



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Ústav letecké dopravy

**Přehled návrhů alternativních navigačních systémů
a posouzení jejich výkonnosti**

Bakalářská práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Obor: Letecká doprava

Vedoucí práce: Ing. Tereza Topková, Ing. Stanislav Pleninger Ph. D

David Levin

Praha 2020

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):

David Levin

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – LED – Letecká doprava

Název tématu (česky): **Přehled návrhů alternativních navigačních systémů
a posouzení jejich výkonnosti**

Název tématu (anglicky): Overview of Alternative Navigation Systems Concepts and
Performance Assessment

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je vytvoření přehledu PNT systémů a jejich ohodnocení z pohledu využití v konceptu PBN
- Okolnosti vzniku alternativních navigačních systémů
- Představení jednotlivých APNT (Alternative Positioning, Navigation and Timing) systémů
- Posouzení výkonnosti systémů na základě dostupných informací
- Zhodnocení využitelnosti systémů v konceptu PBN (Performance-based Navigation)





- 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: Letecký předpis L10 - O Civilní letecké telekomunikační službě
ICAO Doc 9613 - Performance-based Navigation Manual
Odborné publikace obsahující specifikace jednotlivých APNT systémů

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

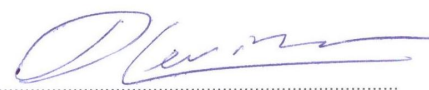
Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2019**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **10. srpna 2020**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


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


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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.


.....
David Levin
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....9. října 2019

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval paní Ing. Tereze Topkové a panu Ing. Stanislavu Pleningerovi, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce, konstruktivní připomínky a čas strávený konzultacemi. Dále děkuji panu doc. Ing. Jakubu Krausovi, Ph.D. za další cenné rady při psaní práce. Na závěr bych rád poděkoval své rodině za morální a materiální podporu po celou dobu studia.

Prohlášení

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

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

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

V Praze dne 10. srpna 2020



podpis

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá přehledem návrhů alternativních navigačních systémů a posouzením jejich výkonnosti. Součástí práce je uvedení do problematiky rušení GNSS a na základě toho popisuje zavedení APNT systémů, které by sloužily jako zabezpečení v případě, že by k rušení signálu GNSS docházelo. Výkonnost APNT systémů je posouzena z hlediska přesnosti, integrity a doplňkových charakteristik. Posouzení je doplněno o návrh zavedení těchto systémů na území Ruské federace. Na konci práce je uvedeno zhodnocení těchto systémů v konceptu s PBN.

Klíčová slova

APNT, alternativní navigační systémy, posouzení výkonnosti, Mode N, eLoran, LDACS, DME, navigace založená na výkonnosti

Abstract

This bachelor thesis provides an overview of alternative navigation positioning and timing systems and their performance assessment. Part of the work is devoted to the introduction of the issue of GNSS interference and describes the implementation of the APNT system which would provide security in the event of GNSS signal interference. The performance of the APNT system is assessed by its accuracy, integrity and additional characteristics. The assessment is followed by a proposal for the implementation of these systems on the territory of Russian federation. The work concludes with evaluation of these systems in the concept of PBN.

Keywords

APNT, alternative navigation systems, performance assessment, Mode N, eLoran, LDACS, DME, performance-based navigation

Obsah

Seznam použitých zkratk	7
Úvod	10
1 Problematika GNSS rušení v letectví	11
1.1 Architektura GNSS	11
1.1.1 Kosmický segment GNSS	12
1.1.2 Řídicí segment GNSS	13
1.1.3 Uživatelský segment GNSS	13
1.2 Princip určení polohy pomocí GNSS	13
1.3 Rušení GNSS	14
1.3.1 Antropogenní rušení	15
1.3.2 Neantropogenní rušení	16
1.3.3 Zdroje rušení	16
1.4 Případy GNSS rušení v letectví	18
1.4.1 Rušení v Iránu	18
1.4.2 Rušení v Newarku	19
1.4.3 Rušení v Koreji	19
1.4.4 Výzkumné rušení	19
1.5 Důsledky rušení GNSS v letectví	20
1.5.1 Strategie vůči budoucímu APNT systému	21
2 Představení APNT systémů	22
2.1 Požadavky pro APNT	22
2.2 LDACS	24
2.2.1 Architektura systému	24
2.2.2 Architektura framu	25
2.2.3 Komunikační služba	26
2.2.4 Navigační služba	27

