ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Lenka Burešová

VLIV KVALITY PŘEHLEDOVÉ INFORMACE NA MINIMA ROZSTUPŮ

Bakalářská práce

ROK ODEVZDÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

2019

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

K621 .....Ústav letecké dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Lenka Burešová

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – LED – Letecká doprava

Název tématu (česky): **Vliv kvality přehledové informace na minima rozstupů**

Název tématu (anglicky): Aircraft Separations Depending on Quality of Surveillance Information

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Vývoj hustoty letového provozu ve vzdušném prostoru Evropy
- Výkonnostní parametry současné používané přehledové infrastruktury
- Legislativní a předpisová základna definující požadavky na minima horizontálních rozstupů
- Metodika používaná pro stanovení minimální bezpečné separace mezi letadly ve vzduchu
- Možnosti snižování rozstupů v důsledku využití výkonnější přehledové infrastruktury

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: EUROCONTROL: Seven-Year Forecast - February 2018

EUROCAE ED-161 Safety, Performance and Interoperability Requirements Document for

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

Datum zadání bakalářské práce: **19. října 2018**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **2. prosince 2019**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

L. S.

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

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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Lenka Burešová
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....9. září 2019

Poděkování

Ráda bych těmito řádky poděkovala lidem, bez kterých by tato práce nevznikla. V první řadě patří poděkování vedoucímu mé práce Ing. Stanislavu Pleningerovi, Ph. D. za věcné připomínky a odborné rady, obětovaný čas a trpělivost v průběhu vzniku této práce.

Na dalším místě patří velké děkuji všem členům mé rodiny, kteří mě podporovali psychicky a finančně po celou dobu mého studia a respektovali veškerá rozhodnutí, která jsem učinila. Ke všemu byli velice trpěliví a přizpůsobiví mým studentským povinnostem.

Stejně důležitou roli hrál během studia můj partner, který mě psychicky podporoval a motivoval, respektoval má rozhodnutí a stál mi celou dobu studia po boku. Byl trpělivý, respektoval mé povinnosti a staral se o domácnost ve chvílích, kdy to bylo nad mé síly.

A v poslední řadě nemohu opomenout poděkování mé bývalé i současné nadřízené v zaměstnání. Obě respektovaly mé studentské povinnosti a plánovaly mi pracovní směny v souladu se školním rozvrhem a mými požadavky, i přesto, že to nebyla jejich povinnost.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla 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 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 2.prosince 2019 …….

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

VLIV KVALITY PŘEHLEDOVÉ INFORMACE NA MINIMA ROZSTUPŮ

bakalářská práce

prosinec 2019

Lenka Burešová

ABSTRAKT

Předmětem práce je snaha o určení možnosti snižování rozstupů, když uvážíme vliv kvality přehledové informace na minima rozstupů. Součástí práce jsou požadavky na přehledové systémy, včetně jejich výkonnostních parametrů, rozbor dalších možných chyb, které se podílejí na určování minim rozstupů, a průzkum historie metodologie použité při prvotním určení minim rozstupů. Dále je v této práci nastíněn koncept PBCS. Na závěr dokumentu jsou k dispozici výpočty spojené s již zmíněnou možností snížení rozstupů vzhledem k dostupným hodnotám a informacím.

KLÍČOVÁ SLOVA

minima separace, PBCS, přehledová informace, radar, radarová separace, Reichův model, rozstupy, řízení letového provozu

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Transportstion Sciences

AIRCRAFT SEPARATIONS DEPENDING ON QUALITY OF SURVEILLANCE INFORMATION

Project submitted in partial fulfilment of the bachalor's degree in Transportation Science

December 2019

Lenka Burešová

ABSTRACT

The aim of this research is to determine the possible clearance in reducing the separation considering the influence of the quality of surveillance information on the minimum separation. The thesis include requirements for surveillance systems and analysis of their performance parameters. This research is strongly bulit on errors that evolved in the separation minimums, as well as on a survey with the focus on the history of the methodology used for the initial determination of separation minimums. There is a concept of PBCS also mentioned. The findings might suggest calculations associated with the aforementioned clearance of reducing separation by giving the available values and information.

KEY WORDS

air traffic control, PBCS, radar separation, radar, Reich model, separation, separation minima, surveillance information

Obsah

Obsah 5

Seznam použitých zkratek 8

Úvod 12

1. Vývoj letecké dopravy 13

1.1 Česká republika 13

1.2 Evropa 14

1.3 Historický vývoj v Evropě 16

2. Předpisová základna 17

2.1 Požadavky dle Eurocontrol Standard Document for Radar Surveillance in En-Route Airspace and Major Terminal Areas 17

2.1.1 Obecné požadavky 17

2.1.2 Požadavky na pokrytí 18

2.1.3 Požadavky na data 18

2.1.4 Požadavky na dostupnost přehledových dat 18

2.2 Požadavky dle Radar Sensor Performance Analysis (EUROCONTROL) 19

3. Výkonnostní parametry současné používané přehledové infrastruktury 20

3.1 Výkonnostní charakteristiky pro trackovací část zpracování radarových dat 20

3.1.1 Výkonnostní charakteristiky zahájení trackování 20

3.1.2 Výkonnostní charakteristiky spojitosti trackování 20

3.1.3 Přesnost trackovacích dat 20

3.2 Výkonnostní požadavky dle EUROCONTROL Specification for ATM Surveillance System Performance 21

4. Horizontální rozstupy v minulosti 23

4.1 Historie příčných rozstupů v NAT regionu 23

4.1.1 Reichův model 25

4.2 Požadovaná cílová úroveň bezpečnosti (TLS) 27

4.3 Metodika analýzy rizik využívaná organizací EUROCONTROL 29
4.3.1 Identifikace rizika 30
4.3.2 Detekce a oprava 31
4.3.3 Validace 31
4.4 Minimální rozstupy pro systém ADS-B 32
5. Faktory podílející se na velikosti rozstupů 33
5.1 Aplikace rozstupů s podporou přehledového systému 33
5.1.1 Informace 33
5.1.2 Obnova informace 34
5.1.3 Chyba horizontální polohy během obnovy informace 38
5.2 Netechnické faktory 44
6. Koncept PBCS 48
6.1 Specifikace RCP 49
6.1.1 RCP 240 50
6.1.2 RCP 400 50
6.1.3 Doba přenosu 50
6.1.4 Kontinuita 50
6.1.5 Dostupnost 50
6.1.6 Integrita 51
6.2 Specifikace RSP 51
6.2.1 Doba přenosu 52
6.2.2 Kontinuita 52
6.2.3 Dostupnost 53
6.2.4 Integrita 53
6.3 Aplikace specifikací RCP a RSP 53
7. Analýza možnosti snižování rozstupů v souvislosti s kvalitnější přehledovou informací 54
Závěr 58
Seznam použité literatury 59

Seznam tabulek.....63

Seznam obrázků.....64

Seznam použitých zkratek

A-SMGCS	Advanced Surface Movement Guidance & Control System	pokročilý naváděcí a řídící systém pozemního pohybu
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance - Broadcast	automatický závislý přehledový systém - vysílání
ADS-C	Automatic Dependent Surveillance - Contract	automatický závislý přehledový systém - kontrakt
AIP	Aeronautical Information Publication	letecká informační příručka
AMCP	Aeronautical Mobile Communications Panel	Skupina expertů pro letecké pohyblivé komunikační spoje
ANC	Air Navigation Commission	Komise leteckého provozu
ATC	Air Traffic Control	řízení letového provozu
ATM	Air Traffic Management	uspořádání letového provozu
AWOP	All Weather Operations Panel	Skupina expertů pro lety za každého počasí
CANSO	Civil Air Navigation Services Organization	Organizace civilních letových navigačních služeb
CPDLC	Controller - Pilot Data Link Communication	spojení datovým spojem řídící - pilot
CRM	Collision Risk Model	Model nebezpečí srážky
ČR	---	Česká Republika
EASA	European Air Safety Authority	Evropský úřad pro leteckou bezpečnost
ECAC	European Civil Aviation Conference	Evropská konference civilního letecvtví
EU	European Union	Evropská unie
EUROCONTROL	European Organization for the Safety of Air Navigation	Evropská organizace pro bezpečnost letového provozu
FAA	Federal Aviation Administration	Federální letecký úřad
FANS	Future Air Navigation Systems	budoucí navigační systémy
fapfh	fatal accidents per flight hour	smrtelné nehody na letovou hodinu
FIR	Flight Information Region	letecká informační služba

FL	Flight Level	letová hladina
FOM	Flight Operations Manual	provozní příručka
ft	feet	stopa
FTprob	false track probability	pravděpodobnost chybného tracku
GNE	Gross Navigation Error	hrubá navigační chyba
GNSS	Global Navigation Satellite System	globální družicový polohový systém
GOLD	Global Operational Data Link Manual	globální provozní manuál datového spojení
GPS	Global Positioning System	globální polohový systém
GTr	ghost track rate	---
HF	High Frequency	vysoká frekvence
HMI	Human – Machine Interface	rozhraní člověk - stroj
IATA	International Air Transport Association	Mezinárodní sdružení leteckých dopravců
ICAO	International Civil Aviation Organization	Mezinárodní corganizace civilního letectví
ID	Identification	identifikace
IFR	Instrument Flight Rules	let podle přístrojů
kt	knott	uzel
LNS	---	letecké navigační služby
LORAN	Long Range Air Navigation System	dálkový hyperbolický radionavigační systém
MD	---	Ministerstvo dopravy
MLAT	Multilateration	multilaterační systém
MNPS	Minimum Navigation Performance Specifications	specifikace minimální navigační výkonnosti
NAT	North Atlantic region	oblast severního Atlantiku
NAT SPG	North Atlantic Systems Planning Group	Plánovací skupina pro systémy v severním Atlantiku
NIC	Navigational Integrity Category	kategorie navigační integrity
NM	Nautical Mile	námořní míle
NOTAM	Notice To Airmen	oznámení pro letecký personál
NUC	Navigation Uncertainty Category	kategorie nejistoty navigace

OPLINKP	Operational Data Link Panel	Skupina expertů operačního datového spoje
OTS	Oceanic Track System	oceánský systém tratí
PBCS	Performance-based Communication and Surveillance	komunikace a přehled založený na výkonnosti
pfh	per flight hour	za letovou hodinu
PSR	Primary Surveillance Radar	primární přehledový radar
RCP	Required Communication Performance specification	specifikace požadované komunikační výkonnosti
RF	Radio Frequency	rádiový kmitočet
RGCSP	Panel on Review of General Concept of Separation	Skupina expertů pro všeobecnou koncepci rozstupů
RMS	Root Mean Square	kvadratický průměr
RNP	Required Navigation Performance	předepsaná navigační výkonnost
RSP	Required Surveillance Performance specification	specifikace požadované přehledové výkonnosti
RVSM	Reduced Vertical Separation Minimum	snížené minimální vertikální rozstupy
ŘLP	---	řízení letového provozu
SATVOICE	Satellite Voice	komunikace přes satelit
SES	Single European Sky	Jednotné evropské nebe
SESAR	Single European Sky ATM Research	SES výzkum řízení letového provozu
SPI	Special Position Identification Pulse	speciální puls obsahující identifikaci pozice
SSR	Secondary Surveillance Radar	sekundární přehledový radar
STCA	Short-Term Conflict Alert	krátkodobá výstraha o konfliktní situaci
SVGM	Satellite Voice Guidance Material	předpis satelitní hladové navigace
TDr	track drop rate	track je dokončen, ale letadlo je stále v pokrytí radaru
TIDmn	track initiation delay mean	průměr zpoždění zahájení trackování

TIDsd	track initiation delay standard deviation	standartní odchylka zpoždění
TLS	Target Level of Safety	cílová úroveň bezpečnosti
TMA	Terminal Control Area	koncová řízená oblast
TSr	track swop rate	track pokračuje zprávami, které patří jinému objektu
ÚCL	---	Úřad pro civilní letectví
UTC	Coordinated Universal Time	koordinovaný světový čas
VHF	Very High Frequency	velmi vysoký kmitočet

Úvod

Letecká doprava je čím dál oblíbenějším způsobem dopravy. Umožňuje nám dopravu na dlouhé vzdálenosti během relativně krátké doby. Z tohoto důvodu je navýšení kapacity vzdušného prostoru žádoucí z hlediska vývoje letecké dopravy. Zároveň však musí být zachována úroveň bezpečnosti, případně být ještě povýšena na vyšší úroveň, neboť nehody v letectví jsou často smrtelné. Takovéto nehody poškozují letecký průmysl a odrazují potenciální zákazníky, což rozhodně není žádoucí. Z tohoto důvodu jsou kritéria bezpečnosti striktní.

Navýšit kapacitu vzdušného prostoru lze snížením minim rozstupů mezi letadly, která jsou závislá buď na kvalitě přehledové informace, nebo jsou dána turbulencemi v úplavu. Úkolem této práce je prozkoumat rozstupy závislé na kvalitě přehledové informace. V rámci tohoto průzkumu je cílem určit metodiku historického vzniku, faktory, které hrají svou roli v rozstupech, seznámit se s legislativními požadavky na systémy a dojít k závěru, zda existuje potenciální prostor pro snížení radarových rozstupů. Pokud bude nalezena metodika vzniku, je možné využití samotné metodiky k určení závěru ohledně prostoru pro snížení rozstupů. Pokud tato metodika nalezena nebude, bude snahou vytvořit závěr na základě dostupných informací.

1. Vývoj letecké dopravy

1.1 Česká republika

Problematika rozstupů je v letecké dopravě v posledních letech hojně diskutovaným tématem, neboť s houstnoucí dopravou narůstá i hustota provozu v dopravě letecké. Údaje o vývoji počtu pohybů letadel v posledních šesti letech, které poskytla letová informační oblast Praha (dále jen FIR Praha), jsou zpracovány níže (Tabulka 1). Za posledních šest let se zvýšil měsíční počet pohybů letadel průměrně o 30,39%. Extrapolujeme-li současný trend nárůstu provozu s ohledem na predikovaný růst provozu dle predikce EUROCONTROL, přesáhne počet pohybů letadel v červenci 2020 100 tisíc.

Tabulka 1 – Vývoj počtu pohybů letadel dle FIR Praha v letech 2013-2018

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	nárůst provozu [%]
leden	45 692	46 825	49 526	52 465	56 116	58 199	27,37
únor	42 435	43 902	46 095	51 403	51 644	54 865	29,29
březen	50 644	53 817	55 303	60 362	62 369	65 619	29,57
duben	55 378	57 783	61 274	66 495	67 482	73 010	31,84
květen	62 565	66 496	71 323	75 629	77 931	82 725	32,22
červen	68 409	72 282	76 756	80 165	83 560	88 452	29,30
červenec	74 716	76 664	83 632	87 583	89 992	97 654	30,70
srpen	73 093	74 715	81 594	87 209	89 340	95 318	30,41
září	68 353	70 673	77 625	83 868	82 006	88 910	30,07
říjen	63 615	64 487	70 546	74 742	75 454	81 019	27,36
listopad	49 080	50 689	55 912	58 657	59 522	64 345	31,10
prosinec	46 280	47 506	52 967	58 341	57 948	62 701	35,48
průměr	58 355	60 487	65 213	69 743	71 114	76 068	30,39

„V rámci členství ČR v EU patří k nejdůležitějším cílům naše řádné zapojení a zejména naplňování vizí a hodnot tzv. Jednotného evropského nebe - Single European Sky (dále jen „SES“), který je jedním z nejvýznamnějších evropských projektů v oblasti letecké dopravy. Základním principem projektu je reformovat současnou podobu poskytování letových navigačních služeb (dále jen LNS) v evropském prostředí, a to s cílem zvýšit kapacitu a propustnost vzdušného prostoru při zachování vysoké míry bezpečnosti a maximální kvality poskytovaných služeb.

