a stabilizátoru (B) na podélnou osu letadla od jeho přední části. Jedná se o rozměry uvedené v černých rámečcích na obrázku 6.



Obrázek 6 - Dodatečné potřebné rozměry letadel (B737-10), podklad [39]

Jak je z obrázku 6 dále patrné, rozměr pro vzdálenost průmětu stabilizátoru od přední části letadla je v případě Boeingu 737 shodný s jeho délkou. Tak je tomu i v případě většiny v současnosti provozovaných dopravních letadel. Výjimkou mohou být letadla z rodiny Airbus A320, u kterých je jejich nejzazší částí výstup z APU. Rozdíl mezi

těmito dvěma rozměry je však v kontextu celkové délky letadla velice malý, činí řádově několik desítek centimetrů, a proto je možné ho zanedbávat. Navíc se tímto zanedbáním posouvá řešení této problematiky na bezpečnou stranu, jelikož v jeho důsledku uvažujeme, že jsou koncové části stabilizátoru blíže k potenciální překážce.

Dále je na obrázku vyobrazena červenou barvou oblast, která reprezentuje možný výskyt koncových částí letadla v případě, kdy známe pouhé údaje o délce a rozpětí. V takovém případě je zapotřebí uvažovat možný výskyt části letadla i v bodě C, ve kterém se však, s přihlédnutím ke geometrii jeho půdorysu, ve skutečnosti žádná část letadla nevyskytuje. Vzhledem k již uvedenému způsobu kódování těchto údajů do bitového tvaru navíc rozměry této červené oblasti, v naprosté většině případů, nebudou odpovídat skutečné délce a šířce letadla, nýbrž nejbližším větším hodnotám rozměrů tak, jak je uvedeno v tabulce 3. Pokud jsou však známy zmiňované vzdálenosti na podélné ose a rozpětí stabilizátoru, je možné lokalizovat přímo koncové části letadla v bodech A a B. Pokud by bylo letadlo na obrázku míjeno druhým letadlem, které by za ním pojíždělo po přímce rovnoběžné s úsečkou AB, pak znalost těchto rozměrů posune hranici identifikace hrozící kolize o vzdálenost rovnou výšce trojúhelníka ABC na stranu c (v_c). Pro názornost jsou hodnoty této vzdálenosti pro vybraná letadla uvedeny v tabulce 4, která vychází z dat veřejně přístupných dokumentací k jednotlivým typům letadel. Tato data jsou určena k plánování letišť uveřejněných na webových stránkách jednotlivých výrobců letadel.

Tabulka 4 - Vzdálenosti v_c u vybraných typů letadel [autor]

Typ letadla	Vzdálenost v_c (m)
A320neo	9,0
A330-900	14,8
A350-1000	16,3
A380-800	15,8
B737-8	8,6
B737-10	8,9
B767-400	13,0
B777-9	15,8
B747-8	15,2

Implementace těchto chybějících rozměrů do výpočetního algoritmu identifikujícího potenciální kolize je teoreticky možná za pomoci databáze, která by tyto rozměry sdružovala v závislosti na konkrétním typu letadla. Tento přístup bude využit v následujících částech této práce věnované návrhu konkrétního výpočetního algoritmu.

Druhým přístupem by byla teoretická možnost implementace chybějících rozměrů do ADS-B zpráv. Vzhledem k již zmiňovanému charakteru těchto zpráv by však bylo nutné tato data kódovat do co nejmenšího počtu bitů. Již bylo uvedeno, že vzdálenost k průmětu konce stabilizátoru na podélné ose letadla je možné zanedbat, zbývají tedy pouze 2 další údaje, které by bylo pro potřeby problematiky této práce do ADS-B zpráv implementovat. Lze se domnívat, že rozpětí stabilizátoru je určitým způsobem závislé na rozpětí samotných křídel, v tom případě by bylo teoreticky možné definovat maximální hodnoty rozpětí stabilizátoru v závislosti na hodnotě získané z druhého oktetu položky I021/271 ASTERIX zpráv, tedy na tom, do jaké rozměrové kategorie je letadlo zařazeno. Tyto rozměry by mohly být určeny například takovým způsobem, že by se vyhledal minimální poměr rozpětí křídel ku rozpětí stabilizátoru u letadel spadajících do dané rozměrové kategorie. Tímto poměrem by se pak podělilo samotné, již dříve určené, maximální rozpětí křídel dané rozměrové ADS-B kategorie, čímž by se získala hodnota rozpětí stabilizátoru, kterou žádné letadlo dané kategorie nepřesahuje. Tyto hodnoty rozpětí stabilizátorů by potom byly přiděleny každé z 15 rozměrových kategorií. Výsledkem by tedy bylo to, že na základě zařazení letadla do ADS-B rozměrové kategorie by bylo možné mimo maximální rozměr jeho možné délky a rozpětí křídel také určit maximální možné rozpětí jeho stabilizátoru. Alternativou k tomuto nebo obdobnému řešení je tvorba nové položky ADS-B zpráv, která by tento údaj reprezentovala. Tím by mohlo být dosaženo jeho vyšší přesnosti, avšak přinášelo by to s sebou i nežádoucí prodloužení délky těchto zpráv.

Druhý chybějící údaj vztažený ke vzdálenosti průmětu konce křídel na podélnou osu letadla již, bohužel, k délce či šířce letadla vázaný není. Tento údaj může být ovlivněn několika dalšími faktory, například úhlem šípů daného křídla či samotnou konstrukcí letadla, zde se jedná především o polohu provozního rozmezí jeho těžiště. Pro tento údaj by tak bylo nutné do BDS registrů a následně odpovídajících ASTERIX zpráv implementovat nové položky.

6 Princip navrhovaného řešení v podobě algoritmu detekujícího vzdálenost mezi letadly

Tato kapitola se zabývá popisem toho, jakým konkrétním způsobem lze za pomoci využití dat z přehledových systémů identifikovat riziko hrozící kolize letadel v oblastech vyčkávacích míst. Aby bylo možné určit, zda má letadlo pojíždějící po přilehlé pojezdové dráze pro svůj průjezd dostatek prostoru, je třeba znát jeho rozpětí křidel a polohu koncových částí letadla vyčkávacího. U letadla pojíždějícího po přilehlé pojezdové dráze lze předpokládat, že jeho konce křidel budou opisovat přímku rovnoběžnou s osovým značením dané pojezdové dráhy vzdálenou od tohoto značení $\frac{1}{2}$ délky rozpětí tohoto letadla. Určení polohy koncových částí vyčkávacího letadla za pomoci dat z přehledových systémů je však již komplikovanější záležitostí. Jakým způsobem lze tyto údaje získat při využití polohových dat z multilateračního systému je rozepsáno na následujících řádcích.

Nejprve je nutné získat polohové informace z položky I020/042. Tento údaj reprezentuje umístění středu konfidenční elipsy, kterou lze získat z kovarianční matice tvořené prvky obsaženými v položkách I020/500, případně pro novější systémy REF-PA. Tvorba samotné elipsy vyžaduje nalezení vlastních čísel a vektorů sestrojené kovarianční matice. Velikost konfidenční elipsy je pak ještě ovlivněna požadovanou hladinou významnosti. Po vytvoření konfidenční elipsy je tedy vymezena oblast, uvnitř které se na dané hladině významnosti vyskytuje anténa odpovídače sledovaného letadla. Následně je zapotřebí nalézt bod konfidenční elipsy, který se nachází nejbližší přilehlé pojezdové dráze, tím je zajištěno, že algoritmus zohlední nejméně příhodný stav, který v danou chvíli mohl, na zvolené hladině významnosti, nastat. Zároveň je zde možné uvažovat, že se anténa odpovídače musí nacházet nad plně únosnou vozovkou pojezdové dráhy, tudíž je možné z výpočtu vyloučit ty části konfidenčních elips, které se nachází mimo tyto prostory. Dále je možné, ze znalosti offsetu antény odpovídače, magnetického headingu přepočteného na zeměpisný a rozměrů samotného letadla, za pomoci goniometrických funkcí dopočítat konkrétní polohu koncových ploch letadla. V případě, že je získaný heading z ADS-B zprávy správný a zároveň jsou známy zmiňované rozměry z kapitoly 5 (2 průměty, přesné rozpětí, přesná délka i přesný offset antény odpovídače), není do tohoto výpočtu vkládána žádná další nepřesnost. Takto jsou získány souřadnice 6 bodů, konce křidel, konce

stabilizátoru, nos a ocas letadla. Ze všech těchto 6 bodů je nalezen 1, jehož vzdálenost k přilehlé pojezdové dráze dosahuje nejnižší hodnoty.

Tento bod představuje kritický bod, jehož vzdálenost od osy přilehlé pojezdové dráhy musí být větší, než je $\frac{1}{2}$ rozpětí letadla, které získalo povolení k průjezdu po přilehlé pojezdové dráze. Je žádoucí do systému také zavést minimální vzdálenost, která musí být mezi letadly dodržena, aby se zohlednil fakt, že se pojíždějící letadlo nemusí zcela přesně pohybovat po značení osy přilehlé pojezdové dráhy.

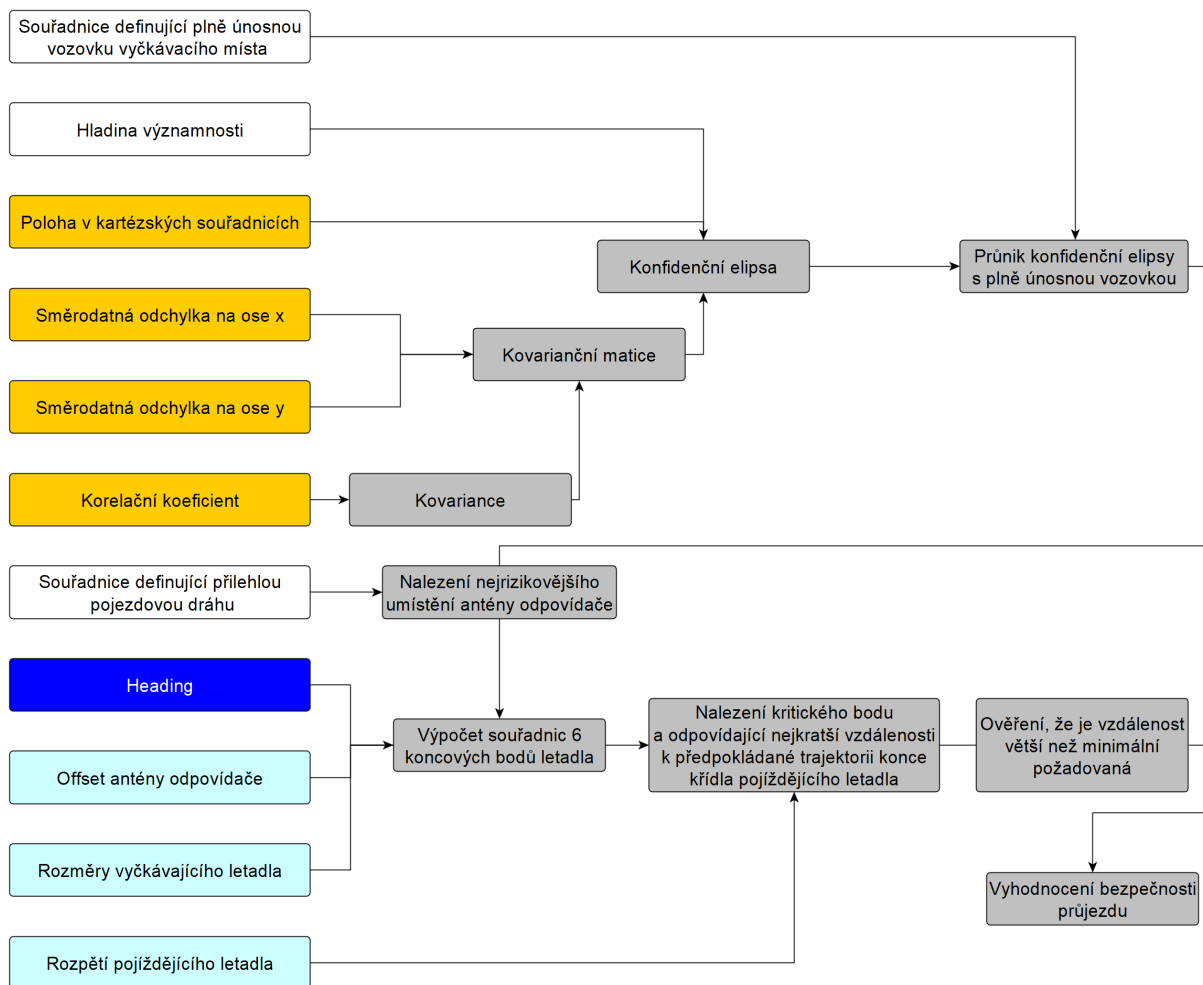
Na první pohled by se mohlo také zdát, že je třeba v celém algoritmu zohledňovat fakt, zda letadlo na vyčkávacím místě již zastavilo, či nikoli. Ve skutečnosti však, vzhledem k principu navrhovaného algoritmu, tuto skutečnost není zapotřebí sledovat. Průjezd druhého letadla může být označen za bezpečný ihned poté, co algoritmus alespoň z jedné zprávy vyhodnotí, že je vzdálenost mezi koncovými částmi letadel dostatečná nezávisle na tom, zda je letadlo na vyčkávacím místě v pohybu, či zda stojí. V reálné aplikaci by potom bylo z pohledu spolehlivosti systému příhodné stanovit hodnotu minimálního počtu zpráv, které by musely indikovat dostatečnou vzdálenost mezi oběma letadly, až poté by mohl být průjezd označen za bezpečný. Opět však v celé situaci nehraje roli informace o tom, zda je vyčkávající letadlo v pohybu.

6.1 Nejistoty výpočtu vzdálenosti mezi letadly pomocí navrhovaného algoritmu

Zde je důležité zdůraznit, že vypočtená hodnota vzdálenosti mezi letadly svým charakterem představuje minimální možnou vzdálenost na zvolené hladině významnosti, nikoliv její přesnou reálnou hodnotu. Vzhledem k charakteru algoritmu platí, že reálná vzdálenost bude alespoň v procentech případů, odpovídajících zvolené hladině významnosti, vyšší nebo rovna hodnotě vypočtené. Tak by tomu tedy bylo alespoň v případě, kdy by jedinou nejistotou takového výpočtu byla nepřesnost multilateračního systému. Ve skutečnosti však do výpočetního algoritmu vstupují ještě další nejistoty. Jedná se především o použité rozměry letadel. Pokud je systém schopen identifikovat přesné typy letadel a k nim přiřadit patřičné rozměry, není do samotného procesu lokalizace koncových ploch vůči udávané poloze vkládána žádná další nejistota. Pokud by však systém pracoval pouze s údaji o rozměrech a poloze antény obsaženými v ADS-B zprávách, je do výpočtu vložena nejistota další. Ta je v tomto případě navíc závislá jak na konkrétním typu letadla, tak i na jeho samotné orientaci (viz kapitola 5). Při výpočtu je tak nutné zohlednit, že se koncové plochy

letadla mohou nacházet kdekoliv v rámci obdélníka definovaného získanými ADS-B rozměry. Další, do procesu výpočtu vložená, nejistota je spjata s charakterem samotných multilateračních systémů. Ty pracují v sítích kartézských souřadnic, kde 1 jednotka reprezentuje 0,5 m. Již samotný údaj o středu elipsy tedy bude ve většině případů zaokrouhlen. Teoretická maximální míra zaokrouhlení je rovna 0,35 m, což je hodnota velikosti poloviny úhlopříčky čtverce se stranou 0,5 m. Jelikož celý výpočet také spoléhá na hodnotu headingu, kterou stanovuje samotné letadlo, může i tento údaj představovat zdroj určité nepřesnosti v lokalizaci koncových ploch daného letadla. V současnosti není kvalita tohoto údaje žádným způsobem v ADS-B zprávách hodnocena, v tomto ohledu tedy nezbývá než spoléhat na jeho pravdivost.

Schematicky je algoritmus znázorněn na obrázku 7. Prvky získané z multilateračního systému jsou vyobrazeny žlutou barvou, prvky z ADS-B zpráv tmavě modrou barvou, prvky z předem vytvořené databáze bílou barvou a prvky, které je možné implementovat jak pomocí ADS-B zpráv, tak i předdefinovanou databází, barvou bledě modrou. Šedá barva odpovídá prvkům, které jsou předměty postupných výpočtů.



Obrázek 7 - Schematické zobrazení výpočetního algoritmu [autor]

6.2 Způsob ověření efektivity navrhovaného algoritmu

Jak vyplývá z předchozí kapitoly, výkonnost a s tím i spojená efektivita navrhovaného algoritmu je především ovlivněna samotnou přesností polohových údajů získaných z přehledových systémů a dále potom tím, s jak přesnými rozměry jednotlivých typů letadel dokáže systém pracovat. Právě na sledování a posouzení těchto parametrů jsou zaměřeny následující kapitoly.