2.2.5	Testování systému.....	27
2.3	eLoran.....	31
2.3.1	Princip eLoran.....	32
2.4	Mode N.....	34
2.4.1	Architektura systému	35
2.4.2	Implementace systému	36
2.5	APNT založené na systému DME.....	37
2.5.1	DME Hybrid Ranging	39
2.5.2	DME Pulse Rise Time.....	40
2.5.3	Multi – DME	41
3	Posouzení výkonnosti APNT systémů na základě dostupných informací.....	43
3.1	Posouzení výkonnosti systémů z hlediska přesnosti	43
3.2	Posouzení z hlediska integrity.....	45
3.3	Posouzení kontinuity a dostupnosti.....	46
3.4	Doplňkové charakteristiky systémů.....	47
3.4.1	Posouzení z hlediska implementace.....	47
3.4.2	Posouzení z hlediska přínosných sekundárních charakteristik systémů	49
3.4.3	Závěr posouzení z hlediska implementace a doplňkových charakteristik.....	51
3.5	Návrh zavedení APNT systémů na konkrétním území	52
4	Zhodnocení využitelnosti systému v konceptu s PBN.....	57
4.1	Posouzení APNT systémů v konceptu PBN	60
4.2	Využitelnost systémů APNT v PBN konceptu	61
	Závěr	62
	Seznam citací	64
	Seznam obrázků.....	71
	Seznam tabulek.....	73

Seznam použitých zkratk

ADS-B	Automatic Dependent Surveillance – Broadcast	Automatický závislý přehled o vzdušné situace
ASF	Additional Secondary Factor	Přídavný sekundární faktor
ATC	Air Traffic Control	Řízení letového provozu
BC	Broadcast	
CDG	Charles-de-Gaulle Airport	Letiště Charlese de Gaulla
CNS	Communication Navigation Surveillance	Komunikační, navigační a sledovací systémy
DC	Dedicated Control	
DFS	Deutsche Flugsicherung	Řízení letového provozu Německa
DLR	German Aerospace Center	Německé středisko pro letectví a kosmonautiku
DME	Distance Measuring Equipment	
DSNA	Direction Générale de l'Aviation Civile of France	Generální ředitelství pro civilní letectví ve Francii
DVOR	Doppler VOR	
ECAM	Electronic Centralised Aircraft Monitoring	Elektronický centralizovaný monitor letadla
FAA	Federal Aviation Administration	Federální letecká správa
FCOM	The Flight Crew Operating Manual	Provozní manuál letové posádky
FMS	Flight Management System	Systém řízení letu
GLONASS	Global Orbiting Navigation Satellite System	Globální navigační systém vyvinutý ruským ministerstvem obrany
GNSS	Global Navigation Satellite System	Globální navigační satelitní systém
GPS	Global Positioning System	Globální družicový polohový systém
GS	Ground Station	Pozemní stanice
ICAO	International Civil Aviation Organization	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
IRS	Inertial Reference System	Inerciální referenční systém

LDACS	L-band Digital Aeronautical Communications System	
Loran	Long Range Navigation	
LTE	Long-Term Evolution	
NDB	Non-directional Radio Beacon	Nesměrový radiomaják
NOTAM	Notice To Airmen	Poznámka pro letce
NSE	Navigation System Error	Navigační systémová chyba
OBPMA	On-Board Performance Monitoring and Alerting	Palubní monitorování výkonu a varování
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing	Ortogonalní multiplex s frekvenčním dělením
PF	Primary Factor	Primární faktor
PL	Pseudolite Network	
PPD	Personal Privacy Device	Osobní rušící zařízení
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System	Quasi-Zenith třídružicový regionální navigační systém
RA	Random Access	Náhodný přístup
RNAV	Area Navigation	Satelitní navigace
RNP	Required Navigation Performance	Požadovaná navigační výkonnost
RNSS	Radionavigation-satellite Service	Radionavigační systém
SESAR	Single European Sky ATM Research	Program Jednotné evropské nebe
SF	Secondary Factor	Sekundární faktor
SF	Super Frame	
SIS	Signal In Space	Signál v prostoru
SSR	Secondary Surveillance Radar	Sekundární radar
TAWS	Terrain Awareness and Warning System	Varování před blízkostí terénu
TMA	Terminal Manoeuvring Area	Koncová řízená oblast
TOA	Time of Arrival	Čas příchodu signálu

TOT	Time Of Transmission	Čas přenosu
UTC	Coordinated Universal Time	Koordinovaný světový čas
VOR	VHF Omni-directional Radio Range	VKV Všesměrový radiomaják
WAM	Wide Area Multi – Lateration	Multilaterační systém