MD bude i nadále velice úzce spolupracovat se svými evropskými partnery na provádění shora uvedeného konceptu, který má navíc svůj nezanedbatelný environmentální rozměr, a to prostřednictvím efektivnějšího uspořádání vzdušného prostoru, jakož i modernějších

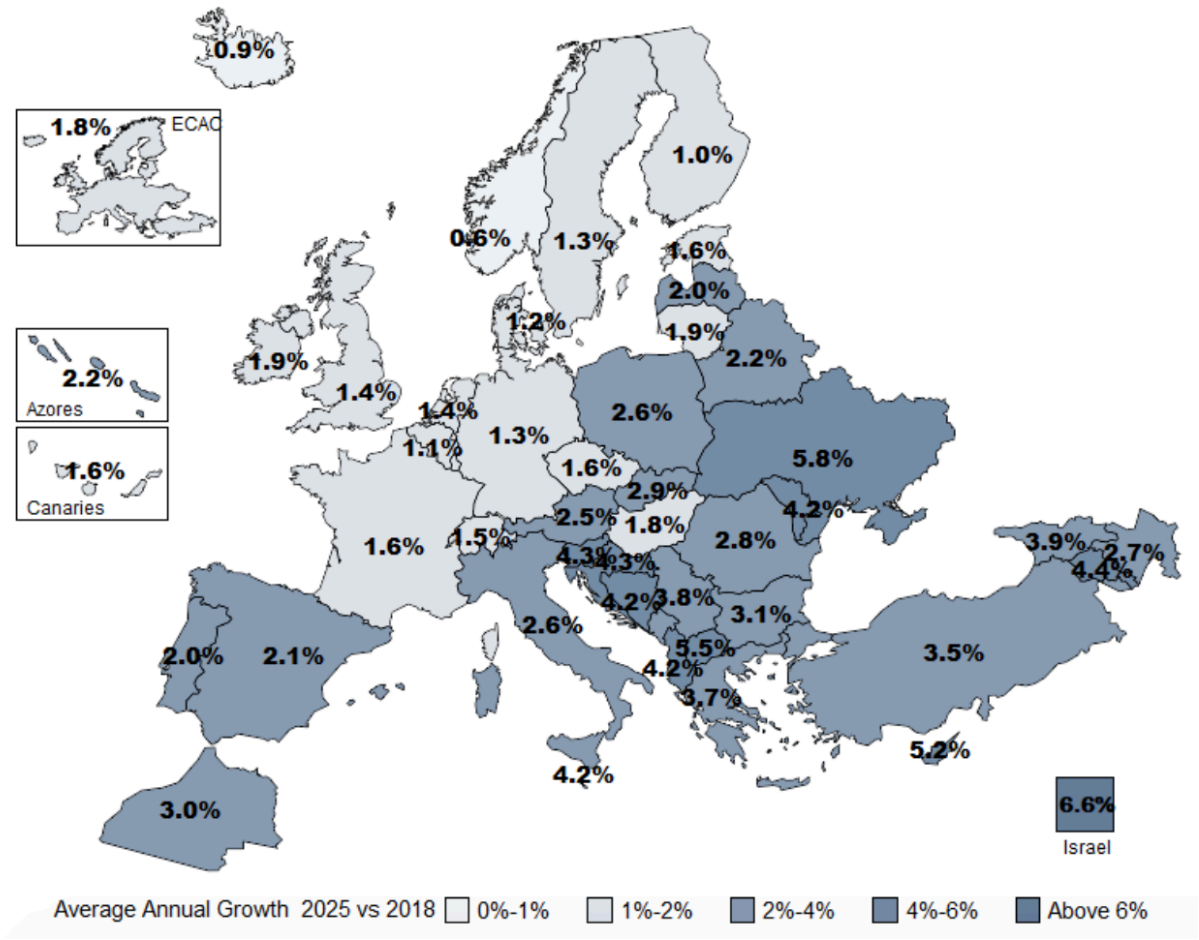
leteckých pozemních zařízení a zařízení na palubách letadel. Tyto nové technologie a postupy umožní letadlům létat po přímějších tratích, snižovat spotřebu leteckých pohonných hmot, minimalizovat vyčkávání a celkově snižovat zpoždění.“ [1]

1.2 Evropa

Problém s narůstajícím počtem pohybů letadel není pouze nad územím České republiky, ale nad celou Evropou. Jako každý rok, tak i v roce 2019, vydal EUROCONTROL sedmiletou předpověď provozu.

V období mezi roky 2018 a 2025 se nad Evropou očekává nárůst 1,8% letů každý rok. Česká republika se pohybuje lehce pod průměrem s hodnotou nárůstu 1,6% letů ročně. Nejvyšší roční přírůstek v Evropě je predikován pro Ukrajinu, naopak nejnižší pro Norsko. [2]

Znázornění ročního nárůstu provozu v Evropě pro období 2018-2025 je vyobrazeno na Obrázku 1.

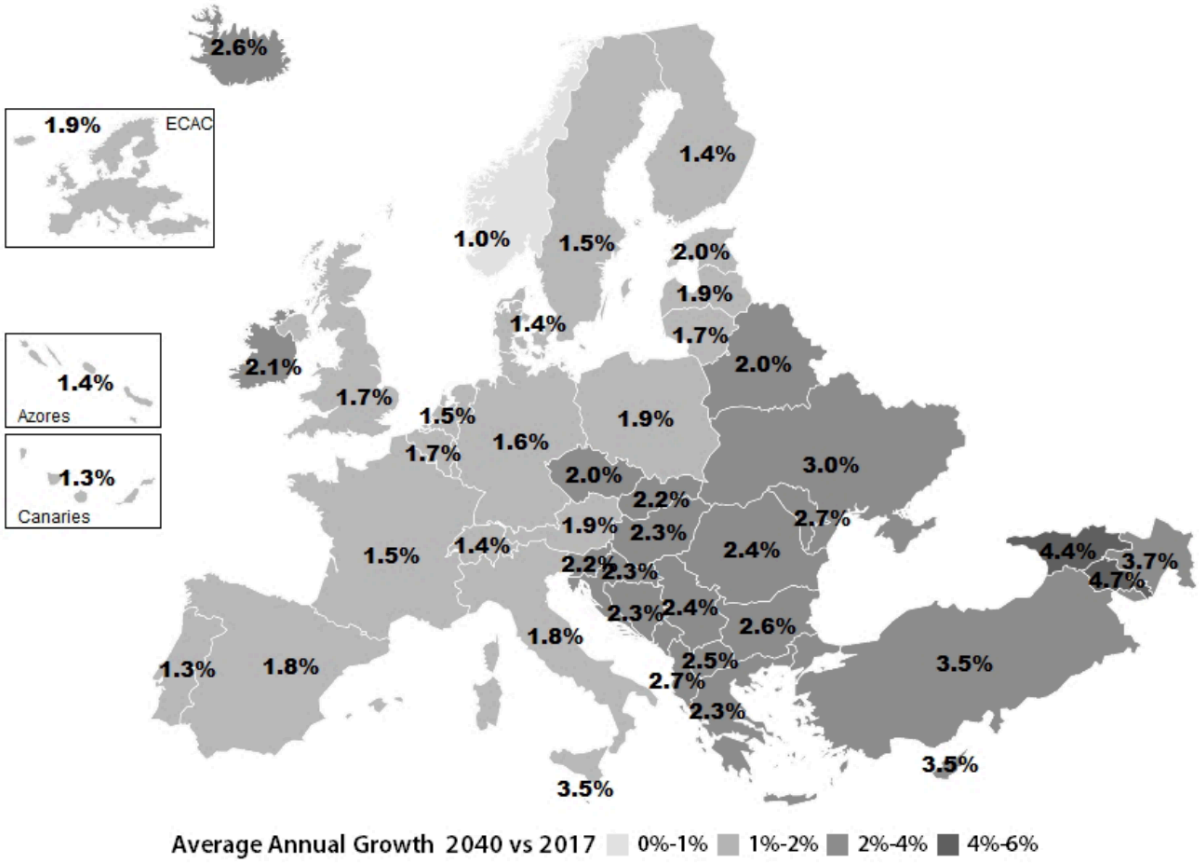


Obrázek 1 - Průměrný roční přírůstek letů na stát v letech 2018 a 2025 [2]

Kromě sedmileté predikce vydal EUROCONTROL v roce 2018 i dlouhodobou predikci do roku 2040.

Pro Evropu jako celek se odhaduje 16,2 milionů letů v roce 2040, což je o 53% více než v roce 2017. Jedná se o průměrný roční růst 1,9% během období 2017-2040. To je poněkud pomalejší tempo růstu, než před rokem 2008. Během 20 let před hospodářskou krizí se počet pohybů IFR v Evropě zdvojnásobil z 5 milionů pohybů v roce 1988 na 10 milionů pohybů v roce 2008. Zpomalení růstu v příštích letech je vysvětleno pomalejším tempem hospodářského růstu, zvyšováním cen pohonných hmot a zvyšováním přetížení na letištích. Růst provozu bude v první polovině období (2018-2030) rychlejší, než ve druhé polovině (2030-2040). Růst bude výraznější ve východní Evropě a u letů mimo Evropu než u letů v rámci Evropy. [3]

Na Obrázku 2 je kompletní přehled průměrného ročního růstu počtu IFR letů v jednotlivých státech Evropy.

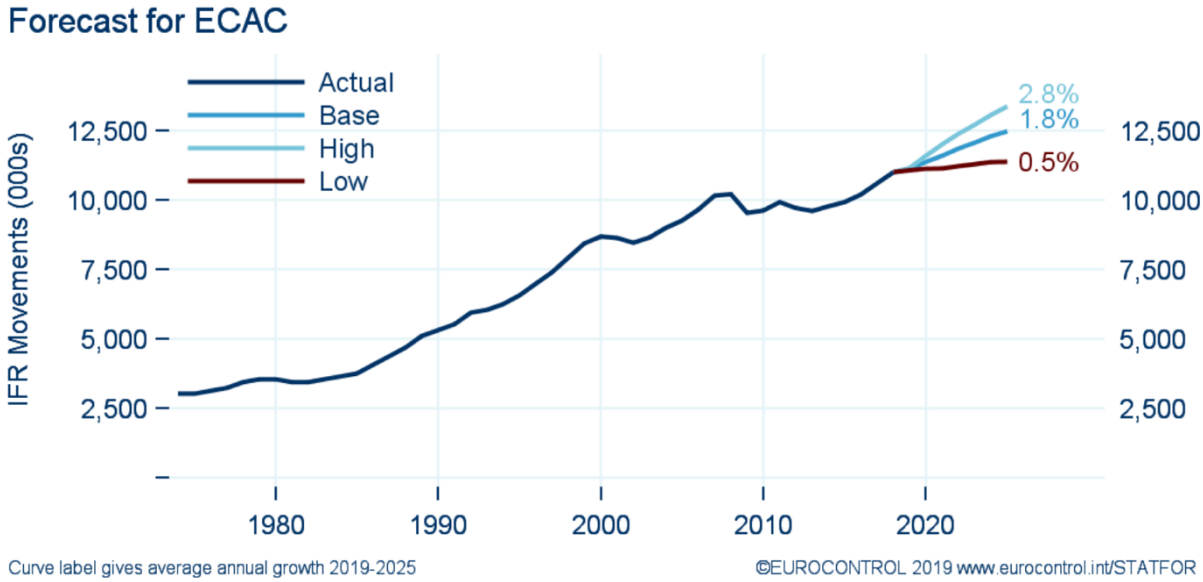


Obrázek 2 - Průměrný roční přírůstek počtu IFR letů v Evropě do roku 2040 [3]

1.3 Historický vývoj v Evropě

Je dobré poznamenat, že nárůst počtu pohybů ve vzdušném prostoru není pouze novodobým trendem, ale je patrný již přes půl století. Silnější pokles byl patrný převážně v letech 2001 a 2008.

V roce 2001 došlo k významnému teroristickému útoku ve Spojených státech amerických spojenému s únosem několika letadel. Strach se po útoku začal šířit do celého světa a poptávka po letecké dopravě poklesla. Rok 2008 je poznamenán hospodářskou krizí, která měla na leteckou dopravu také silný vliv. I přes tyto dva milníky je nárůst letecké dopravy rapidní. V roce 1960 bylo zaznamenáno 1,69 milionů letů, o 40 let později v roce 2000 to bylo již 8,68 milionů letů a v roce 2018 dokonce neuvěřitelných 11 milionů letů. Celý vývoj lze pozorovat spolu se sedmiletou prognózou vývoje na Obrázku 3.



Obrázek 3 – Nárůst IFR letů v dlouhodobém horizontu [2]

2. Předpisová základna

K zajištění stále bezpečného a ekonomického letového provozu, i přes nárůst jeho hustoty, je třeba existence právní základny na mezinárodní úrovni. Máme zde hned několik mezinárodních autorit, které se snaží o sjednocení těchto pravidel a předpisů na co možná největším území. Vzhledem k různorodosti přehledových systémů, které se využívají v různých oblastech světa s různými výkonnostními parametry, se nejedná o lehký úkol. Koordinace předpisů tak probíhá postupně v rámci několika organizací. Mezi nejvýznamnější představitele na našem území patří: International Civil Aviation Organization (ICAO), European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL), European Aviation Safety Agency (EASA), European Civil Aviation Conference (ECAC), International Air Transport Association (IATA), Civil Air Navigation Services Organization (CANSO). Pravidla pro letectví v České republice se pak řídí Ministerstvem dopravy ČR, Úřadem pro civilní letectví (ÚCL), Řízením letového provozu ČR, s. p. (ŘLP ČR, s. p.).

O propojení na území evropského kontinentu se evropské země snaží už dlouhou dobu, díky čemuž vznikl projekt Jednotné evropské nebe. Tento projekt by měl do roku 2030 zajistit ztrojnásobení kapacity vzdušného prostoru, zvýšit bezpečnost letecké dopravy, snížit náklady na službu řízení letového provozu a snížit negativní dopad na životní prostředí. Cílem je také unifikace norem a postupů přehledových služeb. V roce 2011 vstoupilo v platnost Prováděcí nařízení Komise (EU) č. 1207/2011 [19], kterým se stanovují požadavky na výkonnost a interoperabilitu přehledové infrastruktury v Jednotném evropském nebi [20], v jehož souladu jsou níže uvedené dokumenty.

Před legislativou SES byla problematika rozstupů řešena prostřednictvím dokumentu Eurocontrol Standard Document for Radar Surveillance in En-Route Airspace and Major Terminal Areas, který vydal EUROCONTROL v roce 1997.

2.1 Požadavky dle Eurocontrol Standard Document for Radar Surveillance in En-Route Airspace and Major Terminal Areas

Kapitola 2.1 je čerpána z dokumentu [4], který vznikl na základě dokumentu [5].

2.1.1 Obecné požadavky

a) nově instalované sekundární přehledové radary (SSR) nebo ty, které nahrazují starší zařízení, musí být monopulzního typu a musí umožňovat povýšení do funkce rozšířené úrovně módu S (Enhanced Surveillance) [5]

b) je vyžadováno bezchybné přiřazování kódů módu A dle ICAO Regional Plan [5]

c) transpordéry SSR v letadlech musí splňovat požadavky uvedené v ICAO Annex 10 [5]

d) všechna radarová data musí mít označení koordinovaným světovým časem (UTC) podle ICAO Annex 5 [5]

2.1.2 Požadavky na pokrytí

Poskytovatel letových navigačních služeb musí mít velmi kvalitní a spolehlivé pokrytí, aby byly dodrženy horizontální rozestupy 3 NM v „Major Terminal Areas“ (hlavních koncových oblastech), 5 NM v En-Route Airspace (na trati) a 10 NM v oblastech s méně spolehlivým pokrytím. [5]

V Major Terminal Areas je požadováno dvojité pokrytí SSR a jedním PSR, a dále musí být zajištěno dostatečné pokrytí ve všech letových hladinách. [5]

V En-Route Airspace je požadováno dvojité radarové pokrytí a horizontální přesah radaru musí být minimálně 30 NM za oblast odpovědnosti. Výjimku lze udělit z důvodu geofyzikálních podmínek. [5]

2.1.3 Požadavky na data

Přesnost pozice letadla z radarových dat musí být v kvadratickém průměru menší nebo rovna 500 metrů pro letové trasy a menší nebo rovna 300 metrů pro hlavní provozně zatížené koncové oblasti. Obnova dat musí probíhat každých 8 sekund pro oblastní použití a 5 sekund pro oblast TMA. Využití extrapolace je možná pouze u dvou po sobě jdoucích dat a nelze použít u dat módu C.

2.1.4 Požadavky na dostupnost přehledových dat

Pro úplná data[1] je požadována dostupnost minimálně 0,995, pro nezbytná[2] data 0,99999. Pro PSR v oblasti přiblížení nesmí být dostupnost méně než 0,995. Data z radarů je třeba zálohovat po dobu 30 dní.

---

[1] Úplná data zahrnují nezbytná data[2], rychlost vůči zemi a status tracku.

[2] Nezbytná data jsou horizontální pozice letadla a jeho historie, vertikální pozice letadla, identifikace letadla, identifikace speciálních kódů módu A (7700, 7600, 7500).

2.2 Požadavky dle Radar Sensor Performance Analysis (EUROCONTROL)

Požadavky na radarové sensory dle dokumentu Radar Sensor Performance Analysis jsou uvedeny v Tabulce 2.

Tabulka 2 – Požadavky na jednotlivé chyby přehledových informací [6]

pravděpodobnost detekce polohy cíle	＞97%
podíl detekce chybného hlášení o cíli	＜0,1%
podíl detekce vícenásobného hlášení cíle	＜0,3%
podíl detekce vícenásobného hlášení cíle od odrazů	＜0,2%
podíl detekce vícenásobného hlášení cíle z postranních laloků	＜0,1%
podíl detekce vícenásobného hlášení cíle ze štěpů	＜0,1%
pravděpodobnost detekce kódu módu A	＞98%
pravděpodobnost detekce kódu módu C	＞96%
systematická chyba	
chyba šikmé vzdálenosti	＜100 m
chyba nárůstu šikmé vzdálenosti	＜1 m/NM
chyba časové značky	＜100 ms
chyba azimutu	＜0,1°
náhodné chyby	
standardní odchylka chyby šikmé vzdálenosti	＜70 m
standardní odchylka chyby azimutu	＜0,08°
skoky	
polohová chyba v azimutu	＞1°
polohová chyba v dálce	＞700 m
poměr skoků	＜0,05%
podíl nesprávných kódů	＜0,2%
podíl ověřených nesprávných kódů módu A	＜0,1%
podíl ověřených nesprávných kódů módu C	＜0,1%
maximální čas výpadku radarového senzoru v jednom kuse	≦4 h
maximální roční čas výpadku radarového senzoru	≦10 h/rok

3. Výkonnostní parametry současné používané přehledové infrastruktury

Kapitola 3 je zpracována na základě dokumentu [4].