7 Analýza přehledových dat

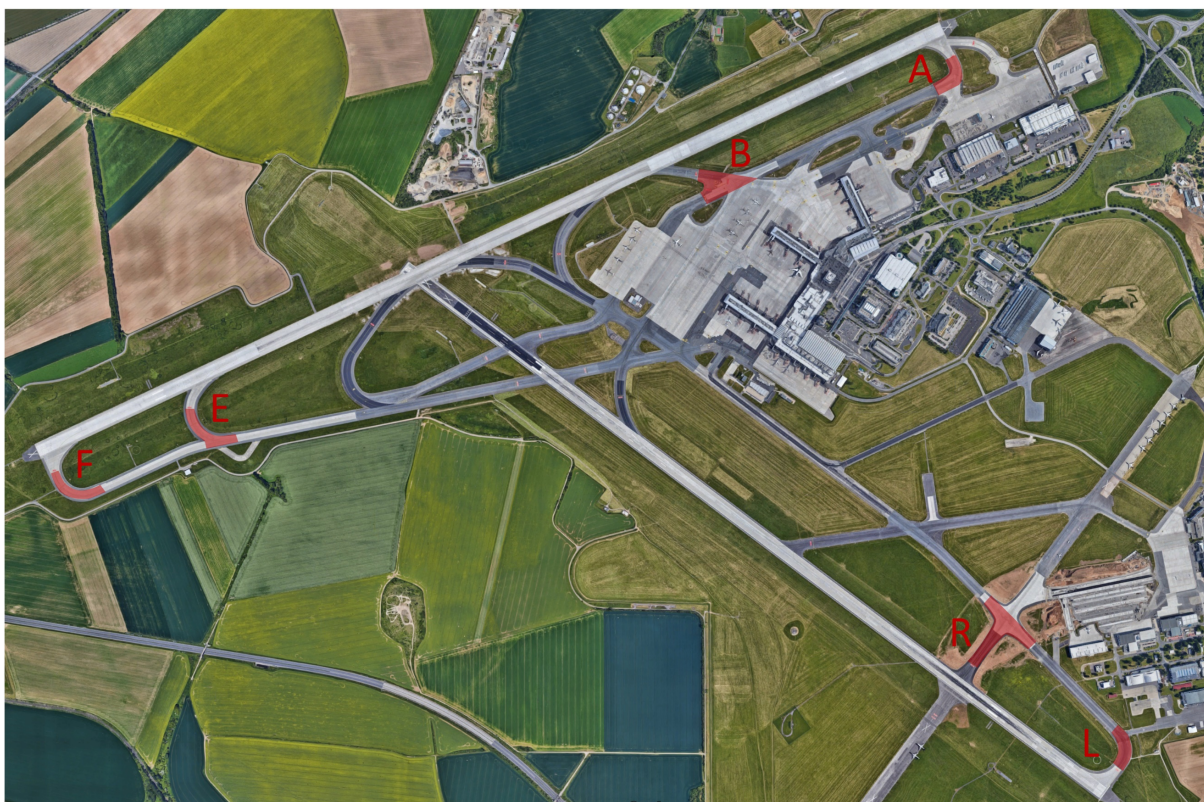
Další část této práce se zabývá tím, jak moc efektivní řešení by implementace na předchozích stranách popsaného algoritmu představovala.

K účelům ověření efektivity tohoto řešení posloužily ASTERIX zprávy z reálného provozu, které mohou hledané údaje o přesnosti poskytnout (viz kapitola 4). Tyto zprávy byly získány ze systémů monitorujících provoz na Letišti Václava Havla v Praze. Konkrétní dny a hodiny, ze kterých analyzovaná data pochází, jsou společně s počty zpráv uvedeny v tabulce 5. Vzhledem k, již v práci uvedeným, charakteristikám jednotlivých přehledových systémů se zde práce zaměřuje na zprávy CAT020 a CAT021.

Tabulka 5 – Časy a počty analyzovaných ASTERIX zpráv [autor]

Datum	Čas (UTC)	Druh využitých dat	Počet analyzovaných zpráv						ADS-B
			MLAT na TWY						
			A	B	E	F	L	R	
2. 7. 2021	9-10	MLAT, ADS-B	348	204					13181
3. 7. 2021	9-12	MLAT, ADS-B	1379	227					33838
4. 7. 2021	9-12	MLAT, ADS-B	922	134					34255
8. 7. 2021	9-12	MLAT, ADS-B			465	63			25653
11. 7. 2021	9-12	MLAT, ADS-B			943	39			39084
13. 7. 2021	9-12	MLAT, ADS-B			947	26			24532
16. 7. 2021	9-12	MLAT, ADS-B	1352	695					41256
17. 7. 2021	9-12	MLAT, ADS-B			1957	152			39850
18. 7. 2021	9-12	MLAT, ADS-B			516	685			34461
19. 7. 2021	9-12	MLAT, ADS-B			620	280			36859
21. 7. 2021	9-12	MLAT, ADS-B			748	254			31502
22. 7. 2021	9-12	MLAT, ADS-B			309	373			30721
24. 7. 2021	9-12	MLAT, ADS-B			1083	815			36343
20. 8. 2021	9-12	MLAT, ADS-B	1255	1463					43168
21. 8. 2021	9-12	MLAT, ADS-B	1214	895					35129
24. 8. 2021	9-12	MLAT, ADS-B			293	447			34465
19. 9. 2021	9-12	MLAT, ADS-B			1299	810			36860
3. 10. 2021	9-12	MLAT, ADS-B			1112	482			45346
9. 10. 2021	9-12	MLAT, ADS-B			585	211			24563
30. 10. 2021	9-12	MLAT, ADS-B			538	139			31611
30. 01. 2022	9-12	MLAT, ADS-B					338	582	22920
Počet celkem			6470	3618	11415	4776	338	582	695597

Na obrázku 8 je vyobrazen satelitní snímek Letiště Václava Havla s vyznačenými oblastmi vyčkávacích míst, ze kterých byla multilaterační data v následujících částech této práce analyzována.



Obrázek 8 - Analyzované oblasti [autor (podklad Mapy Google)]

7.1 Analýza parametrů polohové přesnosti ADS-B zpráv

Jak plyne z kapitoly 6, navrhovaný algoritmus upřednostňuje získání polohových údajů z multilateračního systému před polohovými údaji získanými ze zpráv ADS-B. To přináší výhodu především v podobě nezávislosti celého systému na navigačních schopnostech jednotlivých letadel a zároveň možnosti efektivněji určovat samotnou přesnost udávané polohy. Zatímco u multilateračních systémů lze přesnost polohy vyjadřovat pomocí konfidenčních elips, jejichž velikost může být libovolně definována za pomoci směrodatných odchylek a korelačního koeficientu, tak v případě systému ADS-B jsme odkázáni na pozorování parametru NAC_p , který přesnost udávané polohy zařazuje do 1 z 11 kategorií (viz kapitola 4). Každá z kategorií představuje kružnici o daném poloměru, uvnitř které by se měla reálná poloha letadla s 95% pravděpodobností skutečně nacházet. Pro kategorii 11 činí poloměr této kružnice 3 metry, pro kategorii 10 tato hodnota činí metrů 10, pro kategorii 9 metrů 30 a pro kategorii 8 je to již metrů 92,6. Hrubým odhadem lze z těchto údajů usoudit, že

zařazení jakéhokoliv polohového údaje do kategorie 9 a nižší by vedlo ke ztrátě významu celého navrhovaného systému vzhledem k příliš velké oblasti možného výskytu letadla a s tím i spojeného výskytu jeho koncových ploch. Není však vyloučeno, že by většina letadel dosahovala kategorie NAC_p 10 a 11. Pro posouzení, jakých kategorií NAC_p zprávy z letadel při pozemním provozu dosahují, posloužily zmiňované záznamy ASTERIX CAT021. V následujících tabulkách jsou uvedeny údaje o tom, jaké hodnoty NAC_p letadla vykazovala v ADS-B zprávách v průběhu jednotlivých výskytů. Výskytem se rozumí celá přítomnost daného konkrétního letadla identifikovaného 24 bitovou ICAO adresou v záznamech z 1 sledovaného dne. Nejprve je uvedena tabulka 6 s kompletními údaji získanými z celého sledovaného období, dále jsou pak uvedeny tabulky 7-9 vybraných výrobců letadel pro posouzení, zda nejsou celkové údaje ovlivněny častými výskyty stejných letadel s horšími navigačními schopnostmi, které by relevantnost údajů mohly částečně degradovat. Zároveň je možné posoudit, zda je možné pozorovat nějakou závislost mezi jednotlivými výrobci letadel a hodnotami NAC_p . [36]

Lze předpokládat, že vzhledem k charakteru polohových údajů získaných z ADS-B zpráv, jejichž původcem jsou především systémy GNSS jednotlivých letadel, nejsou tato data v rámci od budov terminálů odlehlých letištních ploch příliš ovlivněna konkrétní polohou. Proto uvedené údaje vychází z celkového vzorku dat a nikoliv pouze výhradně z oblastí vyčkávacích míst. Respektive lze předpokládat, že v oblastech vyčkávacích míst budou hodnoty přesnosti navigačních systémů letadel dosahovat spíše lepších hodnot, než je tomu v oblastech v blízkosti terminálních budov, kde mohou být některé navigační satelity zastíněny. Proto je kladen důraz především na to, jakých maximálních hodnot NAC_p letadla v průběhu svých jednotlivých výskytů dosahovala. Zároveň je sledováno, jak moc konzistentní údaje NAC_p v rámci jednotlivých výskytů byly. Konkrétně se jedná o údaj, v kolika procentech případů byla hodnota NAC_p po celou dobu výskytu letadla zcela neměnná a dále pak v kolika procentech případů byla maximální hodnota dosažena alespoň ve 30 % poskytnutých zpráv.

Tabulka 6 - Hodnoty NAC_p - všichni výrobci [autor]

Maximální dosažená hodnota NAC _p (95% prav. výskytu uvnitř kružnice v m)	Počet výskytů s danou maximální hodnotou	Procentuální zastoupení výskytů s danou maximální hodnotou na celkovém počtu výskytů (%)	Počet výskytů, u kterých se v rámci všech zpráv hodnota NAC _p neměnila a dosahovala hodnoty z prvního sloupce	Procentuální zastoupení výskytů s neměnnou hodnotou NAC _p na celkovém počtu výskytů (%)	Počet výskytů, u kterých se vyskytovala daná maximální hodnota alespoň ve 30% zpráv	Procentuální zastoupení výskytů, u kterých se daná maximální hodnota vyskytovala alespoň ve 30% zprávách, na celkovém počtu výskytů (%)	Celkový počet sledovaných výskytů
8 (92,6 m)	175	25,1	174	24,9	174	24,9	698
9 (30 m)	234	33,5	226	32,4	234	33,5	
10 (10 m)	135	19,3	115	16,5	133	19,1	
11 (3 m)	154	22,1	28	4	114	16,3	
Součty procentuálních sloupců		100		78		94	

Tabulka 7 - Hodnoty NAC_p – Boeing [autor]

Maximální dosažená hodnota NAC _p (95% prav. výskytu uvnitř kružnice v m)	Počet výskytů s danou maximální hodnotou	Procentuální zastoupení výskytů s danou maximální hodnotou na celkovém počtu výskytů (%)	Počet výskytů, u kterých se v rámci všech zpráv hodnota NAC _p neměnila a dosahovala hodnoty z prvního sloupce	Procentuální zastoupení výskytů s neměnnou hodnotou NAC _p na celkovém počtu výskytů (%)	Počet výskytů, u kterých se vyskytovala daná maximální hodnota alespoň ve 30% zpráv	Procentuální zastoupení výskytů, u kterých se daná maximální hodnota vyskytovala alespoň ve 30% zprávách, na celkovém počtu výskytů (%)	Celkový počet sledovaných výskytů
8 (92,6 m)	146	41,7	146	41,7	146	41,7	350
9 (30 m)	139	39,7	139	39,7	139	39,7	
10 (10 m)	12	3,4	11	3,1	11	3,1	
11 (3 m)	53	15,1	0	0	40	11,4	
Součty procentuálních sloupců		100		85		96	

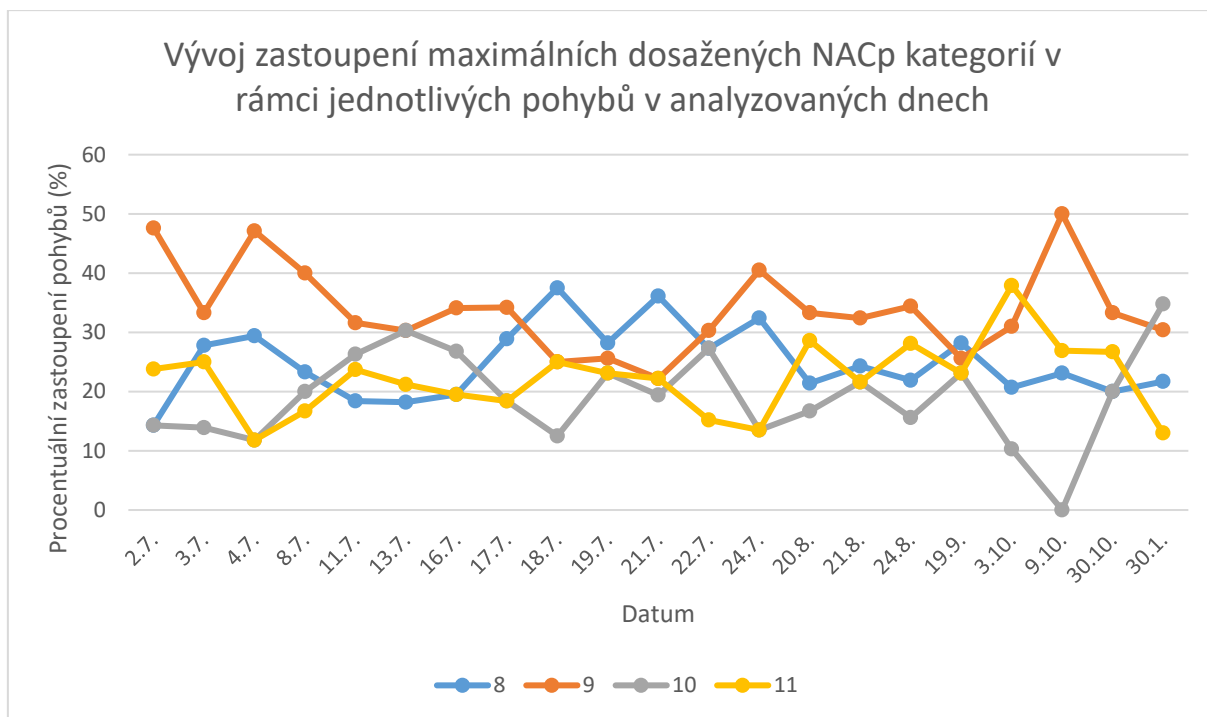
Tabulka 8 - Hodnoty NAC_p – Airbus [autor]

Maximální dosažená hodnota NAC _p (95% prav. výskytu uvnitř kružnice v m)	Počet výskytů s danou maximální hodnotou	Procentuální zastoupení výskytů s danou maximální hodnotou na celkovém počtu výskytů (%)	Počet výskytů, u kterých se v rámci všech zpráv hodnota NAC _p neměnila a dosahovala hodnoty z prvního sloupce	Procentuální zastoupení výskytů s neměnnou hodnotou NAC _p na celkovém počtu výskytů (%)	Počet výskytů, u kterých se vyskytovala daná maximální hodnota alespoň ve 30% zpráv	Procentuální zastoupení výskytů, u kterých se daná maximální hodnota vyskytovala alespoň ve 30% zprávách, na celkovém počtu výskytů (%)	Celkový počet sledovaných výskytů
8 (92,6 m)	20	24,4	20	24,4	20	24,4	82
9 (30 m)	59	72	58	70,7	59	72	
10 (10 m)	2	2,4	2	2,4	2	2,4	
11 (3 m)	1	1,2	1	1,2	1	1,2	
Součty procentuálních sloupců		100		99		100	

Tabulka 9 - Hodnoty NAC_p – Pilatus [autor]

Maximální dosažená hodnota NAC _p (95% prav. výskytu uvnitř kružnice v m)	Počet výskytů s danou maximální hodnotou	Procentuální zastoupení výskytů s danou maximální hodnotou na celkovém počtu výskytů (%)	Počet výskytů, u kterých se v rámci všech zpráv hodnota NAC _p neměnila a dosahovala hodnoty z prvního sloupce	Procentuální zastoupení výskytů s neměnnou hodnotou NAC _p na celkovém počtu výskytů (%)	Počet výskytů, u kterých se vyskytovala daná maximální hodnota alespoň ve 30% zpráv	Procentuální zastoupení výskytů, u kterých se daná maximální hodnota vyskytovala alespoň ve 30% zprávách, na celkovém počtu výskytů (%)	Celkový počet sledovaných výskytů
8 (92,6 m)	0	0	0	0	0	0	23
9 (30 m)	0	0	0	0	0	0	
10 (10 m)	14	60,9	8	34,8	14	60,9	
11 (3 m)	9	39,1	0	0	4	17,4	
Součty procentuálních sloupců		100		35		78	

Následující graf 1 pak ukazuje, kolik procent výskytů v daných dnech dosáhlo alespoň v 1 chvíli dané kategorie NAC_p. Tento graf ověřuje, k jakým výkyvům navigační přesnosti ADS-B zpráv docházelo v rámci jednotlivých sledovaných dnů.



Graf 1 - Zastoupení maximálních NACp v jednotlivých dnech [autor]

Z tabulky 6 vyplývá, že v průběhu více než 50 % všech výskytů bylo dosaženo maximálně NAC_p kategorie 9. Již samotný tento fakt prokazuje, že by se u většiny sledovaných výskytů navrhovaný algoritmus, v případě spoléhání na polohové údaje z ADS-B, musel potýkat s nepřesností udávané polohy v rámci několika desítek metrů. Při pohledu na údaje o počtu výskytů během kterých bylo dosaženo daných maximálních kategorií alespoň ve 30 % přijatých zprávách je navíc patrné, že dosažení kategorií 10 a 11 lze v takovém případě pozorovat pouze ve 35,4 % případů. Vzhledem k charakteru řešené problematiky by bylo příhodné, kdyby lepších přesností získaných polohových údajů bylo dosaženo alespoň u letadel, jejichž rozměry se pohybují v řádech desítek metrů, jelikož právě u takových letadel je míra rizika možného střetu zákonitě vyšší. Z tabulek 7 a 8 však vyplývá spíše opačné pravidlo. U letadel Boeing byla pozorovaná kategorie NAC_p alespoň o hodnotě 10 v 18,5 % případů a u letadel výrobce Airbus pak dokonce jen v 3,6 % případů. Naopak u výrobců typicky menších letadel, jejichž rozměry se pohybují v řádech vyšších jednotek až nižších desítek metrů, byl pozorován trend spíše opačný. Jako příklad je uvedena tabulka 9, ve které se nachází údaje vztažené k výskytům uskutečněným letadly Pilatus. Zde byla dosažena alespoň kategorie 10 v průběhu všech výskytů. Z grafu 1 je pak patrné, že zastoupení dosažených maximálních NAC_p kategorií bylo v čase variabilní. Efektivita

navrhovaného řešení by tak byla, v případě spoléhání se na ADS-B polohové údaje, v čase proměnná.