Úvod

Globální navigační satelitní systém (GNSS), který byl zaveden do provozu na konci minulého století, se rychle stal jedním z nejvyužívanějších systémů pro poskytování informací o poloze v prostoru a přesném čase. S rostoucí přesností systému a vývoje augmentačních systémů GNSS byl standardizován pro lety v různých fázích. Poté Mezinárodní organizace pro civilní (ICAO) uvedlo koncept PBN – navigace založené na výkonnosti, jehož hlavním účelem je optimalizace leteckého provozu. Navigační specifikace podle PBN často vyžadují GNSS pro zajištění všech kritérií navigační výkonnosti, zejména pro specifikaci RNP (požadovaná navigační výkonnost). S rostoucí popularitou se z různých důvodů začalo vyskytovat rušení signálu. Toto rušení má několik typů a každý z těchto typů je schopen vyvolat poklesnutí navigační výkonnosti, což může mít za následek ovlivnění bezpečnosti a efektivity vzdušného provozu. I v případě, kdy systém není ovlivňován rušením z externího zdroje, může docházet k ovlivnění signálu GNSS antropogenními zdroji rušení.

V současné době patří mezi systémy, které zastupují GNSS v případě rušení anebo výpadku, systémy DME/DME (Distance Measuring Equipment), nebo kombinace DME se systémy VOR (VKV Všesměrový radiomaják) nebo DVOR (Doppler VOR), které však nedokážou podporovat náročnější navigační specifikace PBN. Budoucí APNT řešení by mělo zmírnit závislost letecké dopravy na globálním navigačním satelitním systému a podporovat a splňovat náročnější navigační specifikace, zejména v kritičtějších fázích letu.

Cílem této bakalářské práce je představit jednotlivé APNT systémy pro řešení výše popsaných problémů rušení GNSS. Dalším krokem je posouzení výkonností jednotlivých APNT systémů na základě dostupných informací. V této části jsou představeny také doplňkové charakteristiky a schopnosti systémů, které jsou následně vyhodnoceny za účelem vytvoření přehledu o daném tématu. Závěrem části o posouzení výkonnosti je návrh zavedení těchto systémů na konkrétním území. Právě na tomto příkladu jsou představeny možnosti implementace APNT systémů.

V závěrečné části práce je představen koncept PBN a jedna z jeho specifikací, obsahující nejnáročnější požadavky, je porovnána se zjištěnými charakteristikami systémů APNT.

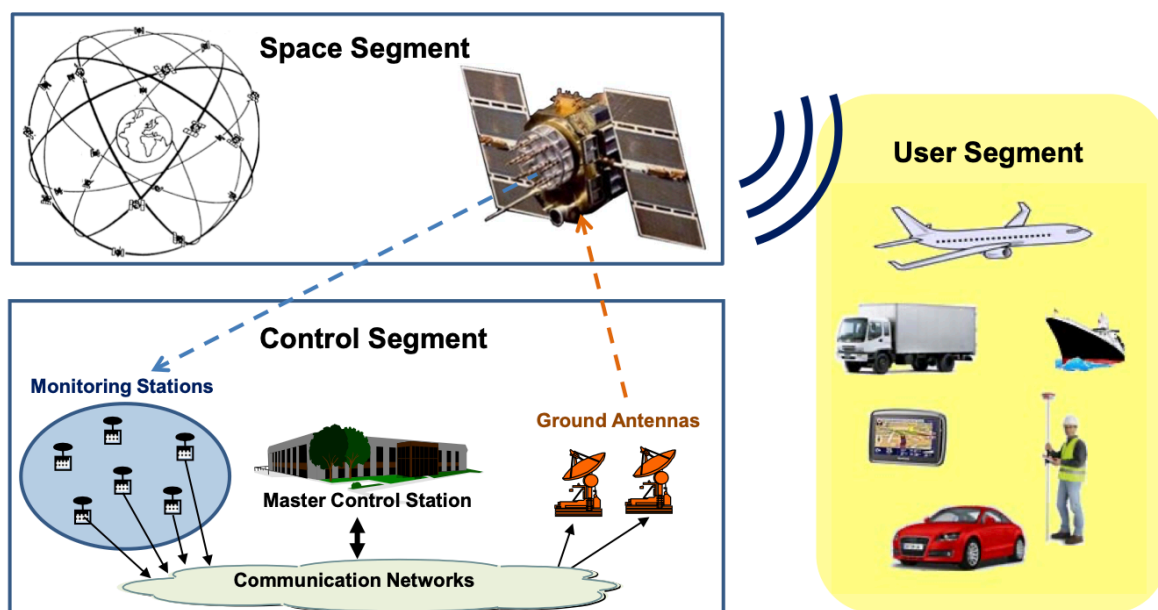
1 Problematika GNSS rušení v letectví

Rozvoj satelitní navigace začal v 70. letech dvacátého století a původně sloužil pro vojenské účely. S dalším rozvojem satelitních technologií GNSS se stal důležitým zdrojem informace o poloze a času v různých oblastech i v civilním sektoru. Systém se skládá z několika globálních satelitních systémů: amerického GPS, ruského GLONASS, evropského Galileo a čínského BeiDou. Dále GNSS zahrnuje další systémy zaměřené regionálně, jako indický RNSS (Radionavigation-satellite Service) či japonský QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), a systémy zlepšující výkonnost samostatných globálních systémů, tzv. augmentační systémy. Díky soustavě satelitů obíhajících kolem Země, nepřetržitě vysílající signály, umožňuje GNSS uživatelům určit jejich polohu v prostoru s globálním pokrytím. [2, 47]