3.1 Výkonnostní charakteristiky pro trackovací část zpracování radarových dat

Výkonnostní charakteristiky pro trackování radarových dat můžeme rozdělit do tří kategorií – – charakteristiky zahájení trackování, charakteristiky spojitosti trackování a charakteristiky přesnosti trackovacích dat.

3.1.1 Výkonnostní charakteristiky zahájení trackování

- TIDmn – track initiation delay mean [7] – průměr zpoždění zahájení trackování – čas (v sekundách) nebo počet skenů (ve skenech) mezi prvním přijetím hlášení trackerem a prvním okamžikem, kdy je dostupný trackovací vektor na výstupu
- TIDsd – track initiation delay standard deviation [7] – standardní odchylka zpoždění – – opět v sekundách nebo skenech
- FTprob – false track probability [7] – pravděpodobnost chybného tracku

3.1.2 Výkonnostní charakteristiky spojitosti trackování

- TDr – track drop rate – track je ukončen, ale objekt je stále v pokrytí radaru
- TSr – track swop rate – track pokračuje zprávami, které patří jinému objektu
- GTr – ghost track rate – u PSR
- průměrná délka chybného tracku
- směrodatná odchylka délky chybného tracku

3.1.3 Přesnost trackovacích dat

Přesnost trackovacích dat se určuje pro rychlost letadla vůči zemi, jeho pozici, kurz a vertikální rychlost. Výpadek trackerů nesmí být v kuse delší než 10 minut a v ročním součtu nesmí překročit 9 hodin.

3.2 Výkonnostní požadavky dle EUROCONTROL Specification for ATM Surveillance System Performance

V roce 2012 vydala organizace EUROCONTROL dokument pod názvem Specification for ATM Surveillance System Performance, který zahrnuje výkonnostní požadavky na kooperativní přehledové systémy.

Tabulka 3 – Výkonnostní požadavky pro rozstupy 3 NM [4]

	3 NM - povinné	3 NM - doporučené
pravděpodobnost obnovení horizontální polohy	≧ 97% pro 100% letů	≧ 97% pro 100% letů
poměr ztracných 3D poloh v gapech > 26,4 s	< 0,5 %	
chyba horizontální polohy	≦330 m pro 100% letů	≦ 210 m celkově a 230 m pro let
pravděpodobnost obnovení nadmořské výšky založené na tlaku	≧ 96% celkově	
průměrné stáří dat s nadmořskou výškou založenou na tlaku	≦2,5 s	
poměr nesprávných dat o nadmořské výšce založené na tlaku	≦0,1%	
neoznačená chyba nadmořské výšky založené na tlaku	≦200/300 ft v 99,9% pro ustálený let a v 98,5% pro stoupání a klesání	
zpoždění změny indkátoru mimořádných událostí a SPI	≦7,5 s pro 100% letů	
zpoždění změny identifikace letounu	≦15 s pro 100% letů	
pravděpodobnost správné hodnoty při obnovení identifikace letounu	≧ 98% celkově	≧ 96% pro let
poměr chybné identifikace letounu	≦ 0,1%	
střední kvadratická chyba stoupání/klesání		≦250 ft pro ustálené lety a 500 ft pro klesání a stoupání
střední kvadratická chyba traťové rychlosti		≦4 m/s pro přímý let a 8 m/s pro zatáčku
střední kvadratická chyba úhlu traťové rychlosti		≦10° pro přímý let a 25° pro zatáčku
hustota nekorelovaných nesprávných hlášení o cíli		≦ 2 chybná hlášení pro oblast 100 NM^2 a v trvání 720 intervalů
počet chybných tratí blízko skutečným tratím		≦1/h (blíže než 9 NM od skutečné trati)
kontinuita		≦ $2{,}5 * 10^{-5}$ za hodinu

Tabulka 4 - Výkonnostní požadavky pro rozstupy 5 NM [4]

	5 NM - povinné	5 NM - doporučené
pravděpodobnost obnovení horizontální polohy	≧ 97% pro 100% letů	≧ 97% pro 100% letů
poměr ztracných 3D poloh v gapech > 26,4 s	< 0,5 %	
chyba horizontální polohy	≦550 m pro 100% letů	≦ 350 m celkově a 385 m pro let
pravděpodobnost obnovení nadmořské výšky založené na tlaku	≧ 96% celkově	
průměrné stáří dat s nadmořskou výškou založenou na tlaku	≦4 s	
poměr nesprávných dat o nadmořské výšce založené na tlaku	≦0,1%	
neoznačená chyba nadmořské výšky založené na tlaku	≦200/300 ft v 99,9% pro ustálený let a v 98,5% pro stoupání a klesání	
zpoždění změny indkátoru mimořádných událostí a SPI	≦12 s pro 100% letů	
zpoždění změny identifikace letounu	≦24 s pro 100% letů	
pravděpodobnost správné hodnoty při obnovení identifikace letounu	≧ 98% celkově	≧ 96% pro let
poměr chybné identifikace letounu	≦ 0,1%	
střední kvadratická chyba stoupání/klesání		≦250 ft pro ustálené lety a 500 ft pro klesání a stoupání
střední kvadratická chyba traťové rychlosti		≦4 m/s pro přímý let a 8 m/s pro zatáčku
střední kvadratická chyba úhlu traťové rychlosti		≦10° pro přímý let a 25° pro zatáčku
hustota nekorelovaných nesprávných hlášení o cíli		≦10 chybných hlášení pro oblast 900 NM^2 a v trvání 450 intervalů
počet chybných tratí blízko skutečným tratím		≦2/h (blíže než 7 NM od skutečné trati)
kontinuita		≦ $2{,}5 * 10^{-5}$ za hodinu

4. Horizontální rozstupy v minulosti

Vše má svou historii, stejně tomu tak musí být i u rozstupů. Při rešerši k této práci však k žádným konkrétním postupům, které by vedly k vysvětlení, proč byl horizontální rozstup nastaven zrovna na 3 NM, 5 NM a 10 NM, nebyly nalezeny. S výjimkou standardů oceánské separace, standardů separace pro provoz s paralelními drahami a snížených vertikálních separací se přitom standardy historicky nezměnily [21].

V roce 1997 vyšel dokument s názvem *Terminal Area Separation Standards: Historical Development, Current Standards, and Processes for Change* [14], který říká, že dané standardy radarové separace byly stanoveny na základě přesnosti radaru, velikosti cílové obrazovky a spolehlivosti řídícího a pilota. Avšak dokumentace s konkrétní analýzou vedoucí k těmto standardům nebyla nalezena ani autory tohoto dokumentu. Taktéž Rockman [15] uvedl, že se jemu, ani dalším pozorovatelům nezdá, že by existoval přesný důvod pro hodnoty 3 NM a 5 NM. Nepublikovaná studie FAA ze začátku 70. let ve skutečnosti tvrdí, že pro radarová minima neexistuje žádné zdůvodnění [14]. V dalších kapitolách tedy počítáme s tím, že k těmto standardům nevede žádná konkrétní analýza a hodnoty byly nastaveny experimentálně na základě expertního odhadu. Metody uvedené níže tedy slouží pouze k ověření správnosti nastavených hodnot. V této oblasti je klíčová práce (tři dokumenty) pana Reiche z roku 1966 o modelování kolizních rizik a standardech separace, o níž bude ještě zmínka v kapitole 4.1.

4.1 Historie příčných rozstupů v NAT regionu

Kapitola 4.1 je vypracována na základě informací z ICAO dokumentu Manual on Airspace Planning Methodology for the Determination of Separation Minima. [8]

V roce 1964 byla na tratích severoatlantického regionu příčná separace 120 NM, podélná separace 15 minut a vertikální separace 1000 ft pod FL 290 a 2000 ft nad FL 290. V této době bylo navrženo, aby byly příčné rozstupy sníženy na 90 NM, čímž by se navýšila kapacita vzdušného prostoru, což by mimo jiné přispělo i ke zlepšení ekonomiky. Návrh nebyl přijat z důvodu pochybností, jestli proběhla odpovídající analýza rizika kolize.

V roce 1965 založila ICAO NAT SPG (North Atlantic Systems Planning Group). Původní účel této skupiny byl provést studii příčné separace a rozvíjet rámec rozhodovacího procesu pro následnou úpravu standardů rozstupů. Během prvních setkání v letech 1966-1968 rozvinula skupina NAT SPG ve spolupráci s dalšími ICAO skupinami metodu posouzení bezpečných rozstupů letadel v rámci organizovaného systému tratí v NAT regionu (North Atlantic Tracks).

V této metodě jsou použita data posbíraná v NAT regionu, která jsou vstupy do matematického modelu zvaného Reichův model, který počítá se vztahem mezi rizikem srážky a rozstupy. Na základě dalších informací z celého světa pak NAT SPG navrhl hodnotu pro maximální přijatelné riziko kolize, známé jako cílová úroveň bezpečnosti (TLS). Porovnáním rizika kolize vypočteného pro určitý příčný rozstup s tímto TLS je možné stanovit, zda lze navrhovaný standard separace považovat za dostatečně bezpečný.

Při přezkoumání výsledků ze sběru dat v oblasti NAT zjistil NAT SPG, že ačkoliv by mohlo být zmenšení příčných rozstupů možné, malý podíl pozorovaných letadel byl odpovědný za velkou část GNE[3]. Z tohoto důvodu se snížení příčných rozstupů zdálo býti neproveditelným. V důsledku toho bylo navrženo, aby byl vytvořen vzdušný prostor se specifikací minimálního navigačního výkonu (MNPS), který by vyhovoval většinové části letadel využívajících NAT, ale vyloučil by letadla, která neodpovídají požadované úrovni.

Na jedenáctém zasedání NAT SPG v květnu 1975 v Paříži proběhla diskuze o zřízení MNPS pro letadla v OTS[4]. Protože by bylo použití leteckého navigačního systému na dlouhé vzdálenosti (LORAN) do roku 1977 drasticky omezeno, specifikace se týkala letadel používajících inerciální navigační systémy (s tím, že provozovatelé používající LORAN A by to měli při výměně vybavení vzít v úvahu). Bylo dohodnuto, že nová specifikace by byla navržena pro OTS s plánovaným příčným rozstupem 60 NM a existovala by schopnost jít do složeného systému 30 NM a 1000 ft. Dále bylo navrženo, aby byla vytvořena specifikace MNPS a byl vyvinut monitorovací program, který by ověřoval, zda byla specifikace splněna. Riziko kolize by bylo během období deseti let od okamžiku přijetí pravidelně přehodnocováno, aby bylo možné posoudit dopad parametrů výkonu systému na bezpečnost. Specifikace MNPS byla vyvinuta v roce 1975 a schválena ICAO v roce 1976. V roce 1977 vstoupila v platnost spolu s vyřazením LORAN A v oblasti NAT. Skupina matematiků NAT SPG dospěla

---

[3] GNE = gross navigation error, mezi které patří:

a) chyby systémové smyčky ATC: jakákoliv chyba způsobená nedorozuměním mezi pilotem a řídícím týkající se předpokládané letové hladiny, Machova čísla nebo trasy

b) chyby vložení trasového bodu: když pilot neúmyslně vloží do systému řízení letu nesprávný bod na trase

c) selhání vybavení: když dojde k úplné nebo částečné poruše navigačního systému, což vede ke snížení přesnosti udržování dráhy

[4] OTS = Organized Track System

však k závěru, že snížení není možné kvůli množství GNE. V roce 1980 se jim však úspěšně podařilo snížit počet GNE a do systémů tratí NAT byl naimplementován příčný rozstup 60 NM.

4.1.1 Reichův model

Kapitola 4.1.1 je vypracována na základě informací z ICAO dokumentu Manual on Airspace Planning Methodology for the Determination of Separation Minima. [8]

Reichův model je matematický model, který využívala skupina NAT SPG pro odhad rizika kolize ve vzdušném prostoru NAT MNPS. Tento model bere v úvahu riziko kolize v důsledku ztráty separace dvou letadel letících na rovnoběžných drahách.

Aby byly matematické výpočty jednodušší, tak uvažujeme letadla jako krabice tvaru kvádru s průměrnými rozměry λ_x, λ_y, λ_z. Tyto rozměry jsou brány jako průměry z délek, šířek a výšek celé populace letadel. Riziko kolize mezi dvěma takovýmito krabicemi je z matematického pohledu totožné jako riziko kolize mezi bodem a krabicí o rozměrech $2\lambda_x$, $2\lambda_y$, $2\lambda_z$. Jelikož se populace letadel mění, doporučuje se rozměry znovu odhadnout maximálně po pěti letech. V případě, že dojde ke změně celkové letové flotily, je vhodné rozměry přehodnotit hned, jak toto nastane.

Počet srážek za jednotku času je dán výrazem:

$$C = N_x P_y P_z + N_y P_x P_z + N_z P_x P_y \tag{1}$$

kde *N* představují frekvence, s jakými se separace mezi letadly zmenší pod λ (délku, šířku nebo výšku krabice, záleží, v jaké ose se nacházíme), *P* jsou pravděpodobnosti, s jakými dojde k narušení rozstupů mezi těmito letadly.

Máme relativní rychlosti našich dvou letadel *v* ve všech směrech. Jelikož jsme si již výše uvedli, že místo dvou krabic uvažujeme bod a krabici o rozměrech $2\lambda_x$, $2\lambda_y$, $2\lambda_z$, pak bude čas potřebný k tomu, aby bod projel skrz krabici $2\lambda_r/v$ (vycházíme ze základního fyzikálního vzorce $t = s/v$). Pravděpodobnost překrytí *P* v kterémkoliv okamžiku v čase se rovná průměrnému času překrytí. To je:

P = frekvence ∗ průměrná doba překrytí / jednotka času

Za jednotku času se považuje jedna hodina, rozměry jsou měřeny v námořních mílích a relativní rychlosti v uzlech. Pak pro každý směr platí:

$$P = \frac{N*2\lambda}{v} \longrightarrow N = \frac{P*v}{2\lambda} \tag{2}$$

Protože kolize je možná v každém směru (podélný, příčný, vertikální), tak celkový počet kolizí musí být součtem jednotlivých kolizí ve všech směrech. Počet kolizí *C* tedy závisí na pravděpodobnosti porušení rozstupů v každém směru, rychlostech a rozměrech. Matematicky jej lze vyjádřit jako:

$$C = P_x P_y P_z \left[\frac{v_x}{2\lambda_x} + \frac{v_y}{2\lambda_y} + \frac{v_z}{2\lambda_z}\right] \tag{3}$$

Pravděpodobnost podélného překrytí P_x navíc závisí na intenzitě provozu v systému. Pokud je počet letadel ve vzdálenosti S_x od sebe označen *E*, pak:

$$P_x = \frac{E * \lambda_x}{S_x} \tag{4}$$

E je známé jako obsazenost systému a poskytuje míru hustoty provozu. Kolize může nastat mezi letadly letícími stejným směrem, nebo ve směru opačném. V takovém případě by relativní podélné rychlosti byly různé, řekněme $v_x(s)$ a $v_x(o)$, stejně tak *E(s)* a *E(o)*, kde *„s“* představuje stejný směr a *„o“* směr opačný. P_y je pravděpodobnost příčného překrytí, tj. pravděpodobnost, že jakákoliv dvě letadla, která mají mít určitý příčný rozstup, jej nemají. P_z je pravděpodobnost vertikálního překrytí, tj. pravděpodobnost, že dvě letadla nominálně na stejné hladině jsou ve vertikálním překrytí.

Rovnice pro riziko příčné kolize pak vypadá následovně:

$$C = P_y P_z \frac{\lambda_x}{S_x}\left\{E(s)\left[\frac{v_x(s)}{2\lambda_x} + \frac{v_y}{2\lambda_y} + \frac{v_z}{2\lambda_z}\right] + E(o)\left[\frac{v_x(o)}{2\lambda_x} + \frac{v_y}{2\lambda_y} + \frac{v_z}{2\lambda_z}\right]\right\} \tag{5}$$

kde *C* měří očekávaný počet smrtelných nehod na letovou hodinu letadla. Kromě P_y, *E(s)* a *E(o)* jsou všechny parametry výše uvedené rovnice v průběhu času víceméně stabilní. Tabulka 5 uvádí odhady hodnot parametrů pro riziko střetu při minimálním příčném rozstupu 60 NM. Tyto hodnoty se vztahují na parametry používané v roce 1995. Parametry P_y, E_s a E_o se mění v čase a v oblasti NAT se pravidelně měří.

Obsazenost systému (*E(s)* a *E(o)*) se odhaduje z údajů letového plánu pro soubor vzorových dnů v průběhu celého roku. Pravděpodobnost příčného překrytí (P_y) se odhaduje z ATC pozorovaných GNE z nepřetržitě monitorovaných oblastí vzdušného prostoru na východní a západní hranici oceánu. Je tomu tak proto, že lze předpokládat, že informace jsou u většiny oceánů ve vnějším radarovém pokrytí úplné (ačkoliv lze zaznamenat odchylky od dráhy, která se vyskytuje pak nad středním oceánem).