7.2 Analýza doplňkových ADS-B položek

Další, z pohledu řešené problematiky zajímavý, údaj představuje procentuální zastoupení letadel, která při pozemním provozu poskytují údaje o svých rozměrech a headingu. Jedná se tedy o položky ASTERIX zpráv I021/271 a I021/152 blíže popsané v kapitole 5, jejichž přítomnost v ADS-B zprávách není v současné době povinná. Na pozorovaném vzorku 308 výskytů byl údaj o rozměrech přítomen v 95,6 % případů. Procentuální zastoupení letadel vysílajících údaj o headingu bohužel nebylo možné ověřit, vzhledem k absenci tohoto údaje v dostupných analyzovaných záznamech zpráv ASTERIX.

7.3 Analýza údajů získaných z multilateračního systému

V případě systému ADS-B bylo, vzhledem k jeho charakteristikám, vhodné provést analýzu dat v rámci celých jednotlivých výskytů letadel. Nebylo nutné se zaměřovat pouze na situace, kdy se letadlo nacházelo v oblastech vyčkávacích míst. V případě multilateračního systému již tato skutečnost neplatí. Vzhledem k popsanému principu funkčnosti těchto systémů (viz kapitola 3.2.2) je nutné analýzu přesnosti polohových dat získaných touto cestou provádět pouze u zpráv, které pocházely od cílů vyskytujících se v oblastech, které se řešené problematiky týkají. Proto byla s pomocí nástroje MATLAB sestrojena aplikace, která za účelem demonstrace dokáže navrhovaný algoritmus aplikovat na reálná data z provozu a společně s tím poskytnout i zmiňované specifické statistické údaje přímo z oblastí vyčkávacích míst. V kapitole 8 je na principu funkčnosti této aplikace demonstrováno, jakou cestou lze v praxi k navrženému algoritmu přistupovat a zároveň jakou cestou byla získána data, která posloužila k dalšímu zpracování v kapitolách následujících.

Samotná analýza multilateračních dat je obsažena v kapitole 9.

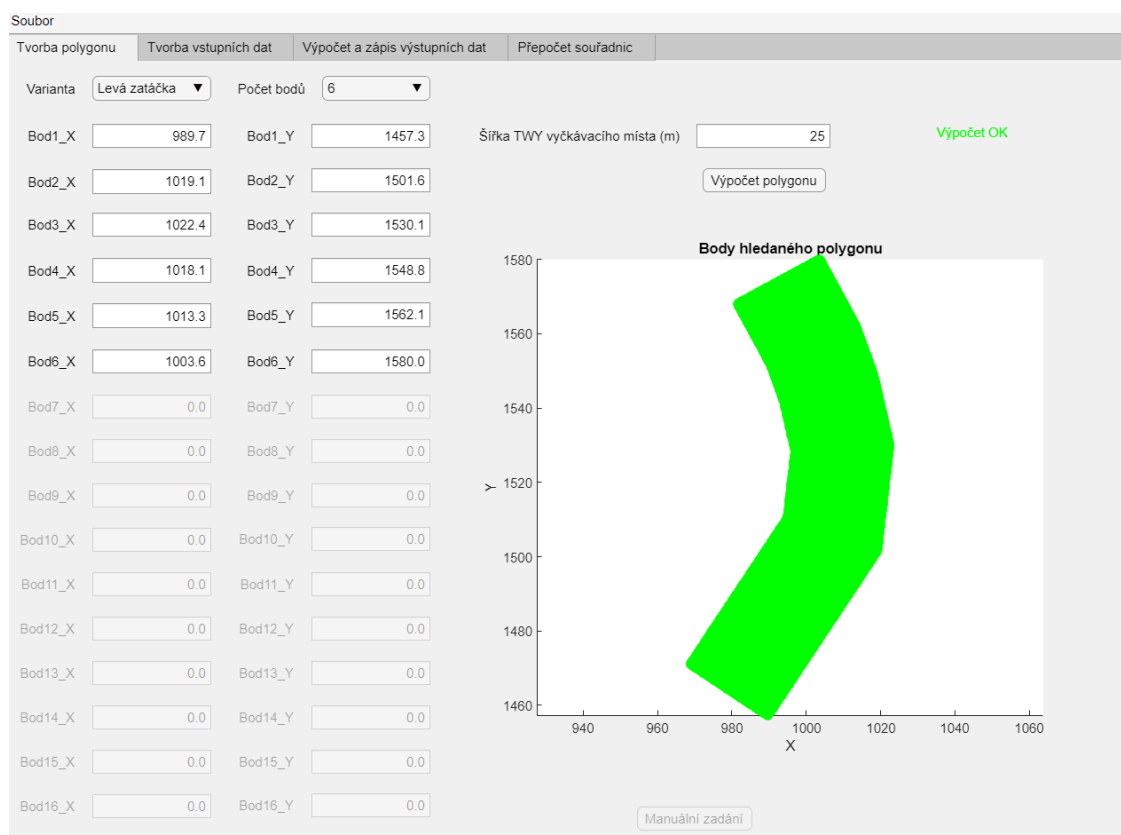
8 Nástroj pro analýzu multilateračních přehledových dat

Sestrojená aplikace slouží k demonstraci navrhovaného algoritmu a zároveň jako nástroj pro analýzu dat získaných ze zpráv ASTERIX. Lze ji použít ke 2 primárním účelům. Tím prvním je možnost vyhledání zpráv, které mohly být, anebo přímo byly, vysílány letadly, která se nacházela v uživatelem vydefinovaných polygonech. Pro účely této práce jsou těmito polygony myšleny vyčkávací místa drah. Druhým účelem je již schopnost samotného určení minimální vzdálenosti mezi 2 letadly v rámci těchto předdefinovaných polygonů. Spolu s tímto údajem pak aplikace dopočítává několik dalších údajů, které jsou na následujících stranách podrobněji popsány a vyhodnocovány v kapitole 9. Prostředí aplikace je rozděleno do 4 záložek, z nichž první 3 jsou nezbytné k získání výše uvedených požadovaných výstupů a 4. slouží jako nástroj pro usnadnění práce se souřadnicemi v odlišných soustavách. Aplikace samotná je součástí přílohy 1 této práce. Dále jsou principy funkčnosti a použití této aplikace, která byla využita k zisku zpracovávaných dat, popsány.

8.1 Záložka 1 - Tvorba polygonu

Na počátku celého procesu filtrace dat ze zvoleného polygonu je třeba uživatelem tuto oblast nějakým způsobem vydefinovat. K tomu slouží první záložka označená *Tvorba polygonu*, na které se zároveň samotná aplikace automaticky spouští. Aplikace zohledňuje to, že osa vyčkávacího místa může být tvořena jak přímkou, tak i obloukem. Pod pojmem *Varianta* tedy uživatel nejprve zvolí, zda bude letadlo projíždějící vyčkávacím místem směrem k dráze pojíždět přímo, nebo točit doleva, či doprava. V případě, kdy se jedná o variantu přímky, je v druhé rozbalovací nabídce automaticky zvolen počet bodů 2. Následně je uživatel požádán o definování kartézských souřadnic bodů 1 a 2, což jsou body ležící na přímce osy pojezdové dráhy vyčkávacího místa. Bod 1 je počátečním bodem této pojezdové dráhy, bod 2 je bodem průniku značení vyčkávacího místa s osou pojezdové dráhy. V případě, kdy je zvolena varianta oblouku, je princip zadávání souřadnic bodů pojezdové dráhy vyčkávacího místa odlišný. V tomto případě může uživatel zvolit počet bodů v rozmezí 2-16, body zde však nepředstavují souřadnice osy pojezdové dráhy vyčkávacího místa, nýbrž body náležící vnějšímu oblouku dané pojezdové dráhy, na které se vyčkávací místo nachází. Je důležité dodržet posloupnost zadávaných bodů, kdy 1. bod náleží počátku vnějšího oblouku, další body náleží libovolně zvoleným souřadnicím na vnějším oblouku, avšak vzdálenost každého následujícího bodu je od 1. bodu vyšší. Poslední

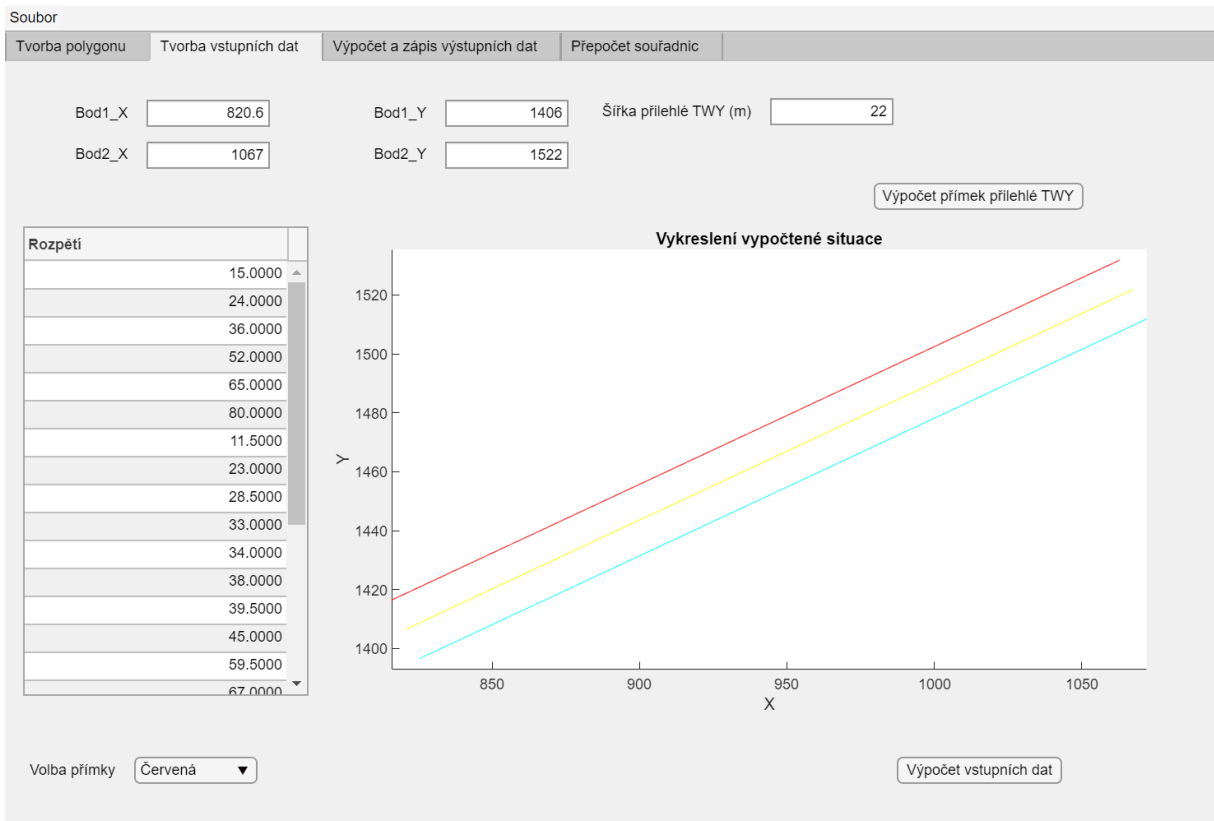
bod náleží průniku vnějšího oblouku se značením vyčkávacího místa. Aplikace při výpočtu polygonu v oblouku tvoří mezi jednotlivými zadanými body obdélníkové polygony, ty následně zkombinuje a vytvoří 1 konečný obloukový polygon. Vzhledem k tomuto principu tedy počet zadaných bodů přímo ovlivňuje, jak dokonale bude výsledný sestrojený obloukový polygon odpovídat realitě. Po zadání souřadnic je třeba ještě vyplnit údaj o šířce vyčkávacího místa. Posléze je aktivováno tlačítko *Výpočet polygonu*, kterým uživatel spustí tvorbu matice, do které se zapíše kartézské souřadnice veškerých bodů sestrojeného polygonu s rozlišením 0,1 m. Tyto souřadnice se zároveň vykreslí do pravé části obrazovky zelenou barvou, tento stav je znázorněn na obrázku 9. V případě, kdy nechce uživatel zadávat jednotlivé body do aplikace manuálně, má možnost je importovat přes rozbalovací menu označené *Soubor* v levém horním rohu obrazovky. Po vybrání položky *Import tabulky bodů TWY* může do aplikace nahrát souřadnice bodů z předem vytvořené excelové tabulky, kdy souřadnice na ose x jednotlivých bodů musí být obsaženy ve sloupci A a souřadnice na ose y pak ve sloupci B. Pro návrat do režimu manuálního zadávání slouží tlačítko *Manuální zadání*.



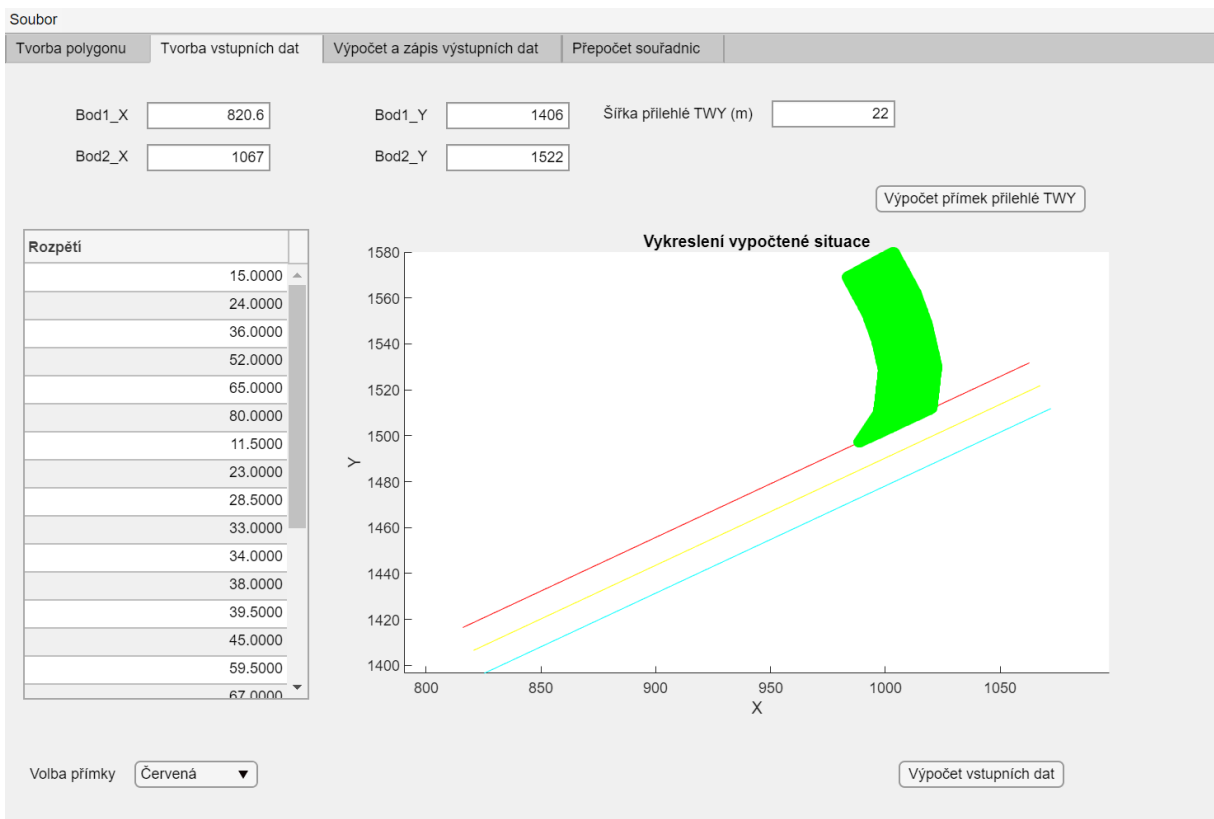
Obrázek 9 - Aplikace – tvorba polygonu [autor]

8.2 Záložka 2 - Tvorba vstupních dat

Druhá záložka slouží k tvorbě všech proměnných, které definují celkový charakter letištních provozních ploch v dané oblasti. Nutným předpokladem pro využití funkcí této záložky je sestavení polygonu na první záložce a následné vložení excelové tabulky přes rozbalovací nabídku *Soubor*, která ve sloupci A obsahuje informace o rozpětích letadel pojíždějících po přilehlé pojezdové dráze. Po úspěšném importu se použité hodnoty zobrazí v levé části obrazovky. Účelem této tabulky je snaha o simulaci toho, že v praxi by systém počítající vzdálenost mezi letadly nemusel být schopen pro každý případ určit toto rozpětí jednoznačně. Pokud by například spoléhal na informace obsažené v ADS-B zprávách, pak by pracoval pouze s hodnotami rozpětí uvedenými v tabulce 3. Importovaná tabulka rozpětí tedy musí obsahovat všechny hodnoty rozpětí, o kterých uživatel dopředu ví, že by s nimi reálný systém dokázal pracovat. Konkrétní role této tabulky bude ještě dále přiblížena u popisu záložky sloužící k výpočtu a zápisu výstupních dat. Poté, co uživatel splní oba zmiňované předpoklady, je odblokována možnost zadání kartézských souřadnic dalších bodů. V tomto případě se jedná o libovolné 2 body náležící ose přilehlé pojezdové dráhy. Po zadání bodů ještě následuje definování šířky pojezdové dráhy, poté již je aplikace připravena k výpočtu přímek přilehlé pojezdové dráhy přes aktivované patřičné tlačítko. Po výpočtu se do pravé části okna vykreslí dílčí přímky reprezentující přilehlou pojezdovou dráhu (obrázek 10). Následně uživatel vybírá pomocí barevného rozlišení krajních přímek tu, která v daném případě představuje hranici právě mezi přilehlou pojezdovou dráhou a vyčkávacím místem. Celý proces je ukončen stiskem tlačítka *Výpočet vstupních dat*, které vytvoří všechny proměnné vztažené k charakteristikám pohybových ploch nutné pro následnou analýzu dat a zároveň vykreslí sestavenou situaci do grafického okna na pravé straně záložky (obrázek 11). Aby nebylo nutné celý tento proces při každém otevření programu za účelem analýzy dat pro stále stejnou oblast opakovat, je možné v tuto chvíli vyexportovat přes rozbalovací nabídku *Soubor* a následnou položku *Export vstupních dat* všechny stěžejní proměnné do souboru *mat*.