Po mnoho let byl jediným plně funkčním systémem GNSS americký globální poziční systém (GPS). Ruský satelitní systém GLObal NAVigation Satellite System (GLONASS) byl obnoven do plného provozu v prosinci 2011. Až poté byly uvedeny do provozu čínský systém BeiDou a evropský Galileo. [2]

1.1 Architektura GNSS

Architektura GNSS se skládá ze tří hlavních segmentů: kosmického segmentu, který je reprezentován družicemi, uživatelského segmentu, který je reprezentován GNSS přijímači, a segmentu řídicího, který je reprezentován řídicími stanicemi, viz obrázek č. 1. [2]



Obrázek 1: Segmenty GNSS. [2]

1.1.1 Kosmický segment GNSS

Hlavní funkcí kosmického segmentu je generování a vysílání signálů pro zjištění polohy a vysílání navigační zprávy nahrané řídicím segmentem. Tyto přenosy jsou řízeny vysoce stabilními atomovými hodinami na palubě satelitů. Kosmické segmenty GNSS jsou tvořeny družicemi obíhajícími kolem Země v několika oběžných drahách se snahou zajistit, aby měli uživatelé kdykoli v dohledu potřebný počet satelitů pro zjištění polohy. V následující tabulce č. 1 jsou shrnuty základní informace o těchto systémech GNSS. [2]

Tabulka 1: Přehled parametrů kosmického segmentu globálních navigačních systémů. [1]

Systém	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
Stát	USA	Ruská federace	Evropa	Čína
Množství satelitů	30 + 1*	24 + 3*	21 + 5*	43 + 6*
Inklinace	55°	64.8°	56°	55°
Orbitální perioda	11 h 58 m	11 h 15 m	14 h 5 m	12 h 50 m

*z různých důvodů se momentálně nepoužívají

1.1.2 Řídicí segment GNSS

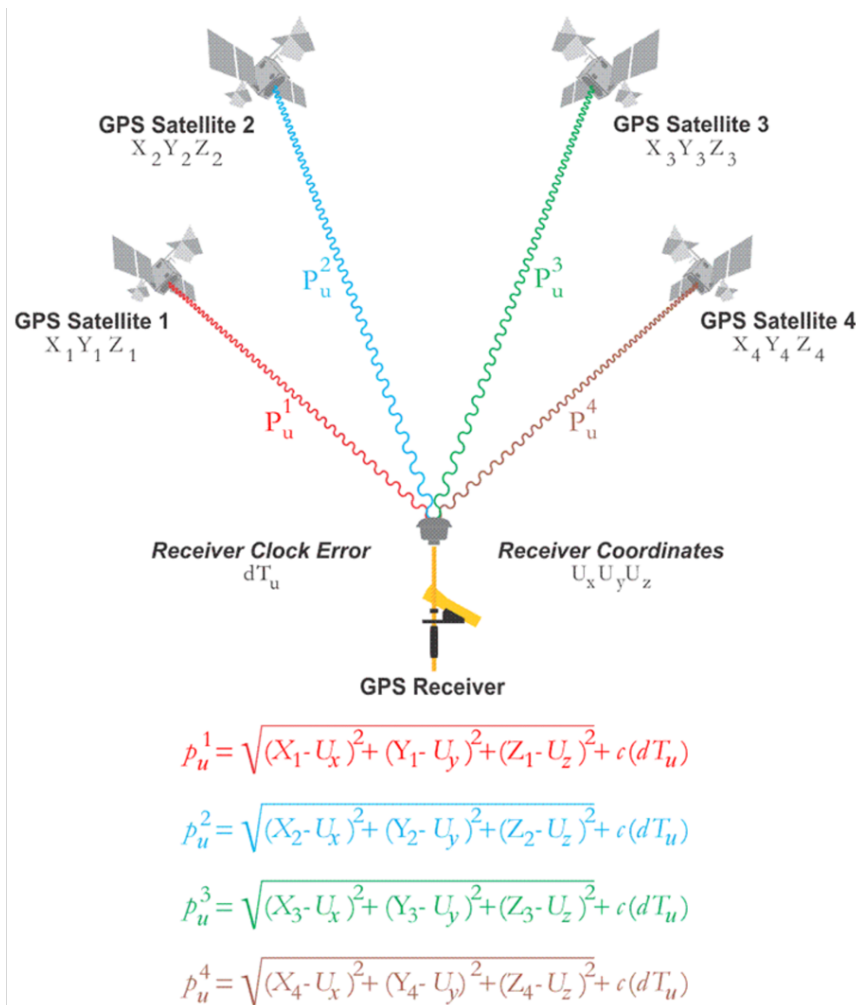
Řídicí segment je zodpovědný za řádný provoz GNSS. Jeho základní funkce jsou: řídit a udržovat stav a konfiguraci satelitní konstelace, předpovídat chyby efemerid a satelitních hodin, aktualizovat navigační zprávy pro všechny satelity. [2]