Tabulka 5 – Hodnoty použité pro parametry příčného rizika kolize v roce 1995 [8]

PARAMETR	ODHADOVANÁ HODNOTA
S_y	60 NM
S_x	120 NM (15 min)
P_z	0,39
λ_x	0,0306 NM
λ_y	0,0272 NM
λ_z	0,0086 NM
$v_x(s)$	13 kt
$v_x(o)$	960 kt
v_y	80 kt
v_z	1,5 kt

Při vývoji Reichova modelu se původně předpokládalo, že data shromážděná z částí vzorku byla reprezentativní pro zbytek vzdušného prostoru. Pravděpodobnost příčného překrytí byla tedy odhadnuta přímo z pozorovaného rozdělení odchylek. To znamená, že rozdělení odchylek měřených na hranici bylo považováno za naprosto totožné s rozdělením naměřených odchylek v kterémkoliv jiném bodě nad oceánem. Tento přístup byl znám jako Model 1. Protože však bylo shromážděno více informací, mělo se za to, že rozdělení odchylek pozorovaných na hranici pravděpodobně nebude představovat skutečné rozdělení. Aby tedy byla pravděpodobnost příčného překrytí přesnější, byly některé odchylky pozorovány, což mělo napomoci zpřesnění rozdělení. Tento přístup se stal známý jako Model 2.

Jakmile jsou hodnoty dostupné pro každý z parametrů, lze je vložit do modelu rizika kolize a získat tak odhad rizika kolize. Pro budoucí systémy lze použít odhadované hodnoty obsazenosti, hustoty provozu atd. Po výpočtu rizika systému je možné jej porovnat s cílovou úrovní bezpečnosti, aby se určilo, zda systém pravděpodobně splní bezpečnostní požadavky. Toto cvičení se provádí pro NAT každý měsíc a výsledky jsou každoročně přezkoumávány skupinou NAT SPG.

4.2 Požadovaná cílová úroveň bezpečnosti (TLS)

Jedná se o charakteristiku systému, která souvisí s bezpečností v letectví. Návrháři by měli během plánování a návrhu systému s touto hodnotou počítat a systém navrhnout tak, aby tuto hodnotu splnil během skutečného provozu. Tato charakteristika se používá již od konce 50. let 20. století, kdy byl koncept TLS poprvé uplatněn při schvalování automatického přistávacího

systému. Každá hodnota TLS byla vyvinuta pro konkrétní letovou podmínku pomocí konkrétního matematického modelu a konkrétních dat se specifickými předpoklady. Při vývoji hodnoty TLS je třeba uvažovat o tom, že musí souviset s mírou nehod v minulosti, musí být nezávislá na rychlosti provozu a v souladu s celosvětově platnými letovými předpisy. V zásadě existují dva typy TLS pro leteckou dopravu – celkové TLS a TLS pro specifické operace ve vzdušném prostoru. [13]

Jedním ze způsobů, jak rozpočítat riziko srážky, je roztřídit celý letový proces do devíti provozních fází – stání (vč. pojíždění, nakládání), vzlet, počáteční stoupání, stoupání, traťový let, sestup, počáteční přiblížení, konečné přiblížení a přistání. Jak již bylo zmíněno výše, TLS bylo poprvé uplatněno při schvalování automatického přistávacího systému. Tehdy také vznikla hodnota TLS pro přistání, která činí 1 nehodu na 10 milionů přistání. Všechny hodnoty TLS pro všechny provozní části letu jsou uvedeny v Tabulce 6. [13]

Tabulka 6 – Přehled doporučených TLS pro každou fázi letu na let/letovou hodinu [13]

FÁZE LETU	POJÍŽDĚNÍ	VZLET	POČÁTEČNÍ STOUPÁNÍ	STOUPÁNÍ	TRAŤOVÝ LET
TLS	$1x10^{-8}$	$1x10^{-8}$	$1x10^{-8}$	$1x10^{-8}$	$5x10^{-8}$ p.f.h.
FÁZE LETU	**KLESÁNÍ**	**POČÁTEČNÍ PŘIBLÍŽENÍ**	**KONEČNÉ PŘIBLÍŽENÍ**	**PŘISTÁNÍ**	**CELKOVÉ**
TLS	$1x10^{-8}$	$1x10^{-8}$	$1x10^{-8}$	$1x10^{-8}$	$1,8x10^{-7}$ p.m. ($1x10^{-7}$ p.f.h.)

Hodnoty TLS se v průběhu let výrazně mění a jsou velice různorodé. Například NAT SPG v letech 1966-1968 používala hodnotu $2,34x10^{-6}$ per flight hour, RGCSP[5] v roce 1985 $6,3\ x10^{-7}$ per flight hour [22], Howard [23] v roce 1992 hodnotu $1\ x\ 10^{-7}$ per flight hour, Cassell & Mith [24] v roce 1995 hodnotu $1,5x10^{-6}$ per mission a ICAO v dokumentu All Weather Panel [25] z roku 1997 uvedlo hodnotu $1x10^{-7}$ per mission. V současné době se počítá s TLS pro smrtelné nehody, které je nastaveno na hodnotu $5x10^{-9}$ fapfh (fatal accidents per flight hour) [8].

[5] RGCSP = Review of the General Concept of Separation Panel

4.3 Metodika analýzy rizik využívaná organizací EUROCONTROL

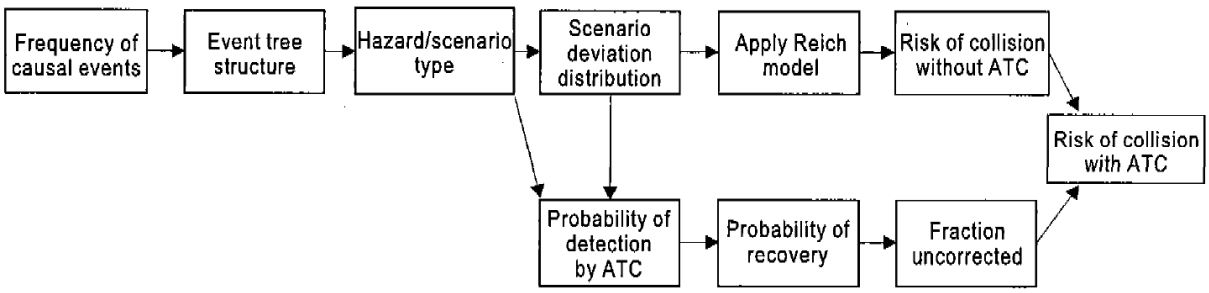
Kapitoly 4.3, 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 jsou vypracovány na základě informací z ICAO dokumentu Manual on Airspace Planning Methodology for the Determination of Separation Minima.[8]

V předchozí kapitole jsme si rozebrali metodiku modelování rizika kolize, když bereme v úvahu výkonnost přehledových systémů, hustotu provozu a cílovou úroveň bezpečnosti, bez možnosti zásahu ATC. Tato metodika byla vyvinuta pro region NAT. Pro Evropský vzdušný prostor byly standardy rozstupů vyvinuty ještě před zavedením metodiky modelování kolizních rizik. Tyto standardy zahrnují radarový dohled, který zajišťuje monitorování možných odchylek, a přímou hlasovou komunikaci pilot-řídící. To umožňuje zásah řídícího s cílem zabránit potenciálním ztrátám rozstupů.

První studie financovaná organizací EUROCONTROL prověřila, zda bude možné použít analýzu rizik při vyvíjení minimálního rozstupu. Tato studie ukázala, že analýza rizika je slibná technika a že by byla žádoucí další práce na vývoji úplného modelu rizika kolize, včetně rizik spojených s dostupností radarového dohledu a přímé hlasové komunikace.

Analýza rizik vznikla při vývoji automatických přistávacích systémů, ale byla v podstatě dovyvinuta na základě pozitivního výsledku při její aplikaci v technologicky vyspělých odvětvích (např. vrtné práce na moři, jaderná energie). V těchto odvětvích se využívala na hodnocení rizik spojených s rolí člověka. Cílem navazující studie analýzy rizik bylo spojit konvenční modelování kolizních rizik (pomocí statistické analýzy) s podrobnými znalostmi o typech, mechanismech a četnostech výskytu odchylek způsobených chybami systému ATC. Navíc byla zohledněna schopnost využití radarového dohledu a hlasové komunikace VHF k odstranění odchylek, a tím přispět ke snížení rizika. Konečným cílem bylo vyvinout standardy příčných rozstupů na tratích pro použití v kontinentálním evropském vzdušném prostoru. Metodika použitá ve studii je přizpůsobivá a může se použít v případě potřeby i v jiných regionech nebo státech.

Celková struktura modelu rizika kolize v případě dostupnosti ATC je schematicky znázorněna na Obrázku 4.



Obrázek 4 – Struktura modelu rizika kolize [8]

Mezi hlavní prvky modelu rizika kolize patří:

a) identifikace scénářů, které mohou vést ke ztrátě rozstupů nebo možné kolizi mezi dvěma letadly

b) identifikace konkrétních nebezpečí a jejich četnost výskytu

c) výpočet pravděpodobného kolizního rizika vyplývajícího z výše uvedených scénářů za předpokladu, že odchylky mohou zůstat neopravené (Reichův model) (bez dostupnosti ATC)

d) výpočet pravděpodobnosti detekování a opravy odchylky buď pilotem, nebo ATC

e) odečtení výsledné celkové pravděpodobnosti kolize navzdory dostupnosti ATC

4.3.1 Identifikace rizika

Příklady typů chyb, o kterých je známo, že způsobují příčné odchylky, zahrnují:

a) obecná navigační schopnost a variabilita (např. databázové chyby)

b) chyba letové posádky (např. nesprávné zadání údajů)

c) chyba ATC (např. nesprávné předání sektoru)

d) nesprávná komunikace mezi ATC a pilotem (např. záměna volacího znaku)

e) administrativní a systémové chyby (např. chyby letového plánu, softwarové chyby, selhání vybavení letadla, chybný NOTAM)

I když jsou tyto chyby zaznamenávány během letu, mnohé jsou považovány za bezvýznamné a nejsou hlášeny. Ad hoc opatření v pilotní kabině bývají vyvíjena pro menší problémy. Problémem však často není individuální chyba, ale pokud se vyskytnou dvě nebo více chyb společně s jinými drobnými problémy, může dojít k významné odchylce.

4.3.2 Detekce a oprava

Důsledky odchylky a možnost, že se z ní stane nehoda, jsou určeny souborem interakcí, které lze popsat jako strom detekce a opravy.

Faktory, které jsou nedílnou součástí detekce odchylky zahrnují:

a) typ odchylky, úroveň provoz, pracovní zatížení ATC a pilota

b) zda odchylka nastane, když se očekává změna kurzu

c) zda k odchylce dochází během předání sektoru

d) schopnost mít přehledovou informaci, včetně minim radarové separace, základní přesnosti radaru, filtrování a rozlišení

Dostupnost varovných systémů, povaha displejů a komunikační systém přispívají ke změně doby detekce.

Při opravě, která následuje po detekci odchylky, jsou důležité faktory:

a) zpoždění způsobené nesprávnou identifikací letadla

b) nesprávně nasměrovaná nápravná instrukce nebo špatný opravný manévr

c) zbývající čas k nápravě

Byl vyvinut jednoduchý model odchylek, kde se určily stromy událostí spojených s jednotlivými scénáři pro každou odchylku a jejich parametry (pravděpodobnosti a časová měřítka). Tyto stromy byly použity na detekci odchylujícího se letadla řídícím, schopnost sdělit tuto skutečnost odchylujícímu se letadlu a schopnost tohoto letadla úspěšně dokončit opravný manévr. Výsledné struktury jsou velmi komplikované, a ne všechny větve stromu (potenciální odchylky) lze snadno analyzovat.

Dalšími faktory, které nebyly v této fázi zahrnuty, jsou automatizované funkce, které umožňují systému ATS předvídat a detekovat konkrétní nebezpečí a navrhovat optimální nápravu.

4.3.3 Validace

V minulosti byly provedeny různé praktické analýzy, ale je velmi obtížné identifikovat statistický vývoj odchylek způsobených jednotlivými příčinami. Analýzy provedené organizacemi ICAO a EUROCONTROL přinášejí některé výsledky v relativně jednoduchých scénářích, ve kterých byly učiněny pokusy izolovat jakékoliv účinky zásahu ATC. V tomto případě metodika

předpovídá rozdělení vyplývající ze specifických kombinací rizik, různých provozních oblastí atd. Metodika dále použije výpočet rizika, aby předpověděla výslednou míru porušení rozstupu. Výsledek je pak porovnáván s radarovými záznamy, aby se zajistilo, že zaznamenané a předpovídané hodnoty souhlasí.

Model kolizního rizika (CRM) je použit na vhodných trasách vybraných autoritami. K tomuto účelu jsou údaje o hustotě provozu, vzdušném prostoru, ve kterém se pohybujeme, a frekvence překrytí zprostředkovány a jsou využity jako vstup do modelu, který určuje požadované rozstupy při dodržení TLS.

4.4 Minimální rozstupy pro systém ADS-B

Kapitola 4.4 je vypracována na základě informací z ICAO dokumentu Manual on Airspace Planning Methodology for the Determination of Separation Minima. [8]

Model, který se využívá k určení minimálních rozstupů pro letadla se systémem ADS-B, je rozšířeným modelem originálního Reichova modelu rizika kolize. Předpokládá různé typy navigačních chyb, přičemž pro každý typ chyb má vlastní pravděpodobnost překrytí. Tento model zkoumá účinky ADS na detekci a odstranění nebo snížení různých typů chyb, které závisí na stavu podsystémů systému ADS-B. Pro analýzu všech různých kombinací stavů se opět využívají stromy událostí. Model rizika kolize pak vypočte celkovou pravděpodobnost překrytí, což je vážený průměr pravděpodobností překrytí pro jednotlivé typy chyb navigace. Váhou v tomto výpočtu je poměr času, v němž je možné očekávat výskyt každé chyby v praxi.

5. Faktory podílející se na velikosti rozstupů

V kapitole čtvrté jsme prozkoumali historii rozstupů, přičemž s výjimkou standardů oceánské separace, standardů separace pro provoz s paralelními drahami a snížených vertikálních separací se standardy historicky nezměnily [21]. Jelikož letectví od té doby velmi pokročilo, prošly vývojem i radionavigační a přehledové systémy, jejichž chyba se snížila. To svědčí o tom, že na celkové hodnotě rozstupů se nepodílí pouze chyby těchto radionavigačních a přehledových systémů, ale také jiné faktory. Do standardů jsou zahrnuty další faktory, jako je doba reakce člověka (pilota, řídícího) [14].

Při použití radarové separace se vědomě či nevědomě bere v úvahu mnohem více prvků, z nichž většina je netechnické povahy. Mezi netechnické faktory patří například: struktura a postupy vzdušného prostoru, národní postupy a předpisy, kvalita a využití lidských zdrojů (vnímání řídících, odborné znalosti a pracovní vytížení řídících – množství provozu, které může být bezpečně zpracováno v daném čase se liší v závislosti na schopnostech a dovednostech jednotlivců). Povolené minimální radarové rozstupy nelze použít jako matematické pravidlo a jsou vysoce závislé na proměnných provozních faktorech. [10]

V oblasti řízení letového provozu je cílem zabránit selhání postupů, která jsou způsobena narůstající hustotou letového provozu. Největší úsilí bylo věnováno snižování pracovní zátěže řídícího, současně ale zvyšování počtu letadel, které může současně řídit. Toto by poněkud zvýšilo kapacitu vzdušného prostoru. Například byly provedeny pokusy se snížením velikosti sektoru. Zmenšování velikosti sektorů je v současnosti nejpoužívanější přístup, jak se vypořádat s narůstajícím objemem provozu, nicméně zmenšování sektorů nepřináší snižování zátěže řídícího, protože narůstá zátěž připadající na koordinaci a předávání letadel sousedním sektorům. [9]

5.1 Aplikace rozstupů s podporou přehledového systému

Jak již bylo zmíněno v minulé kapitole, v evropském prostoru se při separacích počítá s dostupností hlasové komunikace a užití přehledového systému na pracovišti řídícího letového provozu. S dostupností přehledové informace počítá také dokument Aeronautical Surveillance Manual [11], který bude využit v kapitole 5.1.

5.1.1 Informace

Pro aplikaci rozstupů jsou důležitá určitá data, kterými jsou: horizontální pozice, tlaková výška a identifikace. Dále pak máme datové položky, při jejichž poskytování jsou nabízeny další

výhody. Mezi datové položky patří SPI[6], traťová rychlost a pravá vzdušná rychlost a další údaje o sledování (typ senzoru, čas použitelnosti údajů).

5.1.1.1 Horizontální pozice

Horizontální pozice je základní informací, protože je využívána ke zjištění, zda jsou dodržena separační minima mezi dvěma letadly, nebo jsou ohrožena. Každý typ přehledového systému může podávat informace o horizontální poloze rozdílně. Buď je informace obsahem dat přenesených z palubního subsystému samotnému systému (např. ADS-B), nebo je daným subsystémem přehledového systému vypočítána na místě (např. radar, MLAT). Mimo to mohou mít samotná data různé podoby:

- vzdálenost a azimut (radary)
- zeměpisná šířka a délka (ADS-B)
- specifický systém souřadnic X a Y (může být poskytnut multisensorovým trackerem)

5.1.1.2 Tlaková výška

Tlaková výška, nebo také barometrická výška, měřená výškoměrem letadla se využívá k zobrazení vertikální polohy letadla. Místní barometrická korekce je prováděna uživatelskou aplikací, a proto není uvažována jako součást přehledového systému.