Obrázek 10 - Aplikace – tvorba vstupních dat - krok 1 [autor]



Obrázek 11 - Aplikace – tvorba vstupních dat - krok 2 [autor]

8.3 Záložka 3 - Výpočet a zápis výstupních dat

Třetí záložka (obrázek 13) již slouží k samotné analýze zpráv ASTERIX CAT020. Pro správnou funkčnost aplikace je nutné mít k dispozici dekodované údaje jednotlivých zpráv v tabulce formátu xlsx. Aplikace počítá s tím, že sloupec C obsahuje časový údaj, 24bitová ICAO adresa je obsažena ve sloupci F, údaj o poloze v kartézských souřadnicích je obsažen pro osu x ve sloupci M, pro osu y ve sloupci N, údaje o směrodatných odchylkách na osách x a y jsou obsaženy ve sloupcích O a P a ve sloupci Q se nachází korelační koeficient. Po procesu dále popsaného výpočtu a zápisu jsou do dalších sloupců této tabulky doplněny údaje, jejichž podoba a způsoby výpočtů jsou na dalších stranách rozvedeny. Příklad podoby vstupní tabulky ASTERIX dat je uveden na obrázku 12.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Selected	rec_num	tod	ds_id	mode3a_code	target_addr	callsign	flight_level_ft	track_num	ground_bit	pos_local_x_nm	pos_local_y_nm	pos_local_x_m	pos_local_y_m	pos_std_dev_x_m	pos_std_dev_y_m	pos_std_dev_correlation_coeff
2	0	1	09:00:00.000	232	0	406EEC	VCG1Xf	1100	222	Y	1.0299676	0.0159287	1907.5	29.5	12	9.5	-0.75
3	0	2	09:00:00.000	232	2000	49D353	TVS1J		2044	Y	0.9856911	-0.1852052	1825.5	-343	42.75	23.5	-0.75
4	0	3	09:00:00.000	232		49F085			8	Y	-0.1590173	-0.0561555	-294.5	-104	2.75	3.25	-0.25
5	0	4	09:00:00.000	232		49F0DE	TXLU00		9	Y	-0.0564255	0.7537797	-104.5	1396	3.5	4.5	-0.25
6	0	5	09:00:00.000	232		49F0E0	TXLU01		11	Y	0.3112851	0.8860691	576.5	1641	3.75	4.25	-0.25
7	0	6	09:00:00.000	232		49F0E1	TXLU04		16	Y	0.4030778	-0.8477322	746.5	-1570	3.5	5.5	0
8	0	7	09:00:00.000	232		49F10B			17	Y	-2.3304536	-0.8679806	-4316	-1607.5	37.25	18	1
9	0	8	09:00:00.000	232		49F00E	PTACNIK2		125	Y	0.137419	0.6789957	254.5	1257.5	3.25	3.25	0

Obrázek 12 - Ukázka vstupní tabulky dat ASTERIX CAT020 [autor podle dat od ŘLP ČR]

Pokud je tato záložka otevřena ihned po spuštění aplikace, je uživatel požádán o import vstupních dat. Tím je myšleno zvolení souboru mat, který byl již někdy dříve vytvořen na záložce *Tvorba vstupních dat*. Pokud je tato záložka otevřena až poté, co uživatel následoval postup uváděný pro předchozí 2 záložky, jsou vstupní data v programu již načtena a jejich import tak není nutný. Úspěšné načtení vstupních dat jedním nebo druhým způsobem je indikováno zeleně svítící lampou umístěné napravo od tlačítka *Import vstupních dat*. Následně je nutné aplikaci informovat o názvu a umístění zmiňované tabulky dat obsahující přepis zpráv ASTERIX. To je možné s pomocí tlačítka *Výběr souboru pro čtení a zápis*. Úspěšná alokace tohoto souboru je opět indikována druhou zeleně svítící lampou. Poté, co je soubor úspěšně alokován, je možné stiskem posledního tlačítka spustit čtení a zápis dat. Před tímto samotným procesem je ještě možné uživatelem nastavit v pravé části obrazovky v jakém jazyce se má zápis provést, s jakou hladinou významnosti má výpočetní algoritmus pracovat, výchozí hodnota je přednastavena na 95 %, a dále je také možné zadat simulovanou hodnotu rozpětí letadla, které by se pohybovalo po přilehlé pojezdové dráze, zde je přednastavena hodnota 0, která zapříčiní, že je údaj o vzdálenosti mezi 2 letadly

z výstupních dat vyřazen. Pokud je však zde uvedený údaj rozdílný od 0, ve výstupní tabulce ve sloupci S se objeví informace o metrické vzdálenosti mezi oběma letadly.

Soubor

Tvorba polygonu | Tvorba vstupních dat | Výpočet a zápis výstupních dat | Přepočít souřadnic

Import vstupních dat

Nejprve je nutné vytvořit/nahrát vstupní data

Výběr souboru pro čtení a zápis

Jazyk zápisu: cz

Spustit čtení a zápis

Hladina významnosti (%): 95

Rozpětí druhého letadla (m): 0

Obrázek 13 – Aplikace – výpočet a zápis výstupních dat [autor]

8.3.1 Potřebné doplňkové soubory k úspěšnému výpočtu a zápisu dat

K tomu, aby tento proces zdárně proběhl, je zapotřebí, aby se v adresáři, kde je samotná aplikace lokalizována, vyskytovaly složky *Aircraft_types* a *Conditions*.

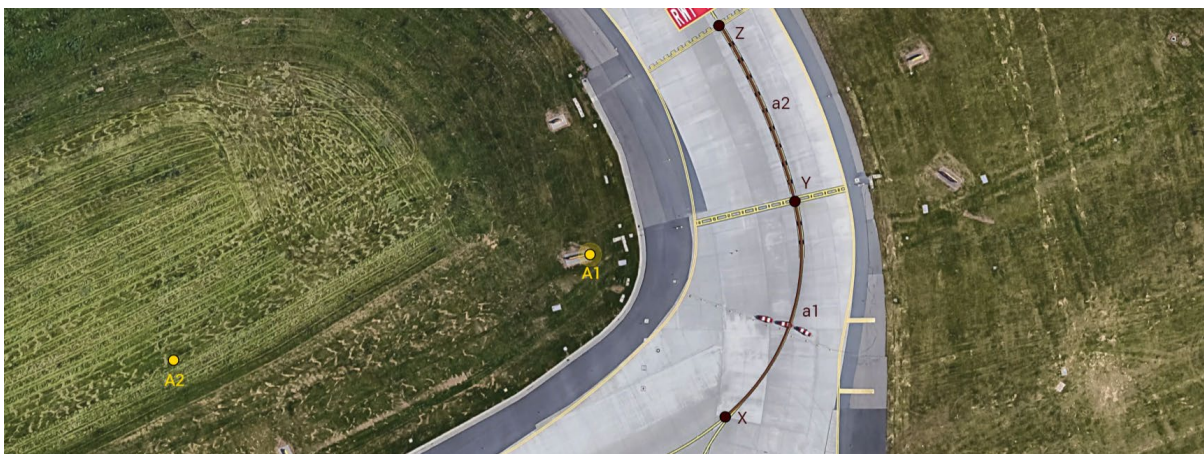
Ve složce *Aircraft_types* musí být umístěna tabulka *ICAO24DB.xlsx*, ve které se ve sloupci A nachází 24bitové ICAO adresy letadel, ke kterým jsou ve sloupci B uvedena konkrétní označení typů těchto letadel. Dále se v této složce musí nacházet soubory formátu mat obsahující proměnné definující potřebné rozměry daných typů letadel. Vzhledem k informacím uvedeným v kapitole 5, je zde za účelem zvýšené přesnosti určení polohy koncových částí vyčkávacího letadla nutné vydefinovat délku, rozpětí křídel, rozpětí stabilizátoru a vzdálenost průmětu konce křídla, a případně i stabilizátoru, od přední části letadla. Zároveň je zde nutné definovat offset antény odpovídáče. Pojmenování těchto souborů musí být shodné s označením daného typu letadla, které bylo použito ve sloupci B již zmiňované tabulky *ICAO24DB.xlsx*. Zároveň je možné do této složky umístit soubory MAT pojmenované typem letadla doplněným o text „_ADS-B“. V těchto souborech je třeba definovat hodnoty rozpětí, délky a nejkratšího možného offsetu antény odpovídáče, které jsou pro daný typ obsaženy v ADS-B zprávách verze 3. Tím dokáže program porovnávat, jak velký je rozdíl v dopočítávaných vzdálenostech při použití přesných rozměrů a při použití rozměrů ze zpráv ADS-B.

Složka *Conditions* představuje zdroj informací pro výpočet odhadovaného headingu letadel vyskytujících se na vyčkávacích místech. V získaných CAT021 ASTERIX

zprávách bohužel údaje o headingu jednotlivých letadel chybí. Tento fakt značně komplikuje dopočet vzdálenosti mezi letadly, jelikož právě orientace vyčkávacího letadla zcela zásadně ovlivňuje polohu jeho koncových ploch. Neexistuje žádná jiná cesta, jak reálnou hodnotu tohoto chybějícího údaje získat. Pro účely této práce byl navržen způsob, za pomoci kterého lze, alespoň částečně, orientaci letadel na vyčkávacích místech odhadnout. Tento postup ovlivnil z dále analyzovaných dat pouze ta, která se týkají porovnání efektivity navrhovaného řešení při využití přesných a ADS-B rozměrů. Ostatní analyzované údaje jím ovlivněny nebyly. V případě reálné aplikace navrhovaného řešení by systém musel spoléhat na skutečný heading z ADS-B zpráv. Tento postup pracuje s daty obsaženými v programu AviPLAN, který je schopný simulovat ideální průjezdy libovolných typů letadel zvolenými letištními pohybovými plochami. Díky této funkcionalitě lze alespoň částečně orientaci letadel v závislosti na jejich umístění odhadovat. Aby bylo údaje z AviPLANu možné implementovat do sestavené aplikace, je nutná přítomnost právě složky *Conditions* a v ní obsaženého souboru *Heading.xlsx*. V tomto souboru jsou definované oblouky osového značení pojezdových drah na vyčkávacích místech. Je zde možné vkládat údaje až o 2 obloucích s rozdílným rádiusem. Každý oblouk je definován souřadnicemi jeho vstupního bodu, výstupního bodu a středem kružnice, jíž je součástí. Souřadnice všech těchto bodů musí být obsaženy právě v tabulce souboru *Heading.xlsx* tak, jak plyne z obrázků 14 a 15, které představují příklad takového zadání. Zároveň jsou v tabulce uvedeny ve sloupci H typy letadel a ve sloupcích I, J a K k nim přidružené hodnoty headingu získané z programu AviPLAN, které odpovídají orientaci těchto typů při průjezdech daným vyčkávacím místem postupně body X, Y a Z, které jsou uvedeny na obrázku 14. Samotná aplikace je posléze při výpočtech a zápisu dat schopna určit orientaci letadla právě podle toho, kde a na kterém z oblouků se v danou chvíli nachází za předpokladu, že se hodnoty headingu při pohybu po jednotlivých obloucích mění lineárním tempem.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	Střed oblouku a1 (X)	Střed oblouku a1 (Y)	Počátek oblouku a1 (X)	Počátek oblouku a1 (Y)	Konec oblouku a1 (X)	Konec oblouku a1 (Y)	Tabulka vstupních a	B737-800W		60	350	335
2	966.06	1524.81	987.84	1484.69	1009.61	1537.16	výstupních hodnot					
3	Střed oblouku a2 (X)	Střed oblouku a2 (Y)	Počátek oblouku a2 (X)	Počátek oblouku a2 (Y)	Konec oblouku a2 (X)	Konec oblouku a2 (Y)	headingu v závislosti					
4	876.97	1503.21	1009.61	1537.16	993.77	1574.2	na typu letadla:					

Obrázek 14 - Vzor tabulky *Heading.xlsx* [autor]



Obrázek 15 - Příklad rozložení bodů sloužících k odhadu headingu letadel [autor (podklad Mapy Google)]

8.3.2 Samotný proces čtení, výpočtu a zápisu dat

Ve chvíli, kdy uživatel stiskne tlačítko *Spustit čtení a zápis* započne proces, který lze rozdělit do několika kroků. Tyto kroky jsou dále popsány.

První proces, který aplikace provádí, je načtení všech potřebných vstupních dat, jak plyne ze schématu uvedeném na obrázku 7. Následně aplikace identifikuje všechna letadla, jejichž 24bitové adresy se ve vložených zprávách vyskytují. Poté aplikace vybírá postupně jednotlivé nalezené 24bitové adresy a přiděluje k nim konkrétní typ letadla podle údajů obsažených v tabulce *ICAO24DB.xlsx*. Následně aplikace, v případě dostupnosti, načte údaje o rozměrech těchto letadel a informacích o headingu z programu *AviPLAN*. Poté již aplikace prochází jednotlivé zprávy odpovídající dané 24bitové adrese. Pro každou ze zpráv je vytvořena konfidenční elipsa. V případě, že není identifikován průnik této elipsy s předdefinovanou oblastí vyčkávacího místa, případně nenachází-li se toto vyčkávací místo uvnitř sestrojene elipsy, je přistoupeno k hledání zprávy následující. V opačném případě je však identifikováno, že se letadlo v danou chvíli v oblasti zájmu mohlo nacházet a aplikace pokračuje s dalšími výpočty. Algoritmus dále ověřuje, že konfidenční elipsa nezasahuje do přilehlé křižovatky. Pokud elipsa do křižovatky zasahuje, je to vyhodnoceno jako potenciální riziko a ve výstupní matici se v patřičném poli objeví hláška „Bezpečná vzdálenost není zajištěna, konfidenční elipsa zasahuje do přilehlé křižovatky“. V situaci, kdy elipsa do křižovatky nezasahuje, je přistoupeno k nalezení nejbližšího bodu průniku elipsy s oblastí plně únosné vozovky vyčkávacího místa k hraně přilehlé pojezdové dráhy. V tomto bodě je uvažováno umístění antény odpovídající daného letadla. Následně je pro tuto polohu dopočítán, v případě

dostupnosti údajů pro daný typ letadla, postupem uvedeným v kapitole 8.3.1, odhadovaný heading. Poté je díky znalostem rozměrů uvedeným v kapitole 5, znalostem o offsetu antény a dopočtenému headingu pomocí goniometrických funkcí dopočtena poloha 6 koncových bodů letadla. V tuto chvíli aplikace pracuje s přesnými údaji, získanými přímo z dokumentací k jednotlivým typům letadel. Následuje ověření, že se všechny části letadla nachází mimo přilehlou křižovatku, a poté již samotný dopočet vzdálenosti mezi touto nejbližší částí vyčkávacího letadla a hranou přilehlé pojezdové dráhy. Zároveň, pokud byl před spuštěním výpočtu vložen údaj o rozpětí 2. letadla, je dopočítávána vzdálenost i k pomyslné přímce, kterou by konec křídla tohoto letadla opisoval v případě průjezdu po přilehlé pojezdové dráze, nejprve je však opět ověřeno, že tato přímka neprotíná půdorys vyčkávacího letadla. Zde je nutné zmínit, že aplikace je nastavena tak, aby dokázala simulovat znalost údajů o rozpětí letadel z ADS-B zpráv, nikoliv tedy údajů zcela přesných. To je zajištěno, již v kapitole 8.2 zmiňovanou, tabulkou rozpětí, kterou bylo nutné importovat do programu na záložce *Tvorba vstupních dat*. Pokud byly tedy v této tabulce obsaženy údaje odpovídající 15 možným rozměrům rozpětí z ADS-B zpráv (viz tabulka 3), pak program po zadání uživatelem přesného rozpětí na záložce *Výpočet a zápis výstupních dat* dohledá nejbližší vyšší, nebo shodný rozměr rozpětí z předem importované tabulky a až s tímto rozměrem dále počítá. Pokud by uživatel chtěl simulovat znalost přesného údaje o rozpětí letadla projíždějícího po přilehlé pojezdové dráze, pak stačí, aby tento přesný údaj byl i součástí importované tabulky. Pro oba vzdálenostní údaje pak platí, že je od nich odečtena hodnota 0,35 m. Tato hodnota reprezentuje nejistotu změřené vzdálenosti danou tím, že samotný střed uvažované elipsy může být od reálného stavu vlivem zaokrouhlení posunut až o polovinu úhlopříčky čtverce se stranou 0,5 m. Čtverec se stranou 0,5 m reprezentuje chybu, která je do výpočtu vložena již samotnou charakteristikou multilateračních systémů, jejichž rozlišovací schopnosti odpovídají právě vzdálenostem 0,5 m na jednotlivých osách kartézských souřadnic (viz kapitoly 3.2.2 a 4). Oba tyto údaje o vzdálenostech, jak vůči hraně přilehlé pojezdové dráhy, tak vůči konci křídla projíždějícího letadla, jsou následně uloženy do paměti a na konci procesu zapsány do sloupců R a S zdrojové tabulky. To stejné platí i pro údaj o dopočteném headingu, který se objeví ve sloupci U a textové identifikaci toho, která z koncových částí letadla se vyskytuje k přilehlé pojezdové dráze nejbližše ve sloupci T. Zároveň aplikace dopočítává, jak velká je vzdálenost mezi nejbližším a nejvzdálenějším bodem elipsy od hrany přilehlé pojezdové dráhy. Na obrázku 16 je