1.1.3 Uživatelský segment GNSS

Uživatelský segment se skládá z přijímačů GNSS. Jejich hlavní funkcí je přijímat signály GNSS, určovat pseudovzdálenost a řešit navigační rovnice za účelem získání souřadnic a poskytnutí velmi přesného času. [2]

1.2 Princip určení polohy pomocí GNSS

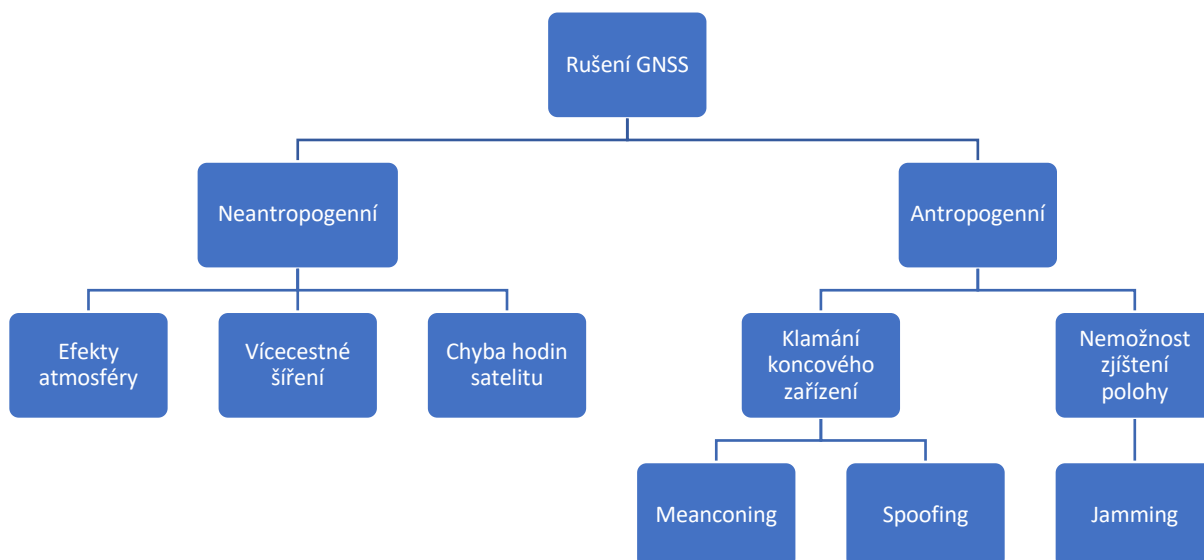
Princip určení polohy pomocí GNSS je založen na měření pseudovzdálenosti, která se liší od klasické vzdálenosti o časový posun. Tím, že družice vysílají navigační zprávu, kde uvádějí svoje označení, polohu a čas vysílání, lze zjistit vzájemnou vzdálenost mezi satelitem a přijímačem, přesněji kulovou plochu, na které se přijímač může nacházet. Po zjištění tří pseudovzdáleností lze vypočítat křížení těchto kulových ploch, na kterém se přijímač nachází. Další satelit je potřebný pro zjištění chyby hodin přijímače, což je čtvrtou neznámou ve výpočtu. Princip určení polohy a zmíněná rovnice pro její výpočet jsou znázorněny na obrázku č. 2.