5.1.1.3 Identifikace

Správná identifikace letadla je velice podstatná, neboť instrukce ATC musí být předány správnému letadlu. Identifikace je získávána buď pomocí ID letadla extrahovaného z letadla, nebo z odpovědi SSR v režimu A. ID extrahované z letadla koreluje s daty v letovém plánu.

5.1.1.4 SPI

Jedná se o datovou položku, která se přenáší na žádost ATC a využívá jako jeden ze způsobů manuální korelace, že byla dosažena správná provozní identifikace. Napomáhá rychlému vyhledání letadla na monitorovacím displeji.

5.1.1.5 Traťová rychlost a pravá vzdušná rychlost

Traťová rychlost a pravá vzdušná rychlost napomáhají predikci budoucí polohy letadla.

5.1.2 Obnova informace

S dřívějšími primárními radary se zobrazoval záznam přímo řídícímu. Tento systém měl velmi malá časová zpoždění od získání přehledové informace k jejímu zobrazení, obsahoval jasný

[6] SPI = Special Position Identification Pulse

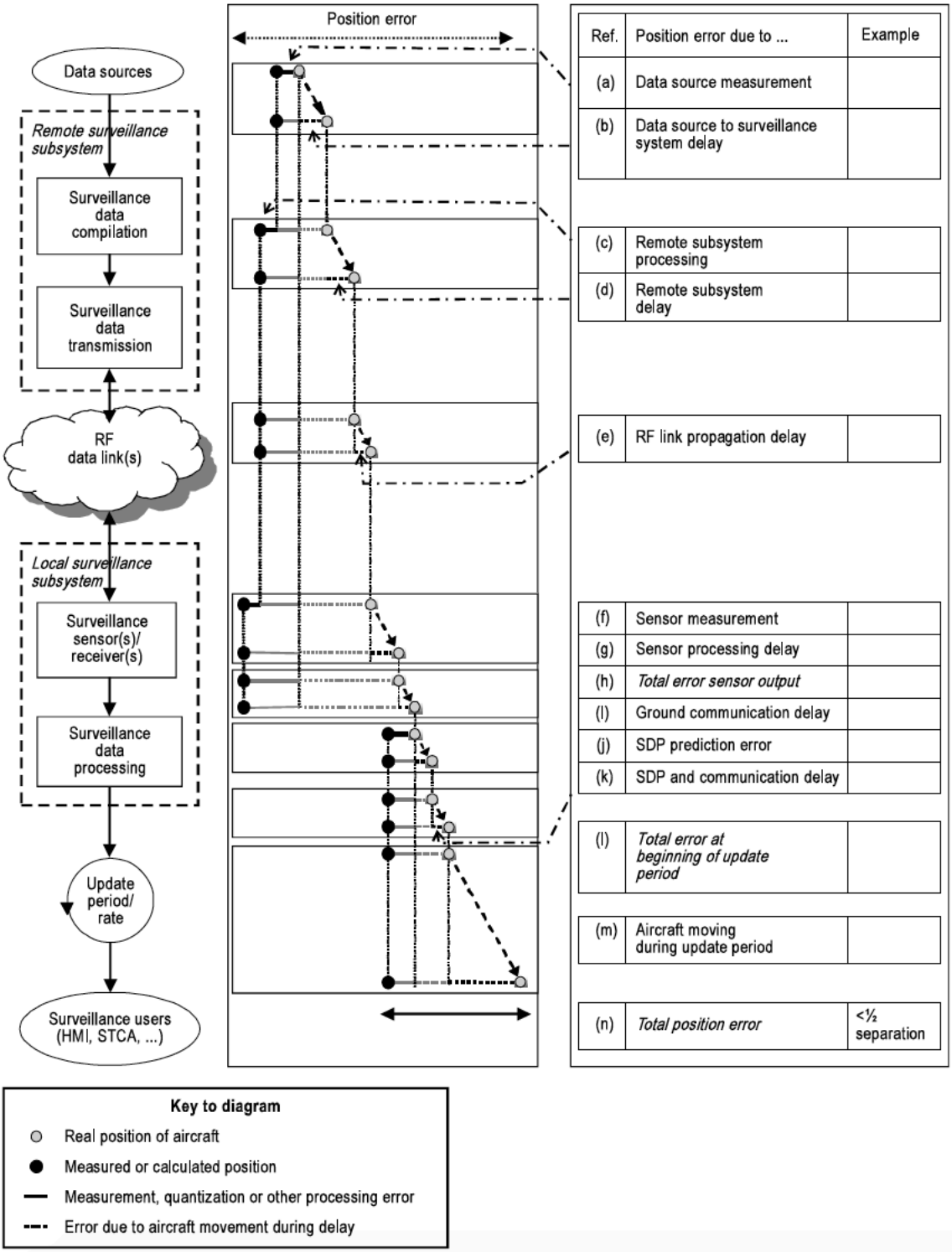
údaj o době zobrazení nových dat a o stáří údajů. V této době byla separace považována za zavedenou, když byla letadla v těsné blízkosti viděna na obrazovce jako oddělená.

U moderních systémů je to složitější, neboť výsledná informace zobrazovaná na pracovišti řídícího je kombinována z více zdrojů a prochází celým řetězcem multiradarového zpracování. Tyto systémy mají časová zpoždění od změření polohy k jejímu zobrazení a poloha letadla se mění pouze v okamžiku obnovy informace. Těsně před obnovou přehledové informace je nejistota zobrazené pozice největší, neboť letadla jsou neustále v pohybu (i během obnovovacího období). Na velikosti takovéto chyby se tedy podílí nejen rychlost obnovy informace, ale také rychlost letadla.

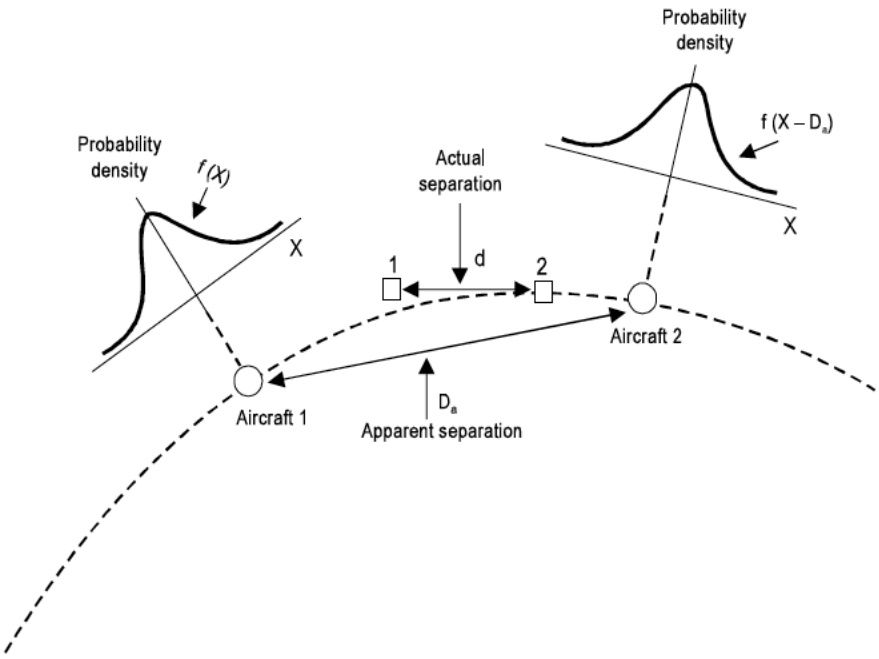
Na celkovou chybu horizontální polohy na výstupu přehledového systému má ale vliv více faktorů. Tyto faktory lze rozdělit do dvou skupin:

- chyby, které vznikají při měření nebo zpracování a přímo ovlivňují polohová data
- stáří údajů, které způsobuje chybu polohy z důvodu neustálého pohybu letadla.

Zdroje chyb se mohou kombinovat, jak je zobrazeno na Obrázku 5. Obecně se předpokládá, že první skupina chyb je náhodně rozložena kolem skutečné polohy letadla. Na Obrázku 6 je vyobrazeno, jak by takové náhodné rozložení chyb mohlo ovlivnit rozstup mezi letadly. Na obrázku je zdánlivá separace větší než skutečná. Jelikož jsou tyto chyby náhodně rozděleny, a navíc zde existuje i druhá skupina chyb, může se stát, že jsou vyobrazená letadla mnohem blíž, nebo se dokonce překrývají. Druhá skupina chyb je však těžko měřitelná, neboť závisí na letových charakteristikách letadla, proto je běžnější měřit chybu, když jsou data odesílána z monitorovacího systému, jejichž změny nejsou ovlivněny letovými charakteristikami daného letadla.



Obrázek 5 – Příklad kombinace faktorů působících na výslednou polohovou chybu [11]



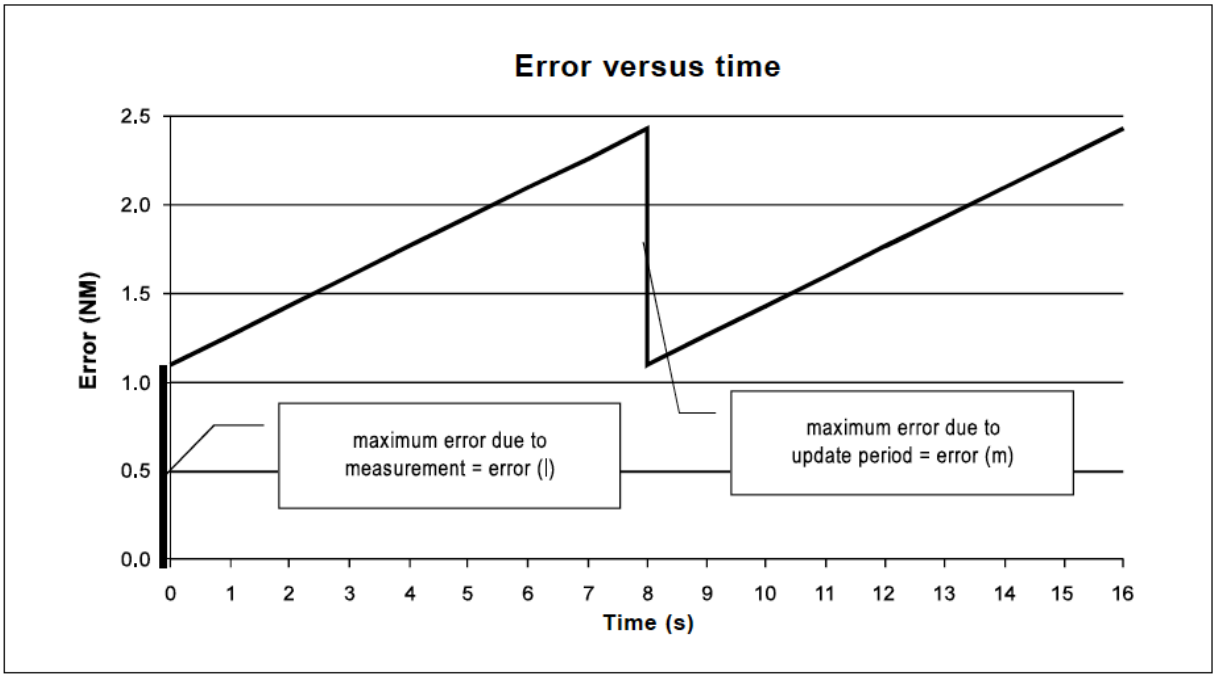
Obrázek 6 – Aktuální a zdánlivá separace dvou letadel [11]

5.1.2.1 Doba obnovy informace

Pracujeme s předpokladem, že výstup ze systému zpracování přehledových dat je přiváděn přímo na displej. Doba obnovy informace je v systému nastavena na základě mnoha faktorů (typ provozu, maximální rychlost stoupání, typ struktury vzdušného prostoru, lidský faktor).

Původně byla perioda obnovy informace pro provoz na trati více než 10 sekund, což je dlouhá doba. Spolu s novějšími systémy přišla také kratší perioda obnovy informace, která se pohybuje v čase 5 až 6 sekund na obnovu.

Pokud letadlo udržuje svou přiřazenou hladinu (je ve vhodných tolerancích ± 200 ft ve vzdušném prostoru RVSM nebo ± 300 ft v jiném vzdušném prostoru) po dobu tří obnovovacích period nebo 15 sekund (podle toho, co je větší) považujeme jej za letadlo, jež dosáhlo stanovené hladiny. Zásah ze strany řídícího je možný pouze při porušení výše uvedených hodnot. Systém musí toto porušení rozpoznat, a to v jednom obnovovacím období. Pokud máme tedy letadlo, které klesá nebo stoupá rychlostí 3000 ft/min, je požadovaná doba obnovy informace 6 sekund (pro non-RVSM) a 4 sekundy (pro RVSM). Globální dohoda o specifické době obnovy informace nebyla možná. Na Obrázku 7 je uveden příklad vztahu mezi chybou horizontální polohy a periodou obnovy informace.



Obrázek 7 – Vztah mezi horizontální chybou polohy a periodou obnovy informace [11]

5.1.3 Chyba horizontální polohy během obnovy informace

Situaci modelujeme s nejhorším možným scénářem, a to, že letadla jsou ve stejné nadmořské výšce a mají maximální rychlost. Chceme-li zjistit velikost maximální chyby na začátku obnovy informace, musíme zjistit, jaká chyba se nám utvoří během období obnovy informace, neboť na jejím konci je nejkritičtější oblast s maximální chybou. Roli nám v tom budou hrát 4 parametry – parametr V (maximální rychlost letadla), Z (maximální velikost letadla), T (perioda obnovy informace, která musí být pevná) a H (horizontální rozstup). Na konci obnovovacího období bude maximální možná chyba X rovna:

$$X = \frac{H}{2} - \frac{Z}{2} \tag{6}$$

Jelikož ale chceme znát chybu na začátku obnovovacího období, musíme ještě od této chyby X odečíst maximální možnou ulétnutou dráhu, kterou získáme součinem maximální rychlosti a periody obnovy informace. Konečný vzorec pro maximální chybu Y na začátku období je poté:

$$Y = X - V \times T \tag{7}$$

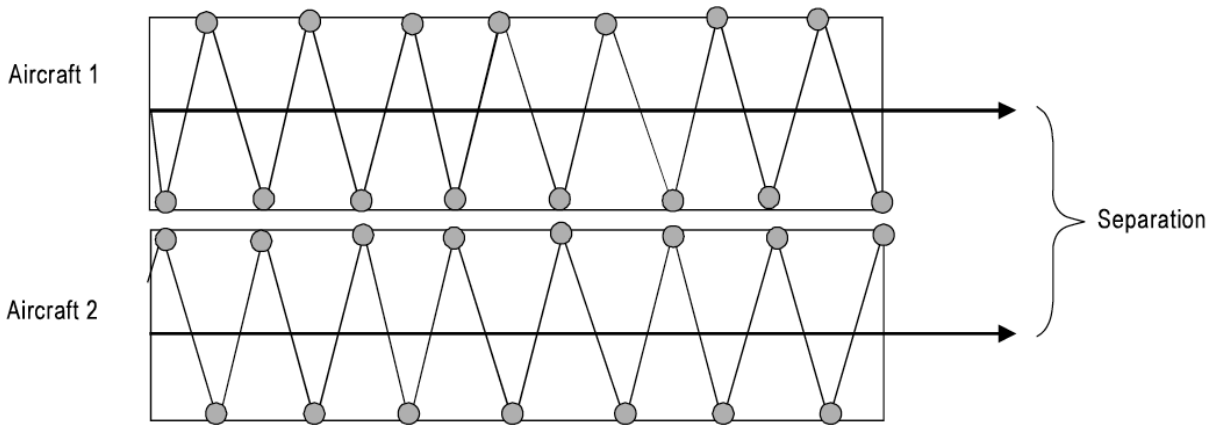
Tato chyba zahrnuje všechny chyby po nakumulování se. Z tohoto lze usoudit, že při kratší periodě obnovy informace bude chyba během období obnovy informace menší, tudíž bude limit pro maximální chybu na začátku obnovy informace méně přísný. Jak se mění hodnoty maximální možné chyby na začátku obnovovacího období je možné pozorovat v Tabulce 7.