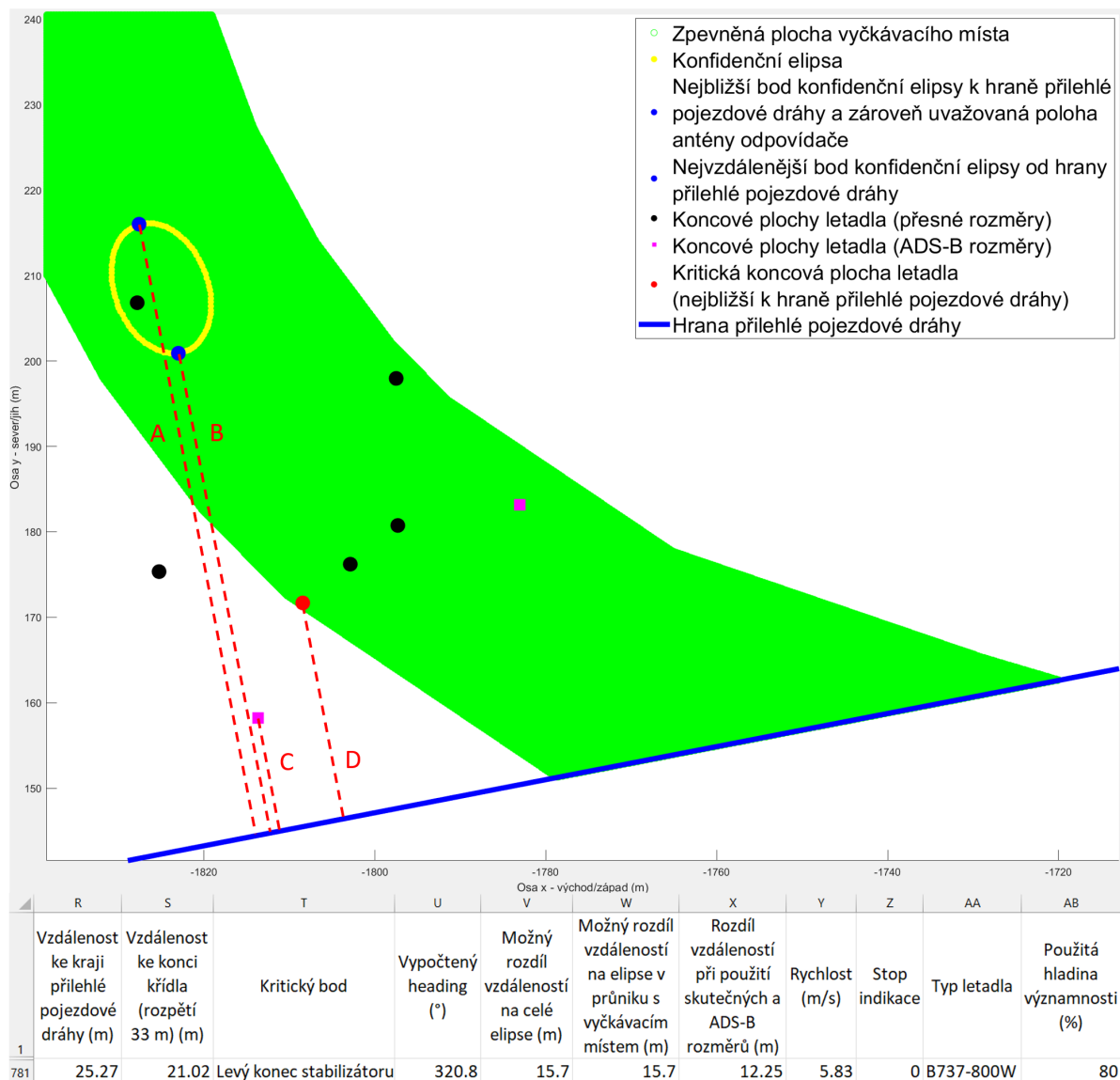
tento údaj reprezentován rozdílem vzdáleností A a B. Ve sloupci V se objevuje údaj o této vzdálenosti v rámci celé konfidenční elipsy a ve sloupci W se objevuje údaj vztažený pouze k průnikům konfidenční elipsy s oblastí vyčkávacího místa, oba tyto údaje jsou dopočítávány nezávisle na tom, zda jsou známy rozměry daného letadla. Údaj pro celou elipsu je vzhledem k relevantnosti výsledných hodnot počítán pouze tehdy, kdy elipsa neprotíná hranu přilehlé pojezdové dráhy, údaj pro průnik elipsy s oblastí vyčkávacího místa je dále ještě omezen na situaci, že elipsa nemůže protnout ani koncovou příčku předdefinovaného vyčkávacího místa. V opačném případě by výsledné hodnoty těchto vzdáleností vykazovaly nechtěné nižší hodnoty v situaci, kdy se letadlo, a společně s ním i samotná konfidenční elipsa, pohybuje za hranici vymezeného vyčkávacího místa.

Tyto údaje o vzdálenostech částí elips jsou stěžejní pro získání statistických údajů o tom, jaké přesnosti multilaterální systémy v oblastech vyčkávacích míst dosahují. Ano, už samotné informace o směrodatných odchylkách chyb obsažených v ASTERIX zprávách, vztažených k letadlům vyskytujícím se v těchto místech, mohou určitou představu o přesnosti těchto dat poskytnout, avšak až tento dopočítaný údaj o maximální možné vzdálenosti mezi krajními body elips je dobrým ukazatelem toho, jaké chyby se při aplikaci této metody řešení dané problematiky dopouštíme. Tento údaj totiž nezohlední pouhý tvar a orientaci samotných elips, nýbrž také konkrétní charakter tvarů a velikostí pohybových ploch v těchto potenciálně kritických oblastech.

Dalším údajem, který se ve výstupní tabulce objevuje ve sloupci X, je údaj, který porovnává rozdíl vypočtených vzdáleností koncových ploch od přilehlé pojezdové dráhy při využití reálných rozměrů letadla (vzdálenost D) a při využití rozměrů obsažených v ADS-B zprávách (vzdálenost C). Ve sloupci Y jsou uváděny údaje o rychlosti pohybu sledovaného letadla získané podílem vzdáleností mezi 2 po sobě jdoucími zprávami a časů, který mezi tvorbou obou zpráv uplynul. Sloupec Y poté obsahuje indikaci, zda letadlo stálo či zda bylo v pohybu, číslice 1 v tomto sloupci indikuje, že se rychlost sledovaného letadla v průběhu 3 po sobě jdoucích zpráv snížila pod hodnotu 1 m/s. Tyto údaje jsou však vzhledem k nepřesnostem v jednotlivých udávaných polohách pouze orientační. I v případě, kdy letadlo stojí, je občas možné pozorovat odskoky signálu o rychlosti vyšší než 1 m/s. Jak již však bylo uváděno, samotná indikace, zda se letadlo pohybuje či nikoliv, není pro výsledné vyhodnocování bezpečnosti průjezdu stěžejní. Ve výstupní tabulce se dále ještě objevují ve sloupcích

AA a AB údaje o typu sledovaného letadla a hladině významnosti, která byla při tvorbě elips použita.

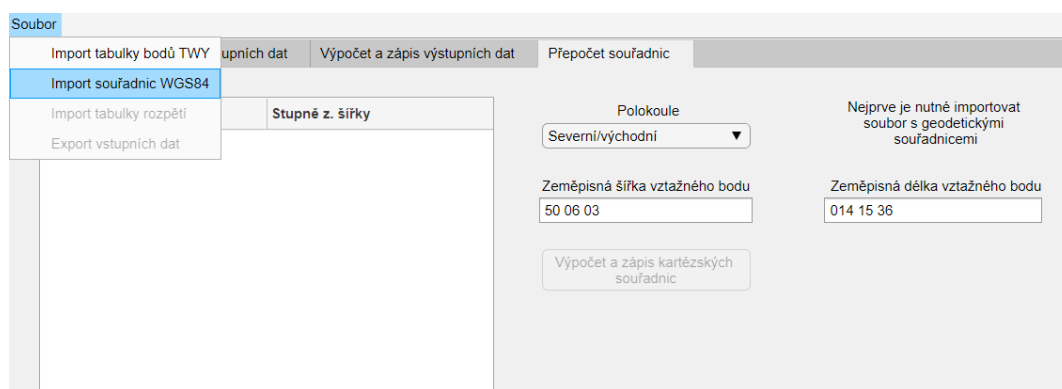
Všechny body a přímky, které jsou aplikací dopočítávány a které slouží k určení finálních vzdáleností zapisovaných do výstupní tabulky jsou schematicky znázorněny na obrázku 16, který vychází z údajů právě 1 datové ASTERIX zprávy. Ve spodní části tohoto obrázku je uvedena tabulka odpovídajících výstupních dat.



Obrázek 16 - Schéma aplikací určených bodů a přímek s výstupními údaji z 1 ASTERIX zprávy [autor]

8.4 Záložka 4 – Přepočít souřadnic

Poslední záložka (obrázek 17) slouží již jako pouhý doplněk, který je na ostatních funkcích programu zcela nezávislý. Jelikož je do programu nutné zadávat souřadnice bodů v kartézských soustavách, jejichž počátek leží ve většině případů ve vztahném bodě letiště (viz kapitola 3.2.2), je tato záložka navržena tak, aby uživateli pomáhala s převodem souřadnic do tohoto systému z geodetických souřadnic WGS84. Nejprve je uživatel žádán o vložení excelové tabulky se souřadnicemi k převodu přes rozbalovací nabídku *Soubor* a položku *Import souřadnic WGS84*. V tabulce se na prvním listu musí nacházet ve sloupci A souřadnice zeměpisné šířky a ve sloupci B souřadnice zeměpisné délky pro případ, že jsou souřadnice ve tvaru stupňů. Alternativou je import tabulky, ve které jsou v prvních 3 sloupcích vloženy údaje o zeměpisné šířce ve tvaru stupňů, minut a vteřin, to samé pak platí pro 3 sloupce následující, ve kterých se musí nacházet údaje o zeměpisné délce. Po úspěšném importu se vložené údaje propíší do tabulky v levé části obrazovky. Poté je nutné zvolit, na jaké kombinaci zemských polokoulí se letiště nachází a také souřadnicemi WGS84 ve tvaru stupňů, minut a vteřin definovat, kde se na zemském povrchu počátek kartézské soustavy souřadnic, do které jsou hodnoty převáděny, nachází. Ve výchozím stavu jsou pro tento údaj v aplikaci přednastaveny souřadnice vztahného bodu Letiště Václava Havla v Praze. Následně je možné tlačítkem *Výpočet a zápis kartézských souřadnic* provést převod souřadnic, kdy se nové kartézské souřadnice zapíší do sloupců A a B původní excelové tabulky na nový list označený písmeny CC. Výpočet souřadnic je založen na vzorci pro ortodromickou vzdálenost.



Obrázek 17 - Záložka 4 - přepočít souřadnic [autor]

Pomocí tohoto nástroje byly získány kartézské souřadnice bodů potřebné k získání dále zpracovávaných přehledových dat z pražského Ruzyňského letiště, jejichž původním zdrojem byly souřadnice geodetické z mapových podkladů Google.

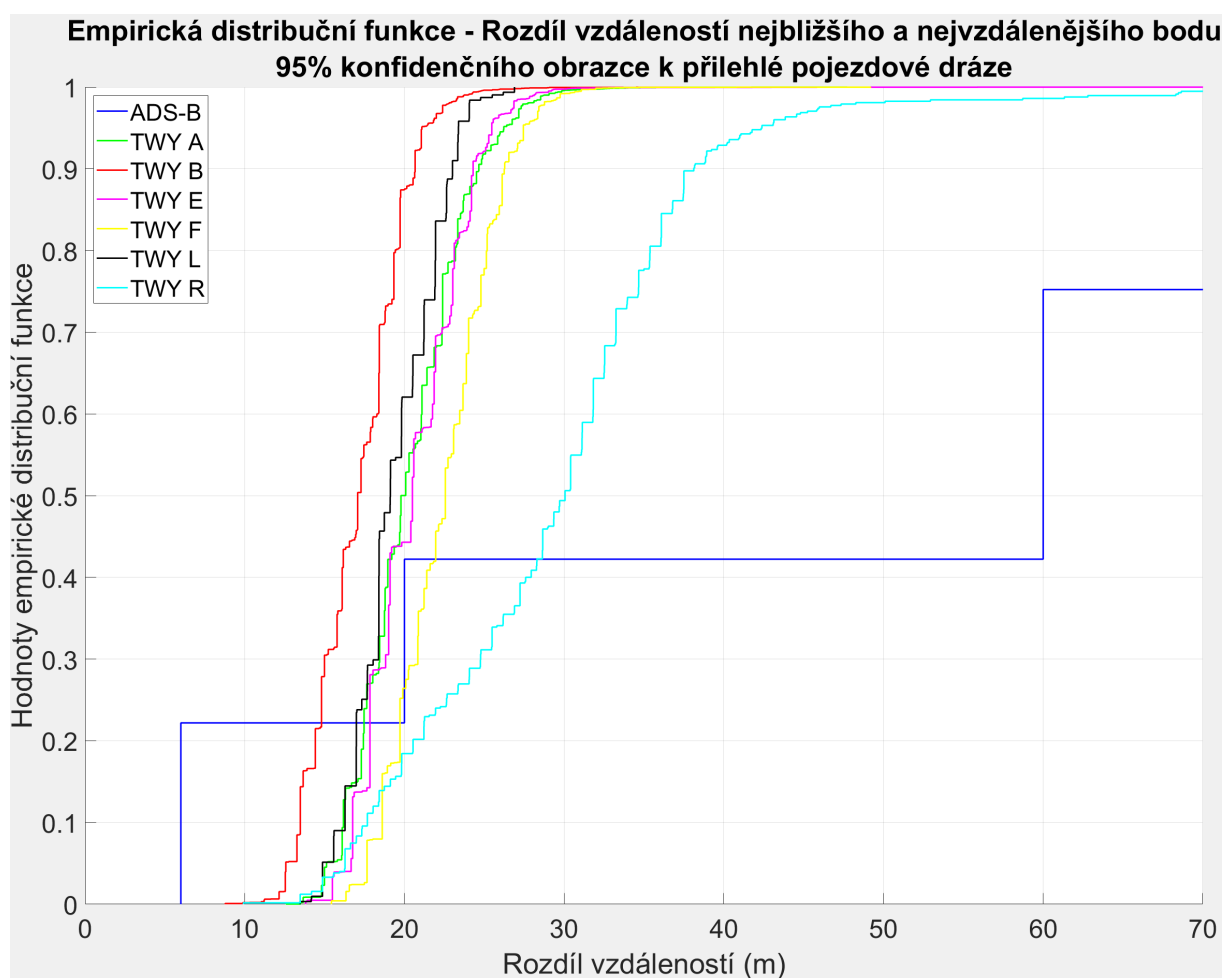
9 Analýza multilateračních dat získaných navrženou aplikací

V této kapitole jsou analyzována data, jejichž zisk byl popsán v kapitole 8. Jedná se o vyfiltrované ASTERIX zprávy, které byly vztaženy pouze k cílům vyskytujícím se na zvolených vyčkávacích místech. Na základě těchto údajů si je možné vytvořit ucelenou představu o tom, jaké přesnosti multilaterační systémy v těchto oblastech dosahují. Důraz je kladen na pozorované rozdíly při využití různých hladin významnosti spolu se srovnáváním údajů o přesnosti mezi jednotlivými vyčkávacími místy. Sledovány jsou údaje pocházející z vyčkávacích míst ležících na pojezdových drahách A, B, E, F, R a L. Pojezdové dráhy B, E, a R reprezentují ta vyčkávací místa, kterých se řešená problematika přímo týká, jelikož jsou za nimi vedeny další přilehlé pojezdové dráhy. Pojezdových drah A, F a L se řešená problematika přímo netýká, nicméně jsou zde uváděny za účelem poskytnutí informací pro vytvoření ucelené představy o tom, jak samotná lokace a geometrie pojezdových drah v oblastech vyčkávacích míst může charakteristiky navrhovaného řešení ovlivnit. Aby bylo možné poskytnout data stejného charakteru pro obě skupiny vyčkávacích míst, bylo nutné uvažovat, že pojezdové dráhy vedoucí k vyčkávacím místům A, F a L na těchto místech nekončí, avšak pokračují neměnným směrem dále a tvoří tak přilehlou pojezdovou dráhu. Původ dat, ze kterých bylo čerpáno, odpovídá tabulce 5.

9.1 Sledování parametrů teoretické přesnosti MLAT – rozdíl vzdáleností A a B

V následujícím grafu 2 empirické distribuční funkce jsou prezentovány údaje o tom, jakých rozdílů ve vzdálenostech A a B dosahovaly celé konfidenční elipsy na hladině významnosti 95 % v závislosti na konkrétním vyčkávacím místě. Tato hladina významnosti je zde zvolena za účelem možnosti srovnání získaných údajů o multilateračním systému s údaji ze systému ADS-B, u něhož ekvivalentní parametr představuje velikost průměru konfidenčních kružnic závislých na kategoriích NAC_p . Křivka vztažená k systému ADS-B vychází z optimistického předpokladu, kdy by letadla v oblastech vyčkávacích míst dosahovala maximálních NAC_p kategorií, které byly v průběhu jejich výskytu zaznamenány alespoň v 1 zprávě. Na ose x uváděný rozdíl ve vzdálenostech lze také chápat jakožto hranici intervalu, který, když je přičten k navrhovaným způsobem vypočtené vzdálenosti mezi letadly, definuje oblast, v rámci které se při zanedbání jakýchkoliv dalších nejistot v měření pohybuje s pravděpodobností odpovídající minimálně zvolené hladině významnosti hodnota reálná. Jinými slovy, pokud je navrhovaným postupem vypočtena vzdálenost mezi

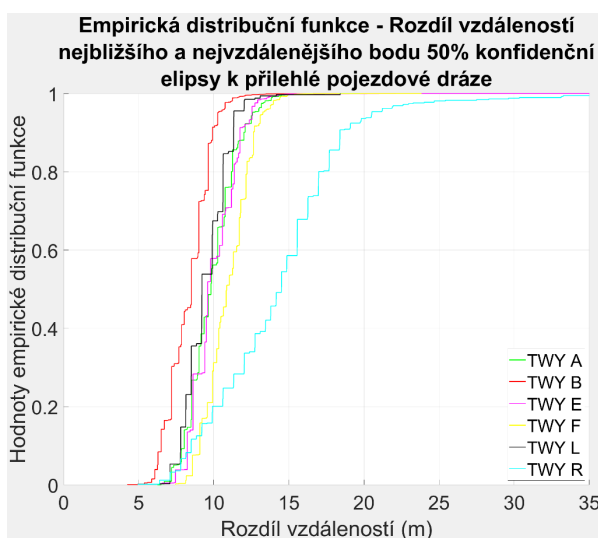
letadly 20 m a k tomuto výpočtu byla využita konfidenční elipsa na hladině významnosti 95 %, v rámci které rozdíl vzdáleností A a B dosahoval 15 m, pak se s pravděpodobností alespoň 95 % reálná vzdálenost mezi letadly pohybuje v intervalu od 20 m do 35 m. Veškeré dále prezentované hodnoty reprezentují údaje vztažené k oblastem celých elips a nikoliv pouze k jejich průnikům s oblastmi plně únosných vozovek vyčkávacích míst tak, jak bylo navrhováno na předchozích stranách. Hodnoty vztažené k průnikům elips s plně únosnými vozovkami vyčkávacích míst byly vyloučeny vzhledem k zanedbatelným rozdílům oproti elipsám kompletním. Při tvorbě elips na hladině významnosti 80 % byl rozdíl v hodnotách vztažených pro celé a pro omezené elipsy pozorován v pouhých 5 % případech a průměrně dosahoval hodnot v řádech centimetrů.