Obrázek 2: Princip zjištění polohy GNSS. [9]

1.3 Rušení GNSS

Signál GPS je signál s nízkým výkonem. Společnost Airbus definuje, že signál je srovnatelný s energií vyzařovanou 60 W žárovkou umístěnou více než 20 000 km od povrchu Země. To znamená, že signál může být snadno narušen jakýmkoli pozemním zdrojem umístěným v blízkosti přijímače a fungujícím ve frekvenčním pásmu GPS. Z důvodu slabého signálu je GNSS náchylný k rušení. Rušení se dá rozdělit podle původu na neantropogenní, které lze dále dělit dle příčiny rušení, a antropogenní rušení. Rozdělení rušení GNSS je ukázáno na obrázku č. 3. [3]



Obrázek 3: Rozdělení GNSS rušení. Zdroj: autor

1.3.1 Antropogenní rušení

První a nejčastější skupinou je jamming. Jamming probíhá prostřednictvím vysílání signálu na blízké frekvenci s větším výkonem a větší hladinou šumu, což způsobuje zarušení slabě přijímaného signálu z družice a zabraňuje příjmu signálu v přijímači. To znamená, že GNSS přijímač nedokáže určit polohu. Ztráta GNSS signálu nutí piloty využívat jiných navigačních prostředků, které mohou mít za následek poklesnutí navigační výkonnosti. [4, 62]

Spoofing a meanconing

Další skupinu rušení GNSS můžeme označit jako spoofing a meanconing zařízení, jejichž použití je složitější a dražší. Meanconing rušící zařízení funguje současně jako přijímač a vysílač. Zařízení přijme GNSS signál z družic a ve stejné podobě vysílá signál s časovým zpožděním a vysokým výkonem. Způsoby spoofing rušení se dají rozdělit do dvou variant.

Dostupný zdroj uvádí: „V první variantě je GNSS přijímač nejdříve zarušen pomocí jamming techniky. Přijímač přestává sledovat originální signál a přechází do fáze re-akvizice, kdy začíná sledovat silnější spoof signál z rušičky. V druhém případě se falešný signál postupně zarovnává s autentickým signálem a postupně zvyšuje svůj výkon. Přijímač se následně přichytí na silnější falešný signál a udává nesprávnou polohu.“ [4]

Výsledkem obou těchto typů rušení je zobrazení klamné pozice na koncovém zařízení, což v případě letecké dopravy může způsobit zmatení posádky. [4, 5]

1.3.2 Neantropogenní rušení

Neantropogenní rušení zahrnuje efekty atmosféry, chyby hodin satelitu a vícecestné šíření, které má za následek zhoršení přesnosti. Přibližné chyby, které může způsobit neantropogenní typ rušení obsahuje tabulka č. 2. [6]

Tabulka 2: Chyba polohy GNSS při neantropogenním rušení. [6]

Zdroj rušení	Chyba
Ionosferický efekt	± 5 m
Troposferický efekt	± 0.5 m
Efemeridická chyba	± 2.5 m
Chyba hodin satelitů	± 2 m
Vícecestné šíření	± 1 m

1.3.3 Zdroje rušení

Zdroje rušení se mohou lišit v závislosti na typu a účelu rušení. Dále jsou uvedeny nejčastější zdroje rušení signálu GNSS.

Personal Privacy Device

Široké využívání podobných zařízení, jako je PPD (Personal Privacy Device), je způsobeno lidskou obavou, že GNSS přijímač v jejich vozidle nebo mobilu dovoluje sledování jejich pozice. Pořídit si takové zařízení za nízkou cenu přes internet není problém, přestože je zakázáno ve většině států. Přestože většina PPD disponuje malou výkonností, která umožňuje rušení signálu v rozsahu 2–10 metrů, lze za vyšší pořizovací cenu koupit PPD s větším výkonem schopné produkovat rušení v rozsahu stovek metrů. Takové rušení může způsobit ztrátu signálu letadla při vzletu a přistání na letištích, které mají silnice nebo parkoviště vedle airside. [7]

Různé ceny PPD a informace o jejich dosahu jsou představeny na obrázku č. 4.



Obrázek 4: Přehled PPD. [8]

Vojenské rušení

Vojenské rušení se může vyskytnout v krizových situacích. V případě, že se armáda rozhodne oslabit taktické možnosti nepřítele i za cenu oslabení svých. Takový způsob rušení může také způsobit ztrátu signálu GNSS za letu, pokud je příliš blízko k oblastem vojenského konfliktu. Tyto oblasti jsou často známy a pomocí NOTAMů (Notice To Airmen) informují letové posádky, že mohou v blízkosti těchto oblastí narazit na rušení. Může se stát, že vojenská činnost není známa předem nebo není sdělena, což vede ke ztrátě signálu GNSS bez předchozího upozornění. [3]

Na obrázku č. 5 je ruský vojenský komplex Krasnucha – 4, zaměřen na rušení radiosignálů různých frekvencí.