Tabulka 7 - Příklad měnících se hodnot maximální chyby při změně periody [11]

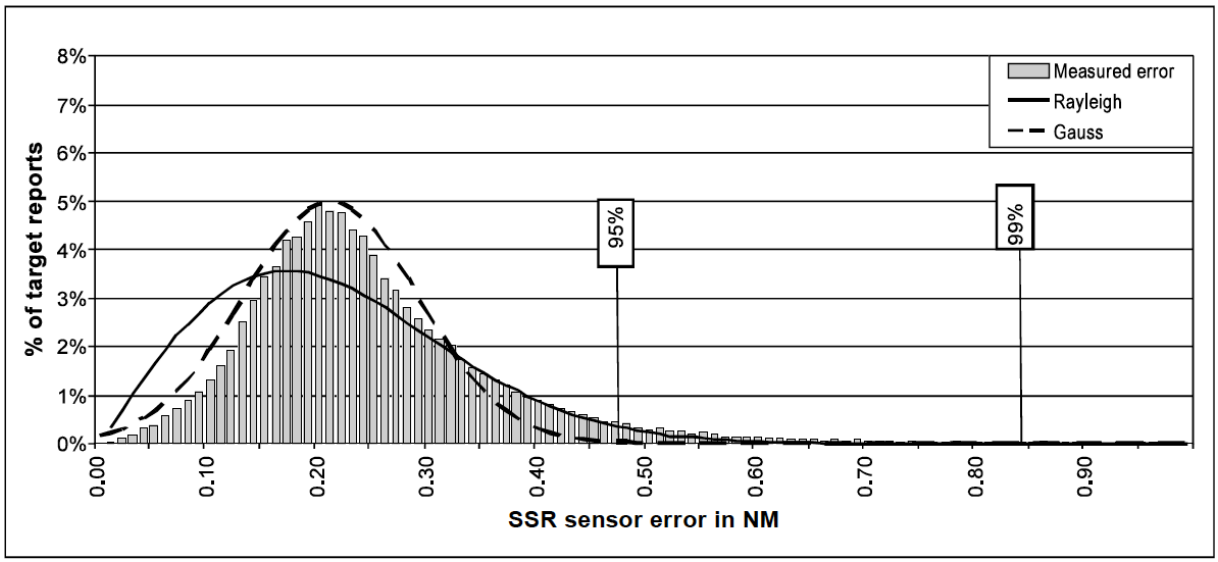
Hypothesis: • Maximum speed (kt) 600 • Aircraft size (m) 100 • Separation (NM) 5		
Update period (s)	*Maximum remaining error budget at surveillance output (i.e. or just after an update)*	
	(m)	*(NM)*
1	4 271	2.3
2	3 963	2.1
3	3 654	2.0
4	3 345	1.8
5	3 037	1.6
6	2 728	1.5
7	2 419	1.3
8	2 111	1.1
10	1 493	0.8
12	876	0.5

Když nebudou dodrženy tyto hodnoty, musí být provedena analýza bezpečnosti. Pokud je pravděpodobnost výskytu této situace nízká, systém musí být monitorován, aby se tato pravděpodobnost nedostala nad přijatelnou hodnotu. Druhou možností, jak k tomu přistupovat, je klasifikování jakékoliv události jako významné a následně ji analyzovat, aby se zjistilo, zda má bezpečnostní dopad na provoz, či nikoliv. Pokud ano, musí se zavést nezbytné opatření, aby se nadále udržel požadovaný rozstup.

Z hlediska bezpečnosti by stačilo pouze omezení chyby pod maximální přijatelnou hodnotu, ale i přesto je třeba provést kontrolu rozdělení hlavních chyb, protože ne všechny trajektorie jsou v praxi použitelné, jednak z hlediska nepohodlí pro řídící (Obrázek 8), ale také kvůli vyšší pravděpodobnosti porušení maximálních hodnot. Rozdělení chyb se ale liší od jednoho systému k druhému. Tyto rozdíly můžeme sledovat na Obrázku 9 pro radarový výstup, Obrázku 10 pro výstup z multisensor trackeru a na Obrázku 11 pro výstup přijímače ADS-B.



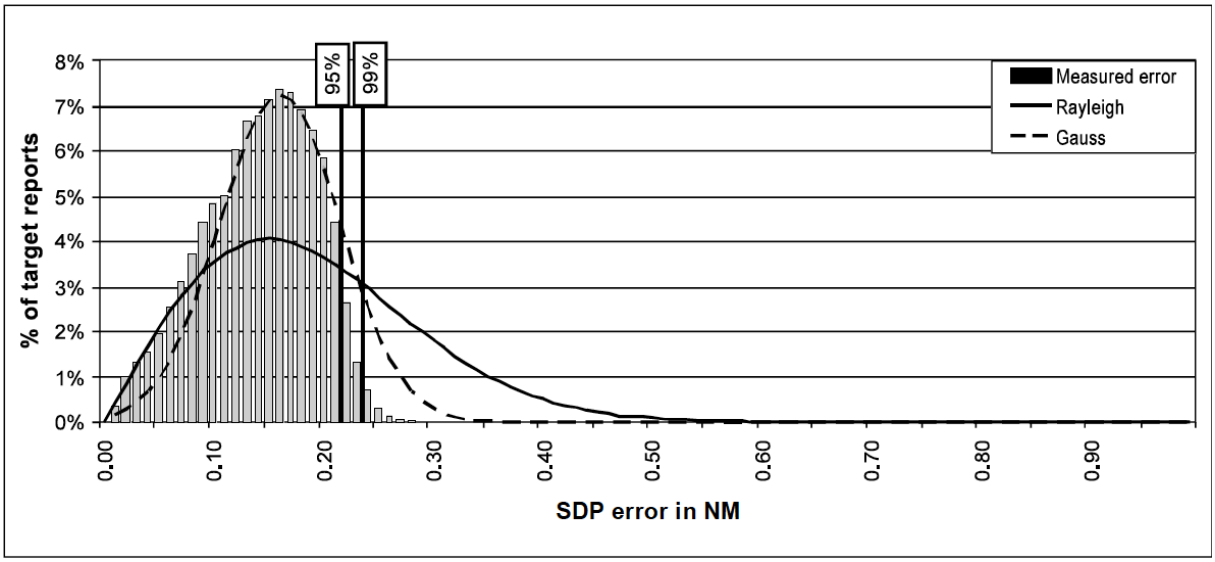
Obrázek 8 - Dvě trajektorie v souladu s maximální hodnotou chyby [11]



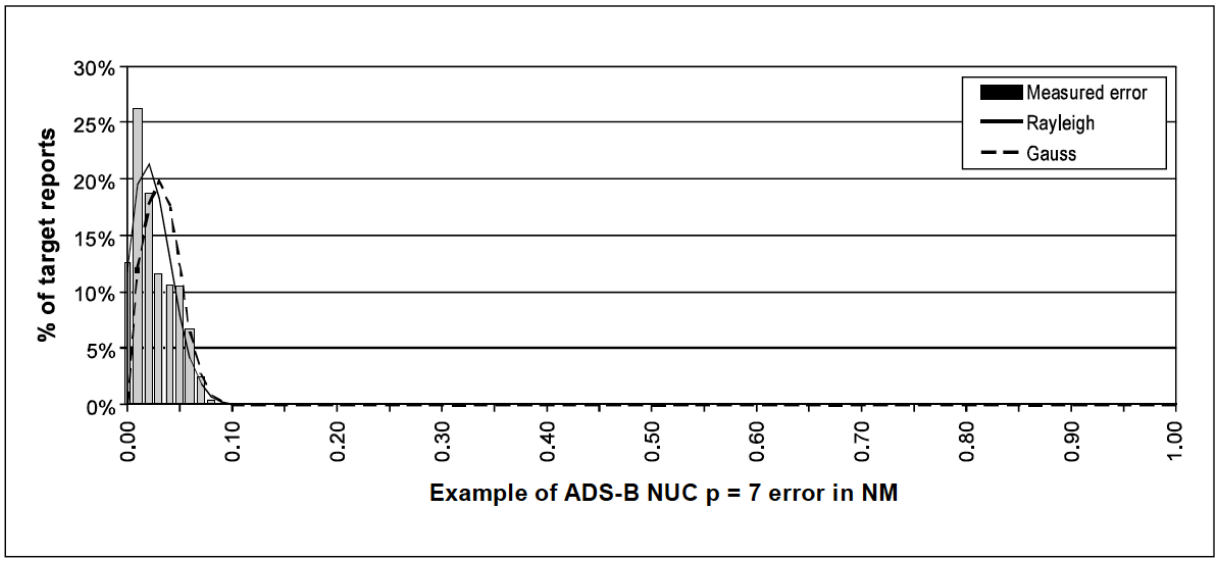
Obrázek 9 - Příklad rozdělení chyby horizontální polohy měřené na výstupu z SSR radaru [11]

Kritéria k omezení rozdělení základních chyb musí zahrnovat předvídané chyby, i náhodné chyby. Doporučuje se charakterizovat rozdělení hlavních chyb buď použitím maximální chyby na hladině pravděpodobnosti (např. chyba při 95%), nebo použitím hodnoty RMS[7].

[7] RMS = Root Mean Square – kvadratický průměr (odmocnina z průměru kvadrátu)



Obrázek 10 - Příklad rozdělení chyby horizontální polohy měřené na výstupu z multisensor trackeru [11]



Obrázek 11 - Příklad rozdělení chyby horizontální pozice na výstupu z přijímače ADS-B pro NUC[8] p=7 [11]

[8] NUC = Navigation Uncertainty Category[12] – číselná hodnota, která oznamuje integritu spojenou s vysíláním horizontálních polohových dat

Závěrem této kapitoly bych ráda uvedla příklady rozpočítání horizontálních chyb pro různé systémy tak, jak uvádí dokument Aeronautical Surveillance Manual [11]. Konkrétně pro jeden radar (Obrázek 12), systém multiradarového zpracování (Obrázek 13) a systém ADS-B (Obrázek 14).

En-route scenario: • 180 NM of coverage • 6-second update period • aircraft speed 600 kt.			
Position error because of:	*Example*	*Nominal value (m)*	*Maximum value (m)*
a) Data source measurement	n/a	—	—
b) Data source to surveillance system delay	n/a	—	—
c) Remote subsystem processing	n/a	—	—
d) Remote subsystem delay	Transponder reply delay jitter +/– 0.08 μs	—	included in sensor measurement error
e) RF link propagation delay	3 ms	—	0.9
f) Sensor measurement/ processing error	Azimuth (1σ) = 0.068° Range (1 σ) = 15 m Azimuth (5 σ) = 1 978	440 m	1 978
g) Sensor processing delay	2 s (including ground communication delay)	—	617
h) Total error sensor output	—	—	2 596
i) Ground communication delay	—	—	As per g)
j) SDP prediction error	—	—	—
k) SDP delay	—	—	—
l) *Total error at beginning of update period*	—	—	2 596
m) Aircraft moving during update period	6 s	—	1 852
n) *Total position error*	not to exceed (1/2 separation – buffer = 4 580)	—	4 448 (less than the maximum permissible value)

Obrázek 12 – Příklad rozpočtení chyby pro jeden radar módu S [11]

Position error because of:	*Example*	*Nominal value (m)*	*Maximum value (m)*
a) Data source measurement	n/a	—	—
b) Data source to surveillance system delay	n/a	—	—
c) Remote subsystem processing	n/a	—	—
d) Remote subsystem delay	Transponder reply delay jitter +/– 0.08 μs	—	included in sensor measurement error
e) RF link propagation delay	3 ms	—	0.9
f) Sensor measurement/ processing error	Azimuth σ = 0.068° Range σ = 15 m (taken from the European Mode S specifications) Azimuth (5 σ)	395 m 15 m	1 978
g) Sensor processing delay	2 s (including communication delay)	—	617
h) Total error sensor output	—	—	2 596
i) Ground communication delay	—	—	—
j) SDP prediction error	95% or error <407 m maximum = 722 m (see example in Table A-5)	—	722
k) SDP delay	A few ms	—	1
l) *total error at beginning of update period*	—	—	—
m) Aircraft moving during update period	Display update interval = 5 s	—	1 543
n) *Total position error*	Not to exceed (1/2 separation – buffer = 4 580)	—	—

Obrázek 13 – Příklad rozpočtení chyby pro multi-radar tracker [11]

Position error because of:	*Example*	*Nominal value (m)*	*Maximum value (m)*
a) Data source measurement	GPS error NIC = 5, Rc = 1 NM = 1 852 m	—	1 852
b) Data source to surveillance system delay	Time between GNSS receiver and transponder maximum 0.6 s	—	185.2
c) Remote subsystem processing	Error due to transponder extrapolation	—	—
d) Remote subsystem delay	—	—	—
e) RF link propagation delay	3 ms	—	0.9
f) Sensor measurement/ processing	—	—	—
g) Sensor processing delay	—	—	—
h) Total error sensor output	—	—	2 038.1
i) Ground communication delay	—	—	—
j) SDP prediction error	—	—	—
k) SDP delay	—	—	—
l) Ground communication delay	—	—	—
m) *Total error at beginning of update period*	—	—	2 038.1
n) Aircraft moving during update period	6 s	—	1 852
o) *Total position error*	Not to exceed (1/2 separation – buffer = 4 580)	—	3 890 (less than the maximum permissible value)

Obrázek 14 - Příklad rozpočtení chyby pro systém ADS-B v instalaci s NIC[9] = 5 [11]

5.2 Netechnické faktory

V předchozí kapitole je vidět, co vše je zahrnuto do chyby pozice, ale o faktorech netechnické povahy jsme se pouze dozvěděli, že existují, nikoliv jejich celkový podíl na chybě. O netechnických faktorech bude tato kapitola, která je založena na ICAO Doc 10063 – Manual on Monitoring the Application of Performance-based Horizontal Separation Minima [17]. Tento dokument však pojednává pouze o procedurálních rozstupech.

[9] NIC = Navigational Integrity Category – slouží k určení poloměru kontejnmentu integrity spojené s daty horizontální polohy

Jak již víme z předchozích kapitol, je vytvořen model rizika kolize, se kterým se v praxi počítá při ověřování použitelnosti rozstupu. Tento model zahrnuje mnoho faktorů, které jsou zobrazeny na Obrázku 15.

Parameter	*Description*	*Units*	*Default Value*
λv	Scale parameter for the aircraft speed distribution, represents the speed decay	Knots	5.82
Vm	Maximum speed variation allowed	Knots	100
S_x	Longitudinal separation standard	NM	30, 50
RNP	Required navigation performance type	NM	4
ONP	Observed navigation performance	NM	
τ	Controller intervention buffer, response time	Seconds	240 for normal cases, 630 and 810 for abnormal cases
T	Aircraft position report interval, ADS-C periodic report rate	Minutes	10, 14, 27
V_1,V_2	Nominal aircraft speeds	Knots	480
$\overline{\lvert \dot{z} \rvert}$	Average absolute relative vertical speed of an aircraft pair that have lost all vertical separation (e.g. vertical speed variation)	Knots	1.5
$P_z(0)$	Probability that two aircraft which are nominally at the same flight level are in vertical overlap		0.55
λ_{xy}	Aircraft wingspan or length	NM	
λz	Aircraft height	NM	
NP	Number of pairs that require controller intervention per flight hour	Per flight hour	

Obrázek 15 - Parametry pro model kolizního rizika podélných rozstupů [17]

Nás v této kapitole zajímá parametr τ – ochranné pásmo pro zásah řídícího. Pro tento parametr se využívají tři hodnoty – 240, 630 a 810 sekund. První hodnota je pro normální operace na hladině pravděpodobnosti 95%. V případě selhání běžných komunikačních prostředků poskytne případ 2 dalších 6,5 minuty na zásah řídícího s pomocí alternativních komunikačních prostředků. Poslední případ poskytuje celkem 13,5 minuty k vyřešení konfliktu a je aplikován, když periodická zpráva trvá déle než 3 minuty. Rozpočítání jednotlivých hodnot je na Obrázku 16, Obrázku 17 a Obrázku 18.

Component	*Value (seconds)*
Screen update time/controller conflict recognition	30
Controller message composition	15
CPDLC uplink	90
Pilot reaction	30
Aircraft inertia plus climb	75
Total	240

Obrázek 16 – Komponenty parametru τ pro normální ADS operace [17]

Component	*Value (seconds)*
Screen update time/controller conflict recognition	30
Controller message composition	15
CPDLC uplink and wait for response	180
HF communication	300
Pilot reaction	30
Aircraft inertia plus climb	75
Total	630

Obrázek 17 - Komponenty parametru τ, když není přijata odpověď CPDLC a je nutná komunikace HF [17]

Component	*Value (seconds)*
Controller wait for ADS report	180
Controller message composition	15
CPDLC uplink and wait for response	180
HF communication	300
Pilot reaction	30
Aircraft inertia plus climb	75
Extra allowance	30
Total	810

Obrázek 18 - Komponenty parametru τ, když trvá periodická zpráva déle než 3 minuty [17]

6. Koncept PBCS

Kapitola 6 je vypracována na základě informací z ICAO dokumentu Performance-based Communication and Surveillance (PBCS) Manual. [16]

V roce 1983 vznikl Zvláštní výbor pro budoucnost leteckých navigačních systémů (FANS), který spadá pod ICAO. Jejich úkolem bylo studovat, identifikovat a hodnotit nové technologie a navrhovat doporučení pro budoucí vývoj letecké navigace v civilním letectví. V roce 1991 proběhla v Montrealu konference, aby byl projednán a schválen koncept budoucí navigace v letectví, který je znám jako koncept komunikačních, navigačních a přehledových systémů. Ten zahrnuje komplexní a vzájemně propojený soubor technologií, které jsou do značné míry závislé na satelitech. Schválení koncepce systémů ATM signalizovalo začátek nové éry mezinárodního letectví a otevřelo cestu činnostem spojeným s plánováním a implementací nových systémů po celém světě.

Na čtvrtém zasedání AMCP[10] byla uznána neexistence objektivních kritérií pro vyhodnocení výkonnostních parametrů komunikace. Na základě provozních požadavků na komunikační systémy v různých fázích letu měl vzniknout soubor hodnot parametrů nazvaný jako specifikace požadované komunikační výkonnosti (RCP[11]). V roce 2001 OPLINKP[12] dokončil dokument Concept of Required Communication Performance [26], který byl opřipomínkován členskými státy ICAO. Na základě připomínek ANC[13] v roce 2002 změnila pracovní program OPLINKP a vznikla tak příručka o požadované komunikační výkonnosti (RCP) (Doc 9869 – Manual on Required Communication Performance [16]), normy a doporučené postupy (SARP[14]) vztahující se k používání RCP při poskytování letových provozních služeb. V roce 2005 na zasedání OPLINKP byly dohodnuty změny a specifikace RCP byla zařazena do Annex 6 [27], Annex 11 [28], Doc 4444 [29] a Doc 9869 [16].