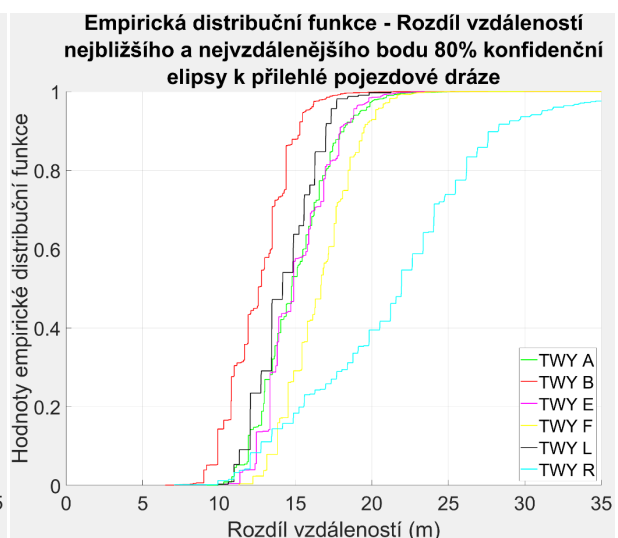
Graf 2 - Empirická distribuční funkce - velikost 95% konfidenční oblasti [autor]

Z grafu 2 vyplývají tři důležité poznatky. Tím prvním je evidentní závislost pozorované přesnosti multilateračního systému na konkrétním vyčkávacím místě. Zatímco v 50 % případů dosahoval rozdíl ve vzdálenostech A a B na vyčkávacím místě B 17 m,

v případě vyčkávacího místa R to bylo metrů 30. Druhým poznatkem je poměrně strmý a stabilní nárůst distribučních funkcí u většiny vyčkávacích míst svědčící o nízké variabilitě pozorovaných rozdílů ve vzdálenostech. Výjimku zde tvoří pouze vyčkávací místo R, u kterého byl pozorovaný nárůst v porovnání s ostatními pozvolnější. Třetí poznatek pak plyne ze srovnání distribučních funkcí multilateračního systému se systémem ADS-B. I přes to, že distribuční funkce ADS-B reprezentuje neoptimističtější možný scénář, dosahovala přesnost tohoto systému vůči přesnosti multilaterace pro vyčkávací místa A, B, E a L lepších hodnot pouze ve 22 % případů. Vůči vyčkávacím místům F a R pak ve 42 % případů. Jinými slovy, aby bylo na vyčkávacích místech A, B, E a L dosaženo lepší přesnosti využitím ADS-B systému namísto multilaterace, bylo nutné, aby letadlo vykazovalo navigační schopnosti kategorie NAC_p 11. U vyčkávacích míst F a R pak byla přesnost ADS-B polohy vyšší i v případě NAC_p kategorie 10.



Graf 3 - EDF - 50% konfidenční elipsa [autor]

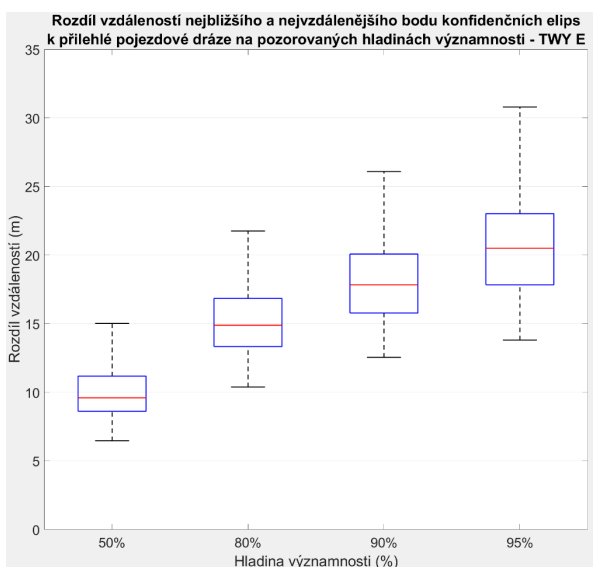


Graf 4 - EDF - 80% konfidenční elipsa [autor]

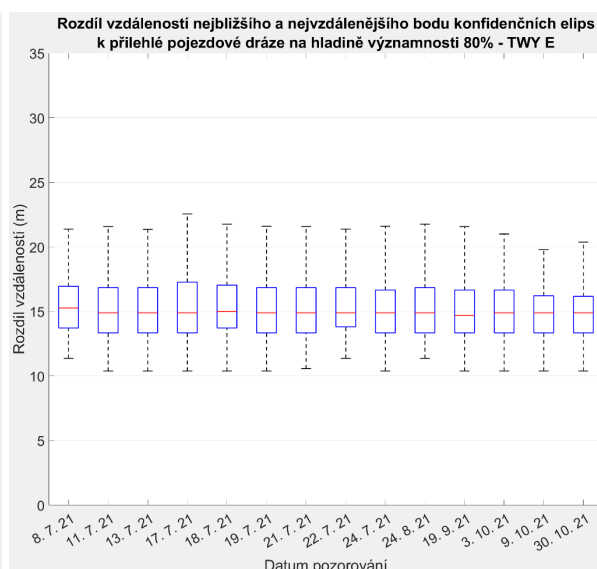
Grafy 3 a 4 vzájemně znázorňují závislost pozorovaných rozdílů vzdáleností na vybraných hladinách významnosti. Rozdíl ve vzdálenostech u elipsy s hladinou významnosti 50 % je oproti elipse s hladinou významnosti 80 % přibližně poloviční.

Dále jsou uváděny krabicové grafy 5 a 6 reprezentující závislost pozorovaných rozdílů vzdáleností A a B na vybraných hladinách významnosti a následně pak na jednotlivých dnech pozorování vztahené k vyčkávacímu místu na pojezdové dráze E. Pozornost je zde soustředěna právě na toto vyčkávací místo vzhledem k tomu, že představuje z hlediska řešené problematiky ve srovnání s ostatními nejrizikovější oblast. Ostatně v minulosti již na tomto místě došlo ke dvěma kolizím přímo plynoucím z této

problematiky. Nejprve v roce 2010, kdy se zde střetl Airbus A321 s Boeingem 737-800W¹ a dále pak v roce 2019, kdy zde došlo ke střetu dvou Boeingů 737-800W². Zároveň bylo při řešení této práce k dispozici pro vyčkávací místo E největší množství ASTERIX zpráv.



Graf 5 – Krabicový diagram - hladiny významnosti TWY E [autor]



Graf 6 – Krabicový diagram - dny pozorování TWY E [autor]

Modře značené oblasti grafů reprezentují výskyt 50 % pozorovaných hodnot a černě značené hranice výskyt 95 % pozorovaných hodnot, červená čára pak odpovídá hodnotě mediánu. V obou grafech 5 a 6 se na ose y opět vyskytují pozorované rozdíly ve vzdálenostech A a B. Graf 5 reprezentuje, jakým tempem se při rostoucí hodnotě užití hladiny významnosti mění oblast hodnot, ve kterých se výsledná hodnota rozdílu vzdáleností nacházela. Na jedné straně je žádoucí využít k určení vzdálenosti mezi letadly co možná nejvyšší hladinu významnosti, aby byly v nejvyšší možné míře eliminovány situace, kdy by byla reálná vzdálenost mezi letadly nižší, než hodnota navrhovaným algoritmem spočtená. Na straně druhé je však nutné využívat elipsy, jejichž rozměry nejsou příliš velké, aby teoreticky spočtené hodnoty odpovídali co nejlépe realitě. Pozorovaný rozdíl vzdáleností A a B vydělený dvěma lze totiž také chápat jakožto průměrnou vzdálenost, o kterou je reálná vzdálenost mezi letadly vyšší oproti té teoreticky spočtené. Dále je nutné si také uvědomit, že rozdíl mezi užitou hladinou významnosti a hodnotou 100 % nereprezentuje pravděpodobnost, že je reálná vzdálenost oproti té teoreticky spočtené menší. Tato hodnota reprezentuje

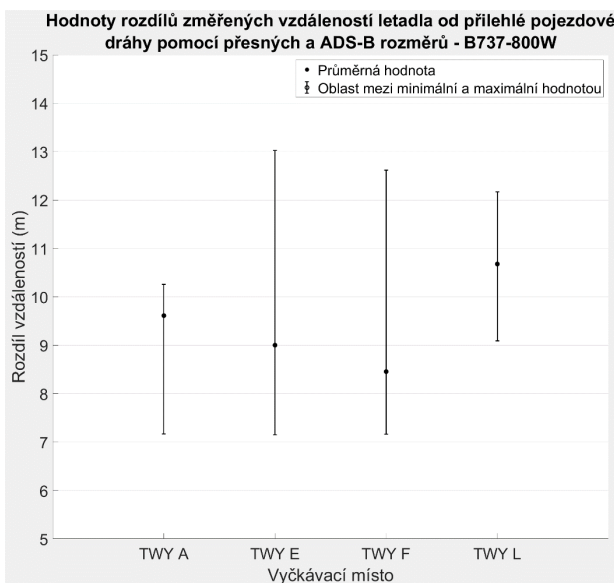
¹ Odkaz na událost: <https://uzpln.cz/incident/124>

² Odkaz na událost: <https://uzpln.cz/incident/606>

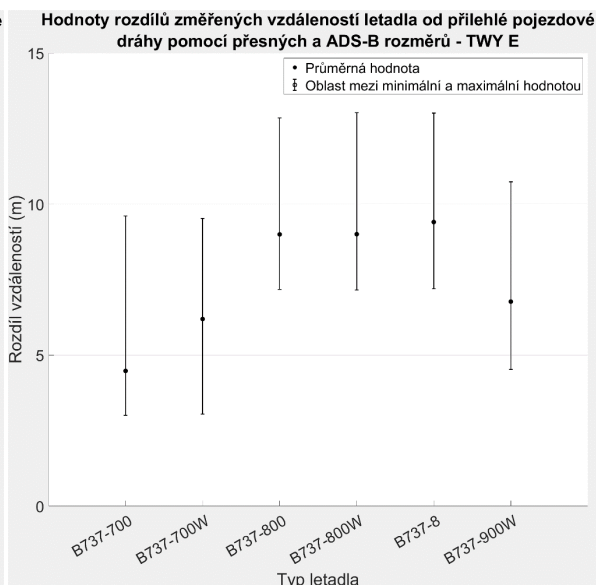
pouze pravděpodobnost, že se skutečná poloha antény odpovídače sledovaného letadla nenachází v oblasti ohraničené danou konfidenční elipsou. Problematice určení pravděpodobnosti s jakou je reálná vzdálenost menší než ta teoreticky spočtená je věnována kapitola 9.3. Z grafu 6 je patrná stabilita parametrů přesnosti multilateračního systému v daném místě v průběhu všech pozorovaných dnů.

9.2 Vliv užitých rozměrů letadel na určení výsledné vzdálenosti – rozdíl vzdáleností C a D

Jak již bylo uváděno v kapitolách 5 a 6, způsob implementace samotných rozměrů letadel do procesu výpočtu polohy jejich koncových ploch může zásadním způsobem ovlivnit, jak přesně bude výsledná vzdálenost mezi letadly určena. Zatímco při znalosti reálných rozměrů letadla a jeho orientace lze jeho koncové části vůči jeho anténě odpovídače přesně lokalizovat, tak při znalosti orientačních rozměrů obsažených v ADS-B zprávách lze pouze vytyčit oblast ve tvaru obdélníka, ve které se všechny části sledovaného letadla nachází. Tato vytyčená oblast musí být pak vzhledem k principu implementace těchto údajů do ADS-B zpráv zákonitě větší, než oblast kopírující přesný půdorys letadla. Výsledkem tedy je, že při využití rozměrů obsažených v ADS-B zprávách bude výsledná teoreticky určená vzdálenost mezi letadly prakticky ve všech případech menší, než jaká vzdálenost by byla určena při užití rozměrů přesných. Tyto 2 hodnoty jsou na obrázku 16 reprezentovány písmeny C a D a jejich rozdíl je sledován v následujících grafech. Vzhledem ke znalosti přesného offsetu antény odpovídače pouze u letadel Boeing 737 NG a MAX jsou v této kapitole prezentované údaje vztažené výhradně k těmto typům letadel. Údaje zároveň vychází, vzhledem k již zmiňované absenci informací o headingu v dostupných ASTERIX záznamech ADS-B zpráv, z předpokladu ideálních průjezdů letadel danými vyčkávacími místy určené pomocí aplikace AviPLAN.



Graf 7 - Závislost pozorovaného rozdílu vzdáleností na tvaru vyčkávacího místa (B737-800W) [autor]



Graf 8 - Závislost pozorovaného rozdílu vzdáleností na typu letadla (TWY E) [autor]

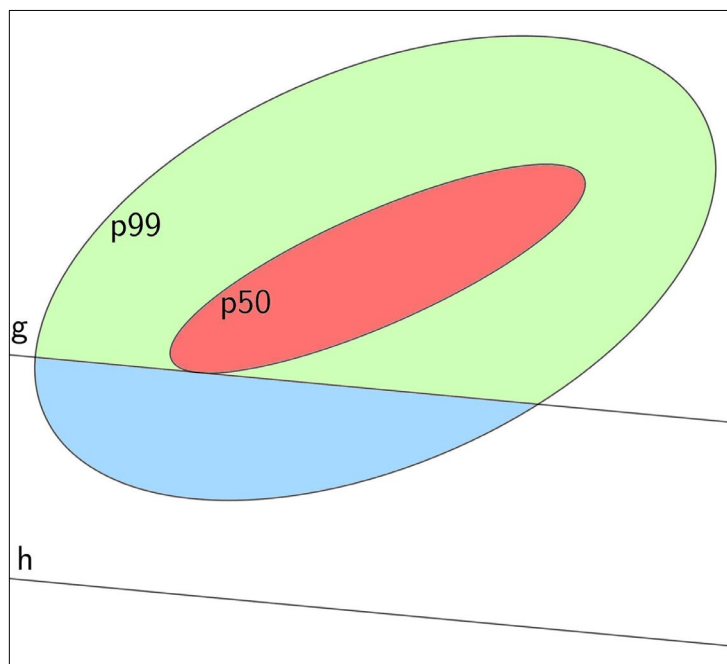
Tabulka 10 - Rozdíly mezi skutečnými a ADS-B rozměry u sledovaných letadel [39, 42]

Varianta	Šířka (m)			Délka (m)		
	Skutečná	ADS-B	Rozdíl	Skutečná	ADS-B	Rozdíl
B737 700	34,32	38	+3,68	33,63	35	+1,37
700W	35,79	38	+2,21	33,63	35	+1,37
800	34,32	39,5	+5,18	39,47	45	+5,53
800W	35,79	39,5	+3,71	39,47	45	+5,53
MAX 8	35,92	39,5	+3,58	39,52	45	+5,48
900W	35,79	39,5	+3,71	42,11	45	+2,89

Graf 7 znázorňuje závislost pozorovaných rozdílů ve vzdálenostech C a D na vybraných vyčkávacích místech u letadla B737-800W. Je patrné, že tvar pojezdové dráhy dokáže pozorované hodnoty rozdílů ovlivnit v řádech několika metrů. Z údajů obsažených v grafu 8 a tabulce 10 je možné pozorovat, jak se projeví samotné přídavky dílčích rozměrů na celkové chybě, se kterou by se musel navrhovaný způsob řešení potýkat. Nejhorší identifikovaný scénář byl zaznamenán v případě pohybu letadel B737-800, 800W a 8 po pojezdové dráze E. V určitý okamžik by v takovém případě mohlo docházet k tomu, že by navrhovaným způsobem určená vzdálenost mezi letadly byla vlivem použití ADS-B rozměrů o 13 metrů kratší, než jaká by byla v daný okamžik vzdálenost skutečná, i v případě, že by do procesu výpočtu vzdálenosti nevstupoval žádný další zdroj nejistot měření.

9.3 Určení pravděpodobnosti chybného výpočtu vzdálenosti mezi letadly plynoucího z dat o multilaterační nepřesnosti

Již bylo uváděno, že ze samotného parametru hladiny významnosti užití konfidenční elipsy k určení vzdálenosti mezi letadly nelze určit, s jakou pravděpodobností je reálná vzdálenost kratší oproti té spočtené. Tato skutečnost je vyobrazena na obrázku 18.