Obrázek 5: Krasnucha – 4. [10]

Ochrana VIP a citlivých areálů

Určité citlivé areály, jako jsou nápravná zařízení, nebo areály, kde bydlí nebo se navštěvují politici a významní lidé, mohou být chráněny z bezpečnostních důvodů. [3]

GNSS repeatery

GPS repeatery mohou být použity například ke zpřístupnění signálu GPS uvnitř hangáru během údržby letadel. Signály GPS opakovače způsobily rušení se skutečným signálem GPS v některých hlášených událostech, což způsobilo problémy s příjmem na palubě letadla umístěném blízko hangáru. [3]

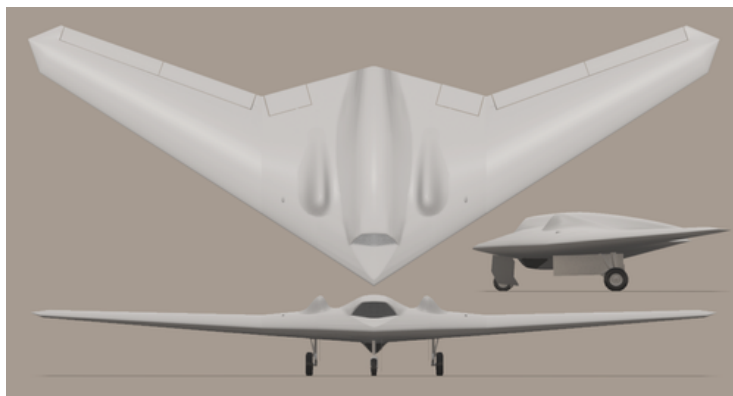
Mezi další zdroje rušení patří televizní vysílání, signály některých radarů a systémy mobilní satelitní komunikace. [3]

1.4 Případy GNSS rušení v letectví

Rušení GNSS se vyskytuje v současné době často. Výsledky sledování GNSS jammingu na dálnici v Mnichově ukázaly 6 případů rušení za týden, sledování poblíž Londýna ukázalo 10 případů za den. V roce 2018 obdržela IATA (Mezinárodní asociace leteckých dopravců) několik stovek hlášení o ztrátě signálu GNSS od 60 leteckých společností. Ve většině případů se jednalo o pozemní rušící zařízení. Dále je představeno několik příkladů těchto rušení. [4, 11]

1.4.1 Rušení v Iránu

Významným případem rušení během vojenských konfliktů je "*Iran - U.S. RQ - 170 incident*". Bezpilotní vzdušný prostředek Lockheed Martin RQ-170 Sentinel, na obrázku č. 6, byl zabaven íránskou armádou pomocí GPS spoofingu v prosinci 2011. Poté, co byl nejprve tento incident popřen, o několik dní později byl potvrzen americkými vojenskými zdroji. [3, 5]



Obrázek 6: UAV Lockheed Martin RQ-170 Sentinel. [12]

1.4.2 Rušení v Newarku

Jeden z nejznámějších případů rušení GNSS pomocí PPD je Newark, USA. Letiště je obklopeno dálnicemi a v některých oblastech je vzdálenost mezi airfieldem a dálnicí menší než možný dosah rušičky, obrázek č. 7. Řidič UPS (Globální zasilatelské a logistické služby) používal PPD na dálnici hned vedle letiště, což vedlo k pravidelným hlášením v augmentačním systému GBAS (pozemní síť korekčních stanic) a mělo za následek nedostupnost přistávacích postupů pomocí GNSS. Přestože byl zatčen řidič UPS, který nevěděl o způsobeném rušení letištního GBAS, uvádí se, že na letišti v Newarku stále existuje několik podobných incidentů. [5]



Obrázek 7: Dálnice vedle airfieldu na letišti v Newarku. [34]

1.4.3 Rušení v Koreji

Jižní Korea uvažuje o opuštění použití GNSS pro navigaci ku prospěchu APNT kvůli silnému rušení GNSS ze Severní Koreje. Uvádí se, že během 16 dnů od rušení severokorejských sil došlo k narušení systému GNSS u více než 1 000 letadel a 250 lodí. [5]

1.4.4 Výzkumné rušení

V letech 2013 a 2014 používali američtí vědci z univerzity v Austinu v Texasu svůj spoofer vlastní výroby, aby úspěšně demonstrovali spoofing útok na UAV (Bezpilotní letadlo) a na jachtu. Jachta držela svůj kurz podle GNSS řízeného autopilota. Pomocí jejich spooferu vědci způsobili, že se jachta pohybovala ze strany na stranu, i když autopilot stále hlásil původní přímý průběh. [5]

1.5 Důsledky rušení GNSS v letectví

Pokud dojde k identifikaci rušení na palubě letadla, může to způsobit různé následky. GNSS představuje ve většině případů primární zdroj informací o poloze letadla, což znamená, že velký význam z bezpečnostního pohledu a z pohledu efektivity tím, že umožňuje dosažení vysoké navigační výkonnosti, která mezitím dává možnost zvětšení hustoty provozu. [13]