V roce 2008 dostal OPLINKP za úkol aktualizovat Manual on Required Communication Performance (Doc 9869) [16] na základě významných pokroků členských států ICAO.

---

[10] AMCP = Aeronautical Mobile Communications Panel

[11] RCP = required communication performance

[12] OPLINKP = Operational Data Link Panel

[13] ANC = Air Navigation Commission

[14] SARP = Standards and Recommended Practices

V roce 2010 OPLINKP přejmenoval Doc 9869 na Performance-based Communication and Surveillance (PBCS) Manual a začlenil do něj část GOLD (Global Operational Data Link Manual [32]), SVGM (Satellite Voice Guidance Material) a další materiály, které byly vyvinuty po roce 2007. Druhé vydání Doc 9869 obsahuje kromě specifikací RCP také specifikace RSP, které poskytují provozní, bezpečnostní a výkonnostní kritéria pro přehledové systémy. Specifikace RCP a RSP jsou popsány v rámci PBCS. Ustanovení o PBCS bylo zahrnuto do ICAO Annex 6 [27], Annex 11 [28], Annex 14 [30], Doc 4444 [29], Doc 8400 [31] a Doc 9869 [16] v roce 2016.

Koncept PBCS poskytuje rámec pro výkonnostní parametry komunikačních a přehledových systémů v souladu s globálně akceptovanými specifikacemi RCP a RSP. Specifikace RCP a RSP jsou původně určeny pro ADS-C, CPDLC a SATVOICE podporující operace ATM ve vzdušném prostoru, kde se používají procedurální rozstupy. Koncept PBCS však umožňuje nové specifikace RCP a RSP pro jiné účely, což by mohlo být předmětem dalších renovací příručky (např. pro systém ADS-B).

6.1 Specifikace RCP

Jednotlivé typy specifikace RCP se liší identifikátorem (např. RCP 240). Toto číslo udává maximální dobu komunikačního přenosu, který je díky tomuto identifikátoru zřejmý všem účastníkům provozu na první pohled. V současné době existují ve vzdušném prostoru, kde se používá procedurální separace, dvě specifikace – RCP 240 a RCP 400. Požadavky na jednotlivé specifikace mají společné parametry, na kterých jsou založeny. Jedná se o dobu přenosu, kontinuitu, dostupnost a integritu. Oba typy specifikace s požadavky na parametry jsou uvedeny v Tabulce 8.

Tabulka 8 - Specifikace RCP [16]

RCP specification	*RCP transaction time (seconds)*	*RCP continuity (probability)*	*RCP availability (probability)*	*RCP integrity (acceptable rate/flight hour)*
RCP 240	240	0.999	0.999 0.9999 (efficiency)	10^{-5}
RCP 400	400	0.999	0.999	10^{-5}

6.1.1 RCP 240

Specifikaci RCP 240 lze použít při využívání běžných komunikačních prostředků, které podporují schopnost zásahu řídícího v procedurálně řízeném vzdušném prostoru, kde je aplikován minimální rozstup založen na výkonnosti komunikačního systému.

6.1.2 RCP 400

Specifikaci RCP 400 lze použít u nově vzniklých technologií, jež jsou klasifikovány jako běžné komunikační prostředky, které podporují schopnost zásahu řídícího v procedurálně řízeném prostoru, kde je aplikován minimální rozstup založený na hlášení polohy v povinných ohlašovacích bodech. Také může být použita u nově vzniklých technologií klasifikovaných jako alternativní komunikační prostředky, které mohou být vyžadovány v kombinaci s běžnými komunikačními prostředky, na něž je aplikována specifikace RCP 240.

6.1.3 Doba přenosu

Jelikož může existovat více provozních komunikačních přenosů, určuje se mezi těmito přenosy ten nejpřísnější. Hodnota doby přenosu je založená na době potřebné k dokončení nejpřísnějšího přenosu vedoucího k zásahu řídícího. Při zajišťování rozstupů může být doba přenosu určena modelováním rizika kolize. Toto modelování bere v úvahu časy přenosu v oblasti komunikace a ochranné pásmo pro zásah řídícího, který je takovou pojistkou pro zajištění rozstupů.

6.1.4 Kontinuita

Přijatelná hodnota provozní kontinuity by měla být stanovena na základě analýzy detekovaných chyb při komunikačním přenosu, kdy se zjišťuje závažnost a pravděpodobnost výskytu těchto chyb. Mezi takové chyb patří přenosy, které přesahují požadovanou dobu přenosu, poškozené nebo nesprávně směrované zprávy, detekování ztráty komunikační služby nebo ztráta schopnosti letadla využívat komunikační služby, dokud se nedokončí předchozí přenos.

6.1.5 Dostupnost

Dostupnost (RCP Availability) je systémový požadavek spojený s komunikační službou, která je k dispozici letové posádce a řídícímu. Jedná se o požadovanou pravděpodobnost

fungujícího komunikačního systému v čase. Vypočteme ji jako poměr času fungujícího systému a času, kdy systém funkční není.

6.1.6 Integrita

Hodnota integrity je přijatelná pravděpodobnost, kdy je komunikační přenos klasifikován jako bezchybný. Tato hodnota je vybírána na základě výsledků při posuzování provozního nebezpečí. Toto posuzování by mělo zahrnovat analýzu závažnosti dopadů komunikačních přenosů obsahujících chyby, které nebyly odhaleny. Mezi takové chyby patří poškození jedné nebo více zpráv během přenosu, nesprávné přesměrování zpráv, doručení zpráv ve špatném pořadí nebo se zpožděním (po uplynutí požadované doby přenosu), ztráta komunikace nebo přerušení komunikačního přenosu.

6.2 Specifikace RSP

Jednotlivé typy specifikace RSP se liší identifikátorem (např. RSP 180). Toto číslo udává požadovaný čas doručení přehledových dat, který je díky identifikátoru zřejmý všem účastníkům provozu na první pohled. Soubor požadavků na specifikaci RSP je založen na parametrech, mezi které patří doba přenosu přehledové informace, kontinuita, dostupnost a integrita. V současné době je počet specifikací ve vzdušném prostoru, kde jsou uplatněny procedurální rozstupy, omezen na dva – RSP 180 a RSP 400.

RSP 180 se využívá u přehledových systémů, které podporují možnost zásahu řídícího v procedurálně řízeném vzdušném prostoru, kde jsou využita minima rozstupů. RSP 400 lze využít u nově vznikajících technologií přehledových systémů, které podporují možnost zásahu řídícího v procedurálně řízeném vzdušném prostoru, kde jsou použita separační minima založená na hlášení polohy v povinných bodech. Také jsou použita u nově vznikajících technologií, které jsou klasifikovány jako alternativní přehledové systémy. Takové systémy mohou být vyžadovány v kombinaci s běžnými přehledovými prostředky, na které je aplikována specifikace RSP 180. Obě specifikace jsou spolu s požadovanými hodnotami parametrů uvedeny v Tabulce 9.

Tabulka 9 - Specifikace RSP [16]

RSP specification	*RSP delivery time (seconds)*	*RSP continuity (probability)*	*RSP availability (probability)*	*RSP integrity (acceptable rate/flight hour)*
RSP 180	180	0.999	0.999 0.9999 (efficiency)	FOM = navigation specification Time at position accuracy = +/- 1 sec Data integrity (malfunction) = 10^{-5}
RSP 400	400	0.999	0.999	FOM = Navigation specification Time at position accuracy = +/- 30 sec Data integrity (malfunction) = 10^{-5}

6.2.1 Doba přenosu

Hodnota doby přenosu je založena na okamžiku, kdy je doručení dat považováno za zpožděné. K zajištění rozstupů lze požadovaný čas doručení zprávy určit modelováním rizika kolize. Pracuje se zde s dobou přenosu přehledových dat, která podporují zachování rozstupů.

V praxi existuje doba přenosu pro nominální kontinuitu a provozní kontinuitu. Čas spojený s provozní kontinuitou se nazývá „čas po splatnosti“. Ten je spojen s časem, kdy řídící provede akci až po obdržení výstrahy od pozemního přijímače (po uplynutí doby). Hodnota tohoto času je monitorována v reálném čase pro každou přehledovou zprávu. Hodnota nominální doby přenosu se používá ve statistické analýze a není monitorována v reálném čase.

6.2.2 Kontinuita

Hodnota parametru kontinuity je spojena se skutečným výkonem přehledového systému po lhůtě splatnosti. Tato hodnota je vybrána na základě výsledků z vyhodnocení provozního nebezpečí. Posouzení provozního nebezpečí by mělo zahrnovat analýzu zjištěných chyb v doručených přehledových datech, kdy je zkoumána jejich závažnost. Mezi zjištěné chyby patří například detekce zpoždění (překročení požadované doby přenosu dat), poškozených nebo nesprávně nasměrovaných dat, zjištění ztráty služby přehledového systému nebo ztráty schopnosti letadel tuto službu využít.

6.2.3 Dostupnost

Dostupnost RSP (RSP Availability) je požadovaná pravděpodobnost, že přehledový systém je v provozu v čase. Vypočteme ji jako poměr mezi časem, během kterého je systém skutečně k dispozici a časem, kdy systém k dispozici není.

6.2.4 Integrita

Hodnota parametru integrity je vybrána na základě posouzení provozního nebezpečí, které zahrnuje analýzu závažnosti dopadů přenosů obsahující nezjištěné chyby. Mezi tyto chyby patří například poškození nebo nesprávné přesměrování přehledových dat, doručení zpráv ve špatném pořadí nebo po uplynutí požadované doby přenosu, ztráta služby nebo přerušení přenosu přehledových dat.

6.3 Aplikace specifikací RCP a RSP

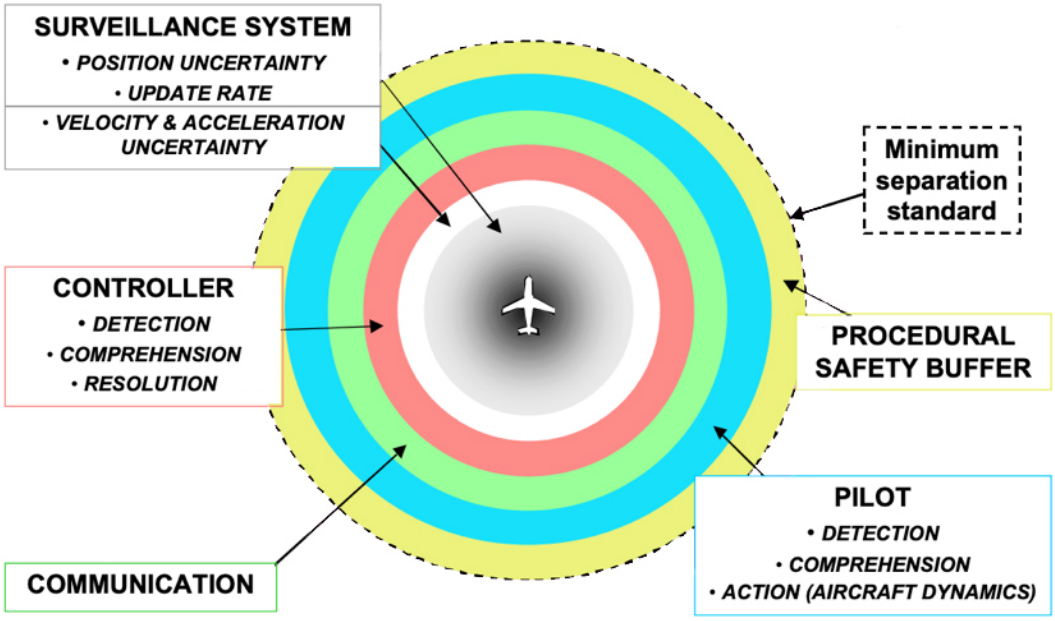
Normy a postupy pro řízení letového provozu, které jsou založeny na výkonnosti komunikačních a přehledových systémů (např. použití snížených minimálních rozstupů), by měly být v souladu se specifikací požadované komunikační výkonnosti (RCP)/přehledové výkonnosti (RSP). Stát by měl předepsat příslušnou specifikaci RCP/RSP pro komunikační a přehledové systémy v AIP nebo v jiné rovnocenné publikaci pro příslušný vzdušný prostor. Jestliže je předepsána specifikace RCP/RSP, měl by stát zajistit prostředky k posouzení skutečné výkonnosti komunikačních a přehledových systémů v konkrétním vzdušném prostoru dříve, než budou provedeny související operace ATM. Dále by měl stát zajistit, aby byly zavedeny prostředky k posouzení rizika jakéhokoli nedodržení specifikace RCP/RSP a přijal příslušná opatření k nápravě souvisejícího nedostatku. A pokud monitorovací program PBCS oznámí, že konkrétní provozovatel letadla nesplňuje specifikace, musí jej informovat o nesouladu a možnosti nápravy nedostatku s předem stanoveným časovým rámcem na základě závažnosti.

7. Analýza možnosti snižování rozstupů v souvislosti s kvalitnější přehledovou informací

Vzhledem k vývoji letecké dopravy, který jsme podrobně prozkoumali v kapitole 1, by bylo snížení rozstupů významným pokrokem v rozvoji letecké dopravy. V této oblasti letectví vznikla rozvinutá legislativa, která nám předepisuje požadavky na data, radarové pokrytí, hodnoty rozstupů a výkonnost přehledových systémů (kapitola 2, kapitola 3). Stěžejní otázkou však bylo, jakým způsobem hodnoty rozstupů vznikají, jak je možné se k těmto hodnotám dopočítat v rámci jednotlivých druhů chyb a jestli existuje prostor pro jejich snížení, nebo nikoliv.

Snahou bylo zjistit, jaká metodika byla použita pro zavedené rozstupy mezi letadly v historii, která by napomohla k diskuzi o možnostech snížení rozstupů do budoucna. Došla jsme však k zajímavému zjištění, že žádná metodika není dohledatelná (kapitola 4). Hodnoty rozstupů byly s největší pravděpodobností vytvořeny experimentálně na základě expertního odhadu chyb, které je ovlivňují. [14] Bylo však třeba ověřit, zda jsou hodnoty rozstupů nastaveny vhodně. K tomuto účelu byl vytvořen model rizika srážky. Nejvýznamnější prací v této oblasti jsou tři dokumenty pana Reiche, který vytvořil Reichův model rizika kolize. Tento model byl původně implementován na procedurální rozstupy v oblasti NAT, ale později byl využit v různých úpravách a rozšířeních i pro radarové rozstupy v oblasti Evropy a pro systém ADS-B. Hodnota na výstupu z Reichova modelu se dále porovnává s hodnotou $5x10^{-9}$ [8], což je mezinárodní hodnota cílové úrovně bezpečnosti, která udává maximální povolenou pravděpodobnost smrtelné nehody na letovou hodinu (kapitola 4).

Stále však nebylo zřejmé, jaké faktory musí být brány v úvahu, když se zabýváme velikostí rozstupů. Těmito faktory se zabývá kapitola 5, kde je jasně uvedeno, že velikost rozstupů není závislá pouze na technických parametrech přehledových systémů, ale také na netechnických faktorech. Všechny faktory, které hrají roli při určování rozstupů lze rozdělit do podkategorií, jak je uvedeny na Obrázku 19. Jedná se o chybu přehledového systému, čas, který potřebuje řídící na reakci na podnět, doba samotné komunikace mezi řídícím a pilotem, čas, který potřebuje pilot k reakci na podnět od řídícího a procedurální ochranné pásmo. Do procedurálního ochranného pásma jsou zahrnuty nejistoty jednotlivých faktorů. [33]



Obrázek 19 - Faktory ovlivňující horizontální rozstupy [33]

V kapitole 5.1 jsou uvedeny dílčí chyby, které se do technické části chyby napočítávají. Kromě samotných parametrů systému, jako jsou doba měření dat, doba přenosu nebo například přesnost čidel, je zde zdůrazněn velmi důležitý parametr, kterým je perioda obnovy informace. Samotná chyba pozice po technické stránce nezávisí totiž pouze na samotné kvalitě měření, ale také na dráze, kterou letadlo urazí během období obnovy informace. Mimo obecné informace jsou v této kapitole také tabulky s příklady napočítání technické chyby pro jeden radar, multiradarový tracker a systém ADS-B.