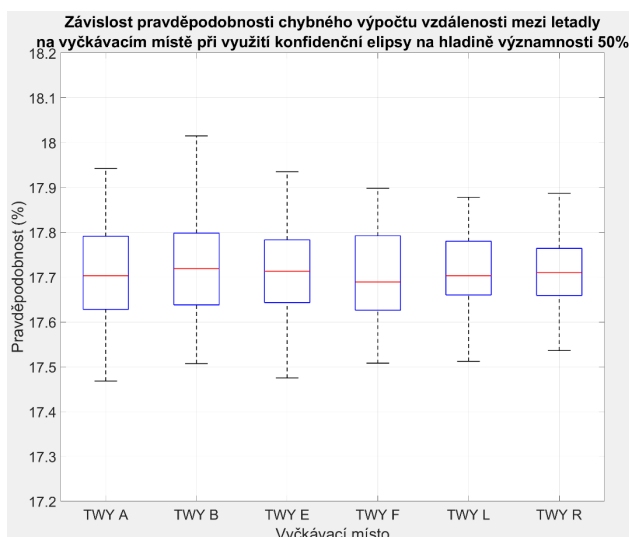


Obrázek 18 - Oblasti konfidenčních elips [autor]

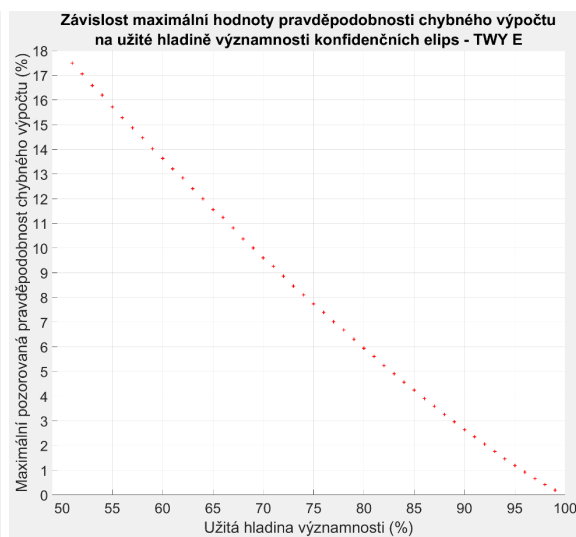
Přímka h reprezentuje předpokládanou trajektorii konce křídla pojíždějícího letadla. Přímka g je k přímce h rovnoběžná a zároveň tvoří tečnu ke konfidenční elipse na zvolené, v tomto případě 50%, hladině významnosti. Vzdálenost mezi těmito 2 přímkami reprezentuje navrhovaným způsobem určenou vzdálenost mezi anténou odpovídače letadla vyčkávajícího a koncem křídla letadla pojíždějícího po přilehlé pojezdové dráze. Při zanedbání jakýchkoliv dalších nepřesností měření vyjma nepřesnosti samotného multilateračního systému by byla skutečná vzdálenost mezi letadly menší než ta teoreticky spočtená pouze v takovém případě, kdy by se reálná poloha antény odpovídače vyčkávajícího letadla vyskytovala v situaci vyobrazené na obrázku 18 jižně od přímky g . Pro určení pravděpodobnosti, s jakou tento jev může nastat, byl navržen následující způsob. Pravděpodobnost reálného výskytu antény odpovídače v červené oblasti dosahuje ve vyobrazené situaci 50 %. Pravděpodobnost výskytu antény v jedné ze 3 zbarvených oblastí je 99 %. Z těchto 2 skutečností vyplývá, že pravděpodobnost výskytu v modré a zelené oblasti dosahuje v ideálním

případě rozdílu hladin významnosti užitých konfidenčních elips. Při použití dostatečně velké hladiny významnosti větší elipsy pak poměr obsahu modré oblasti ku součtu obsahů modré a zelené oblasti vynásobený rozdílem užitých hladin významnosti definuje výslednou pravděpodobnost, s jakou se anténa odpovídače nachází v modře zbarvené oblasti, což právě představuje situaci, kdy je anténa odpovídače ve skutečnosti blíže, než jaká je vzdálenost navrhovaným způsobem spočtená.

Tento princip byl opět aplikován na analyzované multilaterační zprávy ASTERIX pocházející z jednotlivých vyčkávacích míst. Při této analýze byl sledován průběh pravděpodobnosti chybného určení vzdálenosti mezi letadly v závislosti na užití hladině významnosti konfidenčních elips. Pro větší elipsu byla ve všech případech zvolena hladina významnosti 99,99 %. Chybným výpočtem se rozumí stav, kdy navrhovaným algoritmem určená vzdálenost mezi letadly je větší než vzdálenost skutečná.



Graf 9 - Krabicový diagram - závislost pravděpodobnosti chybného výpočtu na vyčkávacím místě [autor]



Graf 10 – Průběh závislosti pravděpodobnosti chybného výpočtu na zvolené hladině významnosti konfidenčních elips - TWY E [autor]

Z krabicového grafu 9 je patrné, že pravděpodobnost chybného výpočtu nevykazovala mezi jednotlivými vyčkávacími místy na pozorovaných datech žádné výrazné rozdíly. Medián pozorovaných pravděpodobností dosahoval ve všech případech 17,7 %. Graf 10 pak ukazuje průběh poklesu maximální pozorované pravděpodobnosti chybného výpočtu, určené výše uvedeným postupem, plynoucí z rostoucí hladiny významnosti užitých konfidenčních elips na pojezdové dráze E.

10 Vyhodnocení parametrů navrhovaného řešení

Aby bylo možné navrhované řešení implementovat do praxe, je nutné, aby bylo splněno několik základních předpokladů. Vzhledem k absolutní závislosti řešení na multilateračních a ADS-B systémech je nutné, aby letištní přehledová infrastruktura daty z obou těchto systémů disponovala. Další nezbytnou vlastností, která je pro navrhované řešení stěžejní, je přítomnost parametrů o polohové přesnosti v multilateračních ASTERIX zprávách. Jak bylo uváděno v kapitole 4, implementace těchto parametrů není povinná. Avšak dle informací od společnosti ERA, která je významným světovým dodavatelem těchto systémů a zároveň i dodavatelem systému, jehož parametry byly na předchozích stranách posuzovány, jsou údaje o přesnosti přítomny u všech touto společností instalovaných multilateračních systémů. Až po splnění těchto 2 předpokladů by bylo možné nad implementací potenciální bezpečnostní funkce, založené na navrhovaném algoritmu, na daném letišti uvažovat. Dalším předpokladem je přítomnost informací o headingu v ADS-B zprávách od letadel vyskytujících se na zemi. Procentuální zastoupení letadel, která tento údaj v současnosti poskytují, a potažmo i jeho samotnou kvalitu, bohužel nebylo možné z dostupných zdrojů ověřit.

Polohové informace z multilateračního systému jsou upřednostňovány především díky stabilnějším a obecně lepším parametrům své přesnosti, ve srovnání s parametry, které byly zaznamenány u ADS-B. V určitých případech sice mohou nastávat situace, kdy přesnost ADS-B polohy tu multilaterační předčí, na pozorovaném vzorku dat však k takovému jevu mohlo teoreticky dojít v pouhých 22 % případech. Tento údaj navíc vychází z již popisovaného optimistického scénáře, kdy by všechna letadla dosahovala nejlepších zaznamenaných hodnot NAC_p právě v oblastech vyčkávacích míst. Využitím multilateračních polohových údajů namísto těch ze systému ADS-B je navíc eliminována jakákoliv závislost na navigačních schopnostech jednotlivých letadel. Z těchto údajů lze usoudit, že multilaterační systém je pro řešení této problematiky vhodnější. Další možností by byla kombinace polohových údajů z obou těchto systémů, která by mohla být ve zmiňovaných až 22 % pozorovaných případech přínosná. Zcela jistě však není vhodné problematiku řešit výhradně za pomoci polohových údajů z ADS-B.

Myšlenka vylučovat z výpočtů části elips, které se vyskytují mimo plně únosnou vozovku vyčkávacího místa, se ukázala jakožto nadbytečná. Při tvorbě konfidenčních

elips na hladině významnosti 80% byl přínos této úvahy zaznamenán u pouhých 5 % případů, ve kterých zajišťoval průměrné zpřesnění výsledné vypočtené vzdálenosti mezi letadly o 13 cm. Implementace této části algoritmu by tedy, v naprosté většině případů, pouze komplikovala celý proces výpočtu za cenu zanedbatelného přínosu.

Vzájemné porovnání zaznamenaných parametrů polohové přesnosti multilateračního systému mezi jednotlivými vyčkávacími místy prokazuje, že se přesnost tohoto systému na různých vyčkávacích místech výrazně liší. Nejlepší parametry přesnosti byly identifikovány na vyčkávacím místě B, nejhorší pak na vyčkávacím místě R. Příklad konkrétních hodnot, vycházejících z analyzovaných dat, je při aplikaci navrhovaného algoritmu a úvaze, že je nepřesnost multilateračního systému jediným zdrojem nejistot ve změřené vzdálenosti mezi letadly, následující. Při využití konfidenčních elips na hladině významnosti 80 % by byl v 95 % případů průjezd druhého letadla za vyčkávacím místem B označen za bezpečný, jinými slovy by systém vyhodnotil, že vzdálenost mezi letadly v průběhu průjezdu neklesne na hodnotu 0 m, právě ve chvíli, kdy by reálná vzdálenost mezi letadly byla v nejkritičtějších bodě průměrně méně než 8 m³. Pro vyčkávací místo R je však ekvivalentní hodnotou pro shodný případ 15,5 m. Na obou vyčkávacích místech by se pravděpodobnost chybného výpočtu pohybovala okolo 6 %. Je tedy patrné, že rozdíly mezi jednotlivými vyčkávacími místy mohou efektivitu navrhovaného řešení zásadním způsobem ovlivnit.

Způsob implementace rozměrů letadel do procesu výpočtu vzdálenosti mezi nimi je dalším důležitým faktorem, který efektivitu navrhovaného řešení významně ovlivňuje. Pomocí rozměrů obsažených v ADS-B zprávách by bylo možné tuto problematiku řešit až po reálné provozní implementaci jejího standardu DO-260C, čímž se do těchto zpráv dostane údaj o offsetu antény odpovídače. Avšak vzhledem k nedostatečné přesnosti údajů o rozměrech letadel obsažených v ADS-B zprávách nepředstavuje jejich využití v případě řešené problematiky příliš efektivní řešení. Chyba, která byla využitím ADS-B rozměrů do výpočtů aplikovaných na analyzovaná data vnášena, dosahovala u pozorovaných typů letadel až 13 m. Navíc vzhledem k tomu, že tento údaj vychází z pozorování výhradně variant letounů Boeing 737, se lze domnívat, že v určitých případech jiných typů letadel by vnášená chyba dosahovala hodnot ještě

³ Údaje vycházející z grafu 4, průměrná vzdálenost mezi letadly je zde rovna polovině rozdílu vzdáleností A a B vynesené na ose x.

vyšších. Ze získaných dat tak vychází, že případná implementace navrhovaného řešení by pro zajištění své maximální efektivity musela disponovat schopnostmi identifikace jednotlivých typů letadel a následného přesného určení jejich vybraných rozměrů (viz kapitola 5).

Pravděpodobnost chybovosti navrhovaného výpočtu vychází z hladiny významnosti využitých konfidenčních elips. Je však ovlivněna jak orientací, tak samotnou velikostí těchto konfidenčních obrazců. Proto je možné v rámci jednotlivých zpráv pozorovat její mírnou variabilitu i při využití konstantní hladiny významnosti. Při hladině významnosti 80 % byla zaznamenána její variabilita v intervalu 17,4 % a 18,1 % pro všechna vyčkávací místa, přímá závislost tohoto parametru na konkrétním vyčkávacím místě tak prokázána nebyla. Zároveň byly na grafu 10 uvedeny konkrétní hodnoty průběhu této pravděpodobnosti v závislosti na rostoucí hladině významnosti pro vyčkávací místo E. Pro ostatní vyčkávací místa byl tento průběh obdobný. Tyto hodnoty pravděpodobností chybného výpočtu určují, jaké hladiny významnosti je třeba využít pro dosažení požadované spolehlivosti navrhovaného řešení. Pokud by bylo například požadováno, aby systém identifikoval volný průjezd pro 2. letadlo s 95% jistotou, je z grafu 10 patrné, že by v takovém případě musely být využity pro výpočet konfidenční elipsy s hladinou významnosti alespoň 83 %. Tabulka 12 charakterizuje, jakých parametrů chybovosti bylo dosaženo na vybraných hladinách významnosti u analyzovaných dat.

Tabulka 11 - Pravděpodobnosti chybného výpočtu a rozdíly mezi spočtenou a reálnou vzdáleností [autor]

Použitá hladina významnosti	Zaznamenaná maximální pravděpodobnost chybného výpočtu	Zaznamenaný pravděpodobný průměrný rozdíl mezi spočtenou a reálnou hodnotou vzdálenosti mezi letadly ⁴ (m):					
		TWY A	TWY B	TWY E	TWY F	TWY L	TWY R
50 %	18 %	4,95	4,18	5,01	5,48	4,75	7,19
80 %	6 %	7,49	6,29	7,57	8,29	7,15	10,89
90 %	3 %	8,92	7,51	9,03	9,86	8,54	13,00
95 %	1 %	10,16	8,54	10,32	11,24	9,72	14,80

⁴ Průměrný zaznamenaný rozdíl vzdáleností A a B vydělený 2

Důležité je zdůraznit, že veškeré zde prezentované údaje pravděpodobností vychází z předpokladu, že by byl průjezd vyhodnocován za bezpečný už na základě 1 přijaté multilaterační zprávy, ze které by byla tato skutečnost navrhovaným postupem stanovena. Pokud by však byla bezpečnost průjezdu vyhodnocena z většího množství zpráv, pravděpodobnost chybovosti se může v takovém případě do jisté míry dále snižovat.

Jelikož je celý prezentovaný proces výpočtu založen na údajích o polohové přesnosti, které jsou vyhodnocovány a vytvářeny samotným multilateračním systémem, bylo by v případě reálné implementace bezpečnostní funkce, založené na navrhovaném algoritmu, vhodné jejich relevantnost v oblasti daného vyčkávacího místa podložit ověřovacím testem.

11 Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout technické řešení problematiky kolizí letadel v oblastech vyčkávacích míst RWY s přilehlou pojezdovou dráhou. Nejprve byla soustředěna pozornost na jednotlivá zařízení, která byla v minulosti z pohledu řešené problematiky identifikována jako potenciálně přínosná. Ze získaných informací se jeví jako možnost s nejvyšším potenciálem právě taková, která spoléhá na polohové údaje ze stávajících přehledových systémů.

Následně se již práce zabývá výhradně přehledovými systémy sloužícími pro sledování provozu na pohybových plochách letišť. Pozornost zde byla věnována konceptu A-SMGCS, do kterého spadají mnohé, již existující, bezpečnostní funkce, které ke zvyšování bezpečnosti provozu letadel na pohybových letištích přispívají. Žádnou bezpečnostní funkci, která by řešila problematiku kolizí v oblastech vyčkávacích míst, však tento koncept v současnosti nedisponuje. Ze tří alternativ zdrojů polohových informací začleněných do konceptu A-SMGCS v podobě primárního radaru, multilaterace a ADS-B byl vzhledem ke svým, z pohledu řešené problematiky, nevyhovujícím charakteristikám primární radar vyloučen.

V další části práce byly přiblíženy informace poskytované těmito přehledovými systémy v podobě zpráv ASTERIX. V tomto případě byl kladen důraz právě na ty části zpráv, které svými vlastnostmi mohou pro řešení této problematiky, za pomoci současných přehledových systémů, poskytovat klíčové údaje.

Vzhledem k povaze navrhovaného řešení bylo taktéž nutné analyzovat schopnosti současných přehledových systémů určovat rozměry sledovaných letadel. V současnosti mohou být v ADS-B zprávách kódovány informace o délce i šířce letadla společně s informací o poloze jeho GNSS antény. Pro multilaterační systém podstatný údaj o poloze antény odpovídače v těchto zprávách chybí. Tento údaj se však v ADS-B zprávách objevuje v novém standardu, který je v plánu do budoucna provozně implementovat. Vzhledem k absenci některých dalších stěžejních údajů o rozměrech letadel, které je nutné znát pro přesnou lokalizaci jejich koncových ploch, a nepřesného kódování současných rozměrů o délce a šířce letadel však využití těchto informací k výpočtu polohy koncových ploch jednotlivých letadel efektivitu navrhovaného řešení degraduje.

Poté již byla navržena samotná metoda výpočtu polohy koncových ploch obou letadel, která do problematiky vstupují. Tato metoda spoléhá na polohové údaje získané z multilateračního systému v kombinaci s doplňkovými údaji získanými ze systému ADS-B a údaji obsaženými v nezbytných předdefinovaných databázích. Aby navržená metoda poskytovala relevantní údaje, je nutné v celém procesu výpočtu vzdálenosti mezi letadly zohledňovat samotnou přesnost užitých polohových údajů určenou multilateračním systémem. Za účelem ověření přínosu a efektivity navrhovaného postupu byly následně analyzovány záznamy provozních zpráv ASTERIX získané ze senzorů umístěných na Letišti Václava Havla v Praze.

Nejprve byla potvrzena hypotéza, že není v současnosti vhodné navrhovat řešení této problematiky výhradně za pomoci polohových údajů ze systému ADS-B. K tomuto posloužila analýza kategorií NAC_p, do kterých byly zprávy z letadel zařazovány v průběhu svých jednotlivých výskytů. Následně byla již pozornost soustředěna na informace získané ze systému multilateračního.

Vzhledem k charakteristikám zisku přehledových informací pomocí multilaterace bylo nutné pro analýzu datových zpráv z těchto systémů navrhnout v prostředí MATLAB vhodný nástroj. Zároveň jím bylo možné demonstrovat reálnou aplikaci navrhovaného řešení. Na principech funkčnosti tohoto nástroje byl popsán proces zisku dat, která byla posléze podrobena statistickému zpracování za účelem ověření efektivity navrhovaného řešení v případě jeho potenciální aplikace na současnou přehledovou infrastrukturu Letiště Václava Havla.

V posledních částech práce byly prezentovány konkrétní hodnoty pravděpodobnostních a vzdálenostních parametrů, se kterými by se případná implementace navrhovaného řešení musela potýkat.

Ze všech získaných informací tak lze usoudit následující závěry. Na navrhované metodě výpočtů vzdáleností mezi letadly lze postavit bezpečnostní funkci, která by snižovala riziko kolizí letadel v oblastech vyčkávacích míst s přílehlou pojezdovou dráhou, avšak před případnou implementací tohoto řešení je třeba vyřešit a zohlednit následující faktory. V první řadě by bylo nutné zdokonalit přesnost rozměrových údajů letadel, se kterými současné přehledové systémy pracují. Současné hodnoty rozměrů obsažené v ADS-B zprávách efektivitu navrhovaného řešení výrazně degradují. Pokud by měla být tato bezpečnostní funkce založena právě na těchto rozměrových údajích,

je žádoucí, aby se schopnosti ADS-B v tomto ohledu do budoucna zdokonalily. Ať už navrhovanou úpravou některých stávajících položek nebo doplněním položek nových. Přítomnost těchto údajů by zcela jistě byla přínosem i pro mnohé další letištní bezpečnostní funkce zamezující kolizím letadel, které by na jejich základě mohly dále vznikat. Druhou potenciální možností je získání rozměrových údajů z databáze, na základě které by přehledový systém dokázal určit podle 24 bitové adresy přesný typ letadla, kterému by přiřadil patřičné rozměry. Zároveň nelze říci, že by navrhované řešení našlo uplatnění na všech, z pohledu řešené problematiky, rizikových místech letišť, kde je multilaterační systém instalován. Ze získaných údajů z Letiště Václava Havla vyplývá, že přesnost multilateračního systému může být v rámci různých vyčkávacích míst dosti odlišná. Vhodnost implementace navrhovaného řešení tak bude vždy záviset na konkrétních parametrech přesnosti polohových informací v daném místě. Před případnou implementací by tedy bylo nutné hodnoty těchto parametrů společně s jejich relevancí v daném místě ověřit a stanovit, jestli je tato implementace v daném místě vhodná. Případně by bylo nutné dále zvolit adekvátní hladinu významnosti pro tvorbu konfidenčních elips pro dané místo. Příliš vysoká hladina významnosti blížící se 100 % by v praxi zapříčinila, že by systém dokázal spolehlivě odhalovat situace, kdy by vyčkávající letadlo zasahovalo do průjezdního profilu letadla pojezdějícího po přilehlé TWY. Pravděpodobnost, že by systém v tomto selhal by konvergovala k 0 %. Avšak na straně druhé by systém, při využití takto vysokých hodnot hladin významnosti, identifikoval uvolnění tohoto průjezdního profilu až ve chvíli, kdy by skutečná vzdálenost mezi letadly v bodě maximálního sblížení činila průměrně i několik desítek metrů. U příliš nízkých hladin významnosti by pak nastával jev opačný. Zaznamenané hodnoty těchto jevů a jejich závislost na konkrétních vyčkávacích místech Letiště Václava Havla byly prezentovány v tabulce 11.

V práci dále nebylo možné, vzhledem k jejich absenci v dostupných záznamech, ověřit přesnost údajů o headingu letadel vysílaných v ADS-B zprávách. Tomuto údaji zároveň není v ADS-B zprávách vyhrazen žádný kvalitativní indikátor. Jelikož je údaj o orientaci letadla pro výsledné určení vzdálenosti mezi letadly podstatný, je žádoucí, aby byla v budoucnu ověření přesnosti tohoto údaje věnována pozornost. Dále by bylo nutné navrhnout již konkrétní podobu indikace výstupu této bezpečnostní funkce na obrazovky řídicích letového provozu a s tím spojené i patřičné provozní postupy.

Seznam použité literatury

- [1] ICAO. Aerodrome Design Manual - Part 2 - Taxiways, Aprons and Holding Bays (Doc 9157 - Part 2) - 4th Edition. 2005
- [2] HAD, Petr. Způsoby detekce pozice letadel na vyčkávacích místech RWY [online]. Praha, 2019 [vid. 2022-03-04]. Fakulta dopravní ČVUT v Praze. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/85341>
- [3] EASA. Certification Specifications and Guidance Material for Aerodrome Design - Issue 6 [online]. 2022. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/downloads/136283/en>
- [4] GAUCI, Jason a David ZAMMIT-MANGION. Obstacle Detection Around Aircraft on Ramps and Taxiways Through the Use of Computer Vision. In: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference [online]. Chicago, Illinois: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009 [vid. 2022-03-04]. ISBN 978-1-60086-978-5. Dostupné z: doi:10.2514/6.2009-5866
- [5] MICHAEL, JABOYEDOFF. Mapping and Monitoring of Landslides Using LIDAR. In: Natural Hazards: Earthquakes, Volcanoes, and Landslides [online]. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis, 2018, s. 397–420. ISBN 978-1-138-05443-1. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/328019245_Mapping_and_Monitoring_of_Landslides_Using_LIDAR
- [6] Delphi ESR Radar Product Page: [online]. [vid. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://autonomoustuff.com/products/aptiv-esr-2-5-24v>
- [7] Fotka „modern airplane tail side view isolated on blue sky background Passenger jet plane fuselage part Commercial aircraft blank blue fin paint scheme Luxury business jet aft body Aviation design reference“ ze služby Stock | Adobe Stock [online]. [vid. 2022-03-07]. Dostupné z: https://stock.adobe.com/cz/images/modern-airplane-tail-side-view-isolated-on-blue-sky-background-passenger-jet-plane-fuselage-part-commercial-aircraft-blank-blue-fin-paint-scheme-luxury-business-jet-aft-body-aviation-design-reference/330200468?#=_
- [8] STEVENS, Ronald, Shuo CHEN a Vilas NENE. Localized radar-based hold line surveillance at runways. In: 2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC): 2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC) [online]. St. Petersburg, FL: IEEE, 2017, s. 1–9 [vid. 2022-03-07]. ISBN 978-1-5386-0365-9. Dostupné z: doi:10.1109/DASC.2017.8102022
- [9] META, S a M G CINSIKICI. Vehicle-Classification Algorithm Based on Component Analysis for Single-Loop Inductive Detector. IEEE Transactions on Vehicular Technology [online]. 2010, **59**(6), 2795–2805. ISSN 0018-9545, 1939-9359. Dostupné z: doi:10.1109/TVT.2010.2049756

- [10] GAO, Haibin, Michael WEINMANN, Constanze STOCKHAMMER, Grammalidis NIKOS, Ioannis GRAGOPOULOS, Kosmas DIMITROPOULOS, Thomas HEUER a U. HARTMANN. ISMAEL - Intelligent Surveillance and Management for Airfield Applications Based on Low Cost Magnetic Field Detectors. In: [online]. 2005. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/311065646_ISMAEL_-_Intelligent_Surveillance_and_Management_for_Airfield_Applications_Based_on_Low_Cost_Magnetic_Field_Detectors
- [11] BURIÁN, Petr. Identifikace pohybů na letištní ploše. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Letecký ústav.
- [12] EUROCONTROL. Specification for Advanced-Surface Movement Guidance and Control System (A-SMGCS) Services Edition 2.0 [online]. 2020. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-04/eurocontrol-specification-a-smgcs-v-2-0.pdf>
- [13] PLENINGER, Stanislav. A-SMGCS_2.5. 2015. Výuková prezentace z předmětu 21CNSY - České vysoké učení technické v Praze. Fakulta dopravní. Ústav letecké dopravy
- [14] PLENINGER, Stanislav. 9psr_v1.2_zlt. 2018. Výuková prezentace z předmětu 21ZLS - České vysoké učení technické v Praze. Fakulta dopravní. Ústav letecké dopravy
- [15] LUKIN, Konstantin a Galati GASPARE. Novel Concepts for Surface Movement Radar Design [online]. 2008. Dostupné z: https://art.torvergata.it/retrieve/handle/2108/34761/511117/Novel_concepts_for_surface_movement_radar_design-Esav08.pdf. Capri, Italy
- [16] KONCHENKO, Inna M. a Felix J. YANOVSKY. INFLUENCE OF MULTILATERATION SURVEILLANCE SYSTEM ARRANGEMENT ON THE TARGET LOCALIZATION. Proceedings of National Aviation University [online]. 2009, **41**(4), 29–32. ISSN 2306-1472, 1813-1166. Dostupné z: doi:10.18372/2306-1472.41.1791
- [17] PLENINGER, Stanislav. MLAT_1.8. 2019. Výuková prezentace z předmětu 21CNSY - České vysoké učení technické v Praze. Fakulta dopravní. Ústav letecké dopravy
- [18] IVAN A. MANTILLA-G., JUAN V. BALBASTRE-T., GASPARE GALATI, a MAURO LEONARDI. Improvement of Multilateration (MLAT) Accuracy and Convergence for Airport Surveillance [online]. Valencie, 2011. Elías de los Reyes Instituto ITACA Universidad Politécnica de Valencia, Radar and Navigation LaboratoryTor Vergata University. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/239949415_Improvement_of_MultilaterationMLAT_Accuracy_and_Convergence_for_Airport_Surveillance
- [19] XINXIN, Pei a Huang ZHIGANG. Research on the Relationship between DOP and the Number of Stations for Multilateration System [online]. Beijing, China. School of Electronic Engineering Information Beihang University. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5689692>

- [20] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Multilateration Systems Implementations [online]. Dostupné z: https://www.icao.int/Meetings/AMC/MA/2007/surv_semi/Day02_SENSIS_deLutio.pdf
- [21] EUROCAE. ED-117 - MOPS for Mode S Multilateration Systems for Use in Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS). 2003
- [22] EUROCAE. ED-117A - MOPS for Mode S Multilateration Systems for Use in Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS). 2016
- [23] PANDA, Miroslav. Mapování zátěže palubních odpovídačů SSR v prostou ČR [online]. Praha, 2022 [vid. 2022-03-03]. Fakulta dopravní ČVUT v Praze. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/99005>
- [24] ICAO. Overview of Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) Out [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2021/ADSB/P01-OverviewADSBOut-ENG.pdf>
- [25] Ins and Outs [online]. [vid. 2022-03-03]. Dostupné z: https://www.faa.gov/nextgen/equipadsb/capabilities/ins_outs/
- [26] Unleashing the future potential of ADS-B technology. Thales Aerospace Blog [online]. 4. říjen 2018 [vid. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://onboard.thalesgroup.com/unleashing-future-potential-ads-b-technology/>
- [27] Automatic Dependent Surveillance – Broadcast. ADS-B [online]. [vid. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://ads-b-europe.eu/>
- [28] RTCA. December-2020-PMC-Master-Post [online]. 2020. Dostupné z: <https://www.rtca.org/wp-content/uploads/2020/12/December-2020-PMC-Master-Post.pdf>
- [29] ALEJANDRO RODRIGUEZ. Differences of ADS-B Version 0, 1, and 2 [online]. B.m.: FAA Office of International Affairs. 2018. Dostupné z: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2018/ADSB/P01-FAA-Agendaltem3.pdf>
- [30] EUROCONTROL. EUROCONTROL STANDARD DOCUMENT FOR RADAR DATA EXCHANGE Part 1 All Purpose Structured Eurocontrol Radar Information Exchange (ASTERIX) [online]. 1997. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-04/asterix-part1-structure-v1.0-111997.pdf>
- [31] All-purpose structured EUROCONTROL surveillance information exchange [online]. [vid. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/asterix>
- [32] EUROCONTROL. EUROCONTROL Specification for Surveillance Data Exchange ASTERIX Part 12 Category 021 ADS-B Target Reports Edition 2.6

[online]. 2021. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-12/asterix-adsbtr-cat021-part12-v2-6.pdf>

- [33] EUROCONTROL. EUROCONTROL STANDARD DOCUMENT FOR SURVEILLANCE DATA EXCHANGE Part 7: Category 010 Transmission of Monosensor Surface Movement Data Edition 1.1 [online]. 2007. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/service/content/documents/nm/asterix/cat010-asterix-monoradar-surface-movement-data-part-7.pdf>
- [34] EUROCONTROL. EUROCONTROL Specification for Surveillance Data Exchange ASTERIX Part 14 Category 020 Multilateration Target Reports Edition 1.10 [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-03/cat020-asterix-mlt-messages-part-14-ed110.pdf>
- [35] EUROCONTROL. EUROCONTROL Specification for Surveillance Data Exchange ASTERIX Part 14 Category 020 Multilateration Target Reports Appendix A: Reserved Expansion Field Edition 1.4 [online]. 2020. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-12/appendixcat020pt14aed14.pdf>
- [36] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Advisory Circular Airworthiness Approval of Automatic Dependent Surveillance - Broadcast OUT Systems AC 20-165B [online]. 12. červenec 2015. Dostupné z: https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/ac_20-165b.pdf
- [37] SIMON, Tési. Analýza indikátorů kvality v ADS-B zprávách [online]. B.m., 2016 [vid. 2022-03-13]. Fakulta dopravní ČVUT v Praze. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/68268>
- [38] EUROCONTROL. EUROCONTROL Specification for Surveillance Data Exchange ASTERIX Part 12 Category 021 ADS-B Target Reports Appendix A: Reserved Expansion Field Edition 1.5 [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-12/appendixcat021pt12aed15.pdf>
- [39] BOEING COMMERCIAL AIRPLANES. 737 MAX Airplane Characteristics for Airport Planning REV F [online]. 2021. Dostupné z: https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/737MAX_RevF.pdf
- [40] AIRBUS S.A.S. AIRBUS A320 AIRCRAFT CHARACTERISTICS AIRPORT AND MAINTENANCE PLANNING [online]. 1. březen 2022. Dostupné z: https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2022-02/Airbus-techdata-AC_A320_0322.pdf
- [41] EUROCONTROL. EUROCONTROL Specification for Surveillance Data Exchange ASTERIX Part 8 Category 11 A-SMGCS Data Reports Edition 1.3 [online]. 2020. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-05/eurocontrol-cat011-pt8-ed1-3.pdf>

[42] BOEING COMMERCIAL AIRPLANES. 737 Airplane Characteristics for Airport Planning REV C [online]. 2021. Dostupné z: https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/737NG_REV%20C.pdf

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Riziková situace řešené problematiky [autor]	10
Obrázek 2 - Ocasní plochy letadla z pohledu uvažovaného senzoru [7]	14
Obrázek 3 - Příklad průběhu změny magnetického pole (červená křivka) při průjezdu Boeingu 737 [10]	16
Obrázek 4 – Možná závislost PDOP parametru na počtu pozemních stanic [19].....	26
Obrázek 5 - Srovnání Short a Extended Squitteru [24]	29
Obrázek 6 - Dodatečné potřebné rozměry letadel (B737-10), podklad [39]	39
Obrázek 7 - Schematické zobrazení výpočetního algoritmu [autor]	45
Obrázek 8 - Analyzované oblasti [autor (podklad Mapy Google)].....	47
Obrázek 9 - Aplikace – tvorba polygonu [autor].....	54
Obrázek 10 - Aplikace – tvorba vstupních dat - krok 1 [autor].....	56
Obrázek 11 - Aplikace – tvorba vstupních dat - krok 2 [autor].....	56
Obrázek 12 - Ukázka vstupní tabulky dat ASTERIX CAT020 [autor podle dat od ŘLP ČR].....	57
Obrázek 13 – Aplikace – výpočet a zápis výstupních dat [autor].....	58
Obrázek 14 - Vzor tabulky Heading.xlsx [autor]	59
Obrázek 15 - Příklad rozložení bodů sloužících k odhadu headingu letadel [autor (podklad Mapy Google)]	60
Obrázek 16 - Schéma aplikací určených bodů a přímek s výstupními údaji z 1 ASTERIX zprávy [autor]	63
Obrázek 17 - Záložka 4 - přepočtení souřadnic [autor]	64
Obrázek 18 - Oblasti konfidenčních elips [autor]	71

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Poloměry kružnic NIC parametru při pozemním provozu [36]	35
Tabulka 2 - Pravděpodobnosti vztahované k SIL [36]	35
Tabulka 3 - Kódování rozměrů letadel v ASTERIX zprávách u ADS-B verze 2 a vyšší [32]	37
Tabulka 4 - Vzdálenosti v_c u vybraných typů letadel [autor]	40
Tabulka 5 – Časy a počty analyzovaných ASTERIX zpráv [autor]	46
Tabulka 6 - Hodnoty NAC_p - všichni výrobci [autor].....	49
Tabulka 7 - Hodnoty NAC_p – Boeing [autor].....	49
Tabulka 8 - Hodnoty NAC_p – Airbus [autor]	50
Tabulka 9 - Hodnoty NAC_p – Pilatus [autor]	50
Tabulka 10 - Rozdíly mezi skutečnými a ADS-B rozměry u sledovaných letadel [39, 42]	70
Tabulka 11 - Pravděpodobnosti chybného výpočtu a rozdíly mezi spočtenou a reálnou vzdáleností [autor].....	75

Seznam grafů

Graf 1 - Zastoupení maximálních NACp v jednotlivých dnech [autor]	51
Graf 2 - Empirická distribuční funkce - velikost 95% konfidenční oblasti [autor].....	66
Graf 3 - EDF - 50% konfidenční elipsa [autor]	67
Graf 4 - EDF - 80% konfidenční elipsa [autor]	67
Graf 5 – Krabicový diagram - hladiny významnosti TWY E [autor].....	68
Graf 6 – Krabicový diagram - dny pozorování TWY E [autor].....	68
Graf 7 - Závislost pozorovaného rozdílu vzdáleností na tvaru vyčkávacího místa (B737-800W) [autor].....	70
Graf 8 - Závislost pozorovaného rozdílu vzdáleností na typu letadla (TWY E) [autor]	70
Graf 9 - Krabicový diagram - závislost pravděpodobnosti chybného výpočtu na vyčkávacím místě [autor].....	72
Graf 10 – Průběh závislosti pravděpodobnosti chybného výpočtu na zvolené hladině významnosti konfidenčních elips - TWY E [autor]	72

Seznam příloh

1. Komprimovaný archiv souborů obsahující nástroj pro analýzu multilateračních přehledových dat sestrojený v prostředí MATLAB R2021b (digitální forma)
 - Archiv obsahuje zkompilovanou aplikaci ve formátu exe, samotný skript ve formátu mlapp a vzorky souborů, které byly v popisovány v kapitole 8.