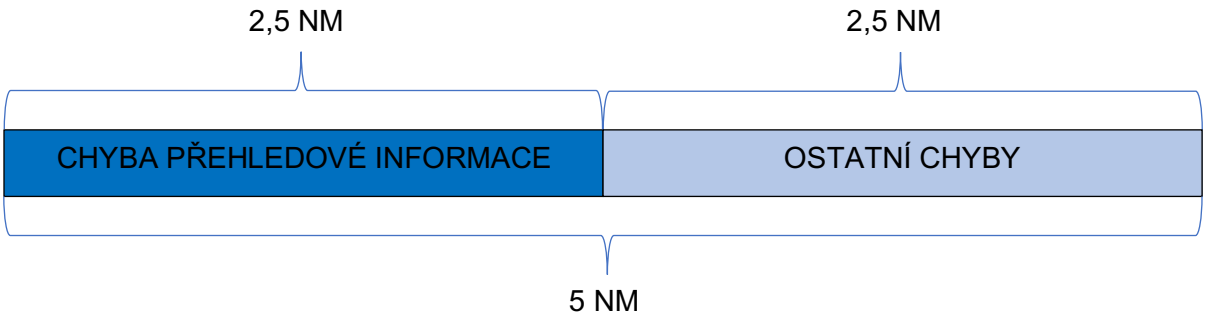
Možnost snižování rozstupů v oblasti netechnických faktorů není předmětem této práce, proto se těmito faktory dále nebudeme hlouběji zaobírat. Výkonnostní parametry přehledové infrastruktury prošly od zavedení rozstupů nemalým vývojem. Na počátku vzniku radarů se využívalo radarové informace pouze z jediného radaru. Záhy na to, v šedesátých letech dvacátého století, se začaly navrhovat první systémy, které využívaly multiradarového pokrytí. Takovéto systémy berou informace z více radarů. Tato metoda se využívá i v současnosti, ale je vcelku odlišná oproti té prvotní.

V tehdejší době bylo k vytvoření multitracku využíváno metody výběru plotů (mřížkovou technikou). Tato metoda spočívala v rozdělení vzdušného sektoru pomocí mřížky na jednotlivé oblasti. Přehledovou informaci sice poskytovalo více radarů, ale v každé oblasti mřížky se bral v potaz pouze jeden, nejvhodnější radar, plus byly nastaveny jeden nebo dva pomocné zdroje informace. Tehdy bylo toto zpracování výhodné kvůli nízké náročnosti na objem zpracovaných dat počítačem. Nevýhodou však bylo, že přesnost polohy se tímto způsobem nijak nezlepšila,

protože ploty z ostatních radarů nebyly využity při multiradarovém zpracování. Nejedná se tedy o multiradarový tracking v pravém slova smyslu, jak jej známe dnes. [34]

V současné době vzniká multiradarový multitrack, u kterého jsou ploty přijímány od několika různých systémů a všechny jsou zpracovávány ve výsledný track. Tato metoda má výhodu v přesnosti, kterou nabízí, oproti přesnosti informace, kterou poskytuje pouze jeden samotný radar, ale také zvyšuje obnovu informace. Takovýto multiradarový tracking byl možný až s nástupem výkonných multiradarových trackerů, jako je například systém ARTAS z roku 1995. [18]

Na Obrázku 5 je uvedeno, že celková chyba pozice po technické stránce musí být menší než ½ rozstupu [11]. Bereme tedy v úvahu, že 2,5 NM připadá na chybu přehledové informace (včetně technického ochranného pásma), jak je znázorněno na Obrázku 20.



Obrázek 20 - Komponenty rozstupu 5 NM

Na Obrázku 12 je uvedeno, že nesmí být pro celkovou chybu pozice překročena hodnota 4580 m, která je rozdílem ½ rozstupu a technického ochranného pásma (buffer). Nejdříve tedy vypočteme hodnotu technického bufferu, kterou budeme potřebovat i u multisensor trackeru.

$$\frac{1}{2} \times rozstup - buffer = 4580\ m \tag{6}$$

Z rovnice (6) vyplývá, že na technické ochranné pásmo (buffer) připadá 50 metrů.

Na Obrázku 13 jsou uvedeny hodnoty pro jednotlivé chyby systému. Není zde však uvedena celková hodnota chyby pozice, proto ji musíme vypočítat. Bereme v úvahu, že hodnotu chyby senzorů nezapočítáváme, ale počítáme pouze s hodnotou po zpracování (722 metrů), což je maximální hodnota chyby [11] na výstupu z multirackeru. Rozdělení chyb na výstupu z multitrackeru je uvedeno na Obrázku 10. Ačkoliv je chyba na hladině pravděpodobnosti 95% menší než 407 m, musíme z hlediska bezpečnosti uvažovat chybu na hladině pravděpodobnosti 100%, která činí 722 m. [11]

Celková chyba pozice letadla při využití multisensor trackeru vychází z Obrázku 13 a její hodnota je 2266 m. Když připočteme hodnotu ochranného pásma vypočtenou ze vzorce (6), dostaneme se na hodnotu 2316 m. Rozdíl celkové chyby na výstupu z radaru a z multisensor trackeru se liší o relativně velkou hodnotu, a to 2182 m.

Interval, který se nachází mezi hodnotou, která nesmí být překročena (2,5 NM ~ 4630 m) a hodnotou chyby na výstupu z mulitsensor trackeru činí 2314 m, což odpovídá hodnotě 1,25 NM.

Tímto je tedy dokázáno, že existuje prostor pro snižování rozstupů v závislosti na kvalitě přehledové informace u takto výkonných multisensor trackerů. Snížením rozstupů by se vytvořil další prostor pro zefektivnění využití vzdušného prostoru.

Na závěr této kapitoly bych ráda zmínila celkem nový koncept, který může napomoci samotnému snížení rozstupů. Jedná se o koncept PBCS, který je uvedený v kapitole 6. Jde o koncept, který zahrnuje specifikace RCP a RSP, které popisují požadované výkonnosti komunikačních a přehledových dat. Je možné, že se jedná o důležitý aspekt pro budoucnost rozstupů letadel.

Závěr

Problematika snižování rozstupů je nelehkou úlohou na mezinárodní úrovni. Snížení rozstupů by mohlo být jedním z přínosných aspektů rozvoje letecké dopravy. Při rozvoji v jakémkoliv odvětví letecké dopravy však není možné opomenout bezpečnost, která musí být zachována.

Cílem této práce bylo prozkoumat historii vzniku rozstupů a najít pomocí dané metodologie a výkonnostních požadavků prostor pro možné snížení rozstupů. Překvapujícím zjištěním bylo, že historicky není žádná metodologie dohledatelná. Věřím, že tato skutečnost nepřekvapila pouze mě, ale i ostatní čtenáře této práce. Na základě hodnot jednotlivých chyb na výstupu z radaru a multisensor trackeru jsme zjistili, že vzhledem ke zlepšení kvality přehledových informací od doby zavedení minim rozstupů, existuje možnost snížení rozstupů. Otázkou však zůstává, zda je tato hodnota natolik dostačující, aby se její implementace vyplatila v široce rozšířeném konceptu současných minim radarových rozstupů.

Věřím, že tato práce ukázala čtenářům, že rozstupy jsou problematikou sahající do mnoha odvětví – např. technika, psychologie, matematika – a že jejich hodnoty měli své opodstatnění. Zlepšení technologií se promítlo do kvality přehledové informace, která částečně, nikoliv však úplně, ovlivňuje minimální rozstupy mezi letadly. Díky tomu se nabízí možnost snížení standardů minimálních rozstupů. Nezbývá než čekat, s jakým výsledkem v tomto odvětví přijdou odborníci.

Seznam použité literatury

[1] **Ministerstvo dopravy ČR:** *Koncepce letecké dopravy pro období 2015-2020 (MZP236K)* [online, PDF] [vid 2.11.2019] https://portal.cenia.cz/eiasea/download/U0VBX01aUDIzNktfbmF2cmhfNDcwNDM5Mjk4NzcwMjM0NjE5Mi5wZGY/MZP236K_navrh.pdf

[2] **EUROCONTROL:** *Seven-Year Forecast - October 2019*. 2019 [online] [vid 27.11.2019] https://www.eurocontrol.int/publication/seven-year-forecast-flight-movements-and-service-units-autumn-2019

[3] **EUROCONTROL:** *European Aviation in 2040 - Annex 1: Flight Forecast to 2040*. 2018 [online, PDF] [vid 27.11.2019] https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-07/challenges-of-growth-2018-annex1_0.pdf

[4] **KONEČNÝ, Filip:** *Zmapování reálných parametrů kooperativních přehledových systémů.* 2016. České vysoké učení technické, Fakulta dopravní, bakalářská práce. [online, PDF] [vid 27.11.2019] https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66085/F6-BP-2016-Konecny-Filip-finale2.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[5] **EUROCONTROL:** *Eurocontrol Standard Document for Radar Surveillance in En-Route Airspace and Major Terminal Areas*. 1997. Programme Reference Index: SUR.ET1.ST01.1000-STD-01-01 [online, PDF] [vid 27.11.2019] http://www.intersoft-electronics.com/Downloads/EUROCONTROL/SURVSTD.pdf

[6] **EUROCONTROL:** *Radar Sensor Performance Analysis.* 1997 Programme Reference Index: SUR.ET01.ST01-STD-01 [online, PDF] [vid 27.11.2019] http://www.intersoft-electronics.com/Downloads/EUROCONTROL/RSPA2L.pdf

[7] **Flying In Europe:** *AAA – All Aviation Abbreviations.* 2005, 2. vydání [online, PDF] [vid 9.11.2019] http://www.unitag.co.il/assets/files/All-Aviation-Abbreviations.pdf

[8] **ICAO:** *Doc 9689 - Manual on Airspace Planning Methodology for the Determination of Separation Minima.* 1998 (změny 2002) [online, PDF] [vid 27.11.2019] https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/9689_cons_en.pdf

[9] **HOPKINS, A.David; AGARD (Advisory Group for Aerospace Research & Development):** *Human Factors in the Ground Control of Aircraft.* 1970

[10] **EUROCONTROL:** *Guidelines for the application of the ECAC radar separation minima.* 1998

[11] **ICAO:** *Doc 9924 – Aeronautical Surveillance Manual*. 2017. 2. vydání. ISBN 978-92-9258-270-8

[12] **ICAO:** *ADS-B Implementation and Operations Guidance Document*. 2014 [online, PDF] [vid 27.11.2019] https://www.icao.int/APAC/Documents/edocs /AIGD%20Edition%2011.pdf

[13] **LIN, Dr.Xunguo; FULTON, Dr. Neale; WESTCOTT, Dr. Mark:** *Target Level of Safety Measures in Air Transportation Review, Validation and Recommendations*. 2009 [online, PDF] [vid 27.11.2019] https://www.academia.edu/34091820/Target_Level_of _Safety_Measures_in_Air_Transportation_Review_Validation_and_Recommendations

[14] **THOMPSON, S. D.; Lincoln Laboratory – Massachusetts Institute of Technology:** *Terminal Area Separation Standards: Historical Development, Current Standards, and Processes for Change*. 1997 [online, PDF] [vid 27.11.2019] https://pdfs.semanticscholar.org/0634 /ee7fa518a8ed3571d8b43739241fdb534184.pdf

[15] **ROCKMAN, Mark J.:** *A Review of the Current Radar Separation Minima and Some Thoughts on Reducing Them*. 1994

[16] **ICAO:** *Doc 9869 - Performance-based Communication and Surveillance (PBCS) Manual*. 2017. 2. vydání. ISBN 978-92-9258-244-9 [online, PDF] [vid. 26.11.2019] http://www.icscc.org.cn/upload/file/20190102/Doc.9869-EN%20Performance- Based%20Communication%20and%20Surveillance%20(PBCS)% 20Manual.pdf

[17] **ICAO:** *Doc 10063 – Manual on Monitoring the Application of Performance-based Horizontal Separation Minima*. 2017. ISBN 978-92-9258-087-2 [online, PDF] [vid. 19.11.2019] http://www.icscc.org.cn/upload/file/20190102/Doc.10063-EN%20Manual%20on%20Monitoring%20the%20Application%20of%20Performance-Based%20Horizontal%20Separation%20Minima.pdf

[18] **UHLÍŘ, Ivan:** *Historie radarů.* 2017. ISBN 97880-905939-2-3

[19] **KOMISE EU:** *Prováděcí nařízení Komise (EU) č. 1207/2011.* 2011 [online] [vid 25.11.2019] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?qid=1396865968400&uri=CELEX:32011R1207

[20] **ÚCL:** [online] [vid 25.11.2019] https://www.caa.cz/dokumenty/predpisy/zakladni-informace-k-narizenim-eu/atm-ans/provadeci-narizeni-komise-eu-c-1207-2011/

[21] **ZHAO, Yiyuan J., University of Minnesota:** *A Systematic Procedure for Determining Separation Minima*. 2008
[online, PDF] [vid. 19.11.2019] http://icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2008/PAPERS/164.PDF

[22] **ICAO RGCSP:** *Doc 9465 – RGCSP/5*. 1985 (5th Meeting)

[23] **HOWARD, R. W.:** *The Aeronautical Journal 96*. 1992

[24] **CASSEL, R.; SMITH, A.:** *Development of Required Navigation Performance (RNP) Requirements for Airport Surface Movement Guidance and Control*. 1995.
ISBN 0-7803-3050-1
[online] [vid 27.11.2019] https://ieeexplore.ieee.org/document/482806

[25] **ICAO AWOP:** *Draft Manual of Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS).* 1997

[26] **OPLINKP:** *Concept of Required Communication Performance.* 2001

[27] **ICAO:** *Annex 6 – Operation of Aircraft*. 2010. 9. vydání. ISBN 978-92-9231-536-8
[online, PDF] [vid 25.11.2019] https://www.verifavia.com/bases/ressource_pdf/299/icao-annex-6-part-i.pdf

[28] **ICAO:** *Annex 11 – Air Traffic Services*. 2001 (změny 2003). 13. vydání.
[online, PDF] [vid 25.11.2019] https://www.theairlinepilots.com/forumarchive/quickref/icao/annex11.pdf

[29] **ICAO:** *Doc 4444 – Air Traffic Management*. 2016. 16. vydání. ISBN 978-92-9258-081-0
[online, PDF] [vid 25.11.2019] https://ops.group/blog/wp-content/uploads/2017/03/ICAO-Doc4444-Pans-Atm-16thEdition-2016-OPSGROUP.pdf

[30] **ICAO:** *Annex 14 – Aerodromes*. 2018. 8. vydání.

[31] **ICAO:** *Doc 8400 – ICAO Abbreviations and Codes*. 2010. 8. vydání.
ISBN 978-92-9231-626-6
[online, PDF] [vid 25.11.2019] https://skybrary.aero/bookshelf/books/3298.pdf

[32] **ICAO:** *Doc 10037 – Global Operational Data Link (GOLD) Manual*. 2016
[online, PDF] [vid 25.11.2019] https://skybrary.aero/bookshelf/books/4134.pdf

[33] **REYNOLDS, Tom G.; HANSMAN, R. John:** *Analysis of Separation Minima Using a Surveillance State Vector Approach.* 2000
[online, PDF] [vid 27.11.2019]
http://www.atmseminar.org/seminarContent/seminar3/papers/p_105_SSS.pdf

[34] **ČECH, Martin:** *Fúze sledovacích dat systémem ARTAS*. 2008. České vysoké učení technické, Fakulta dopravní, bakalářská práce.

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Vývoj počtu pohybů letadel dle FIR Praha v letech 2013-2018 13

Tabulka 2 – Požadavky na jednotlivé chyby přehledových informací 19

Tabulka 3 – Výkonnostní požadavky pro rozstupy 3 NM 21

Tabulka 4 - Výkonnostní požadavky pro rozstupy 5 NM 22

Tabulka 5 – Hodnoty použité pro parametry příčného rizika kolize v roce 1995 27

Tabulka 6 – Přehled doporučených TLS pro každou fázi letu na let/letovou hodinu 28

Tabulka 7 - Příklad měnících se hodnot maximální chyby při změně periody 39

Tabulka 8 - Specifikace RCP 49

Tabulka 9 - Specifikace RSP 52

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Průměrný roční přírůstek letů na stát v letech 2018 a 2025 14

Obrázek 2 - Průměrný roční přírůstek počtu IFR letů v Evropě do roku 2040..... 15

Obrázek 3 – Nárůst IFR letů v dlouhodobém horizontu 16

Obrázek 4 – Struktura modelu rizika kolize 30

Obrázek 5 – Příklad kombinace faktorů působících na výslednou polohovou chybu..... 36

Obrázek 6 – Aktuální a zdánlivá separace dvou letadel..... 37

Obrázek 7 – Vztah mezi horizontální chybou polohy a periodou obnovy informace 38

Obrázek 8 - Dvě trajektorie v souladu s maximální hodnotou chyby..... 40

Obrázek 9 - Příklad rozdělení chyby horizontální polohy měřené na výstupu z SSR radaru. 40

Obrázek 10 - Příklad rozdělení chyby horizontální polohy měřené na výstupu z multisensor trackeru..... 41

Obrázek 11 - Příklad rozdělení chyby horizontální pozice na výstupu z přijímače ADS-B pro NUC p=7..... 41

Obrázek 12 – Příklad rozpočtení chyby pro jeden radar módu S..... 42

Obrázek 13 – Příklad rozpočtení chyby pro multi-radar tracker 43

Obrázek 14 - Příklad rozpočtení chyby pro systém ADS-B v instalaci s NIC = 5 44

Obrázek 15 - Parametry pro model kolizního rizika podélných rozstupů 45

Obrázek 16 – Komponenty parametru τ pro normální ADS operace 46

Obrázek 17 - Komponenty parametru τ, když není přijata odpověď CPDLC a je nutná komunikace HF..... 46

Obrázek 18 - Komponenty parametru τ, když trvá periodická zpráva déle než 3 minuty..... 47

Obrázek 19 - Faktory ovlivňující horizontální rozstupy 55

Obrázek 20 - Komponenty rozstupu 5 NM 56