Po ztrátě signálu GNSS FMS přepíná navigační módy v následujícím pořadí:

1. IRS/GNSS
2. IRS/DME/DME
3. IRS/VOR/DME
4. IRS [13]

Přesnost GNSS s využitím augmentačních systémů dosahuje mnohem větší přesnosti, než DME/DME nebo VOR/DME. Z tohoto důvodu lze jednoznačně mluvit o poklesu navigační výkonnosti. Následující tabulka č. 3 znázorňuje porovnání výkonnostních parametrů dvou navigačních služeb při použití prostorové navigace.

Tabulka 3: Porovnání výkonnosti GNSS a DME/DME/IRS. [14]

PBN specifikace	Použité navigační zařízení	
	GNSS	DME/DME/IRS
RNAV 10	ANO	
RNAV 5	ANO	ANO
RNAV 2/1	ANO	ANO
RNP 4	ANO	
RNP 2	ANO	
RNP 1	ANO	
A-RNP	ANO	
RNP 0.3	ANO	
RNP APCH	ANO	ANO (v některých státech)
RNP AR APCH	ANO	

Z tabulky lze vidět, že v případě výpadku GNSS nejsou dostupné výkonnostní specifikace RNP s výjimkou užití DME/DME/IRS v některých státech. [14]

Rušení GNSS může také způsobit neočekávané chování různých komunikačních a přehledových systémů. V některých případech tak mohou vzniknout chyby v systému Varování před blízkostí terénu (TAWS) a vyvolání varování „terrain-pull up“. Pokud dojde k výpadku signálu GNSS, nebudou vysílány informace o poloze letadla ani v polohových zprávách ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast). [11]

Pro minimalizaci dopadu na bezpečnost společnost Airbus doporučuje postup pro chování posádky při výpadku GNSS. V předletové fázi při plánování letu se doporučuje zvážit NOTAM zprávu, zda obsahuje informaci o známých nebo očekávaných oblastech GNSS RFI. Pokud se na let vztahuje NOTAM, musí být pro nebezpečnou oblast zkontrolována dostupnost tras, které nejsou založeny na GNSS. V případě, že během letu dojde ke ztrátě signálu nebo rušení GNSS, se posádka musí řídit postupy ECAM (Electronic Centralised Aircraft Monitoring) nebo FCOM (Flight Crew Operating Manual), a pokud ztráta signálu proběhne v oblasti, kde je podle pravidel požadované vybavení letadla ADS-B OUT, měla by letová posádka oznámit ztrátu signálu ATC. Po ukončení letu se zaznamenaným GNSS rušením by měla letová posádka nahlásit událost údržbě, aby prozkoumala a potvrdila, zda k události došlo kvůli rušení nebo v důsledku chyby avioniky letadla. Provozovatelé by měli hlásit jakékoli zjištěné podezřelé události regionálním a mezinárodním organizacím. To usnadní a urychlí potvrzení nebo řešení rušení GNSS a umožní zveřejnění NOTAM ke sdílení informací všem ostatním provozovatelům létajícím v okolí postižené oblasti. [3]

1.5.1 Strategie vůči budoucímu APNT systému

Z důvodů zranitelnosti GNSS, popsanych výše, ICAO doporučuje státům aktivně podporovat rozvoj budoucího APNT systému. Cílem strategie APNT by mělo být zachování bezpečnosti a v co největší míře přijatelné úrovně letových navigačních služeb v případě dlouhodobých výpadků nebo rušení GNSS. [88] V roce 2012 na konferenci ICAO vyjádřilo potřebu podpory alternativních systémů pro určení polohy, navigace a určení času s cílem udržet letecké navigační služby v maximální možné míře v případě výpadku signálu GNSS. V posledních letech došlo k velkému pokroku ve vývoji APNT. [15]

2 Představení APNT systémů

V předchozí kapitole byly popsány slabiny GNSS, které by mohly být eliminovány zavedením APNT systémů. Tato kapitola bude zaměřena na představení jednotlivých APNT systému. Různé subjekty, které jsou zaměřeny na vývoj těchto systémů uvažují různé varianty APNT s možnostmi využití již existující infrastruktury radionavigačních zařízení a jejich technické specifikace.

Požadavky na APNT systémy nejsou v současné době mezinárodně stanoveny ICAO. V následující podkapitole budou představeny přístupy k požadavkům na APNT dle regionálních projektů zaměřených na vývoj a transformaci technologií v letectví v rámci amerického NextGen a Jednotného evropského nebe (SES).

2.1 Požadavky pro APNT

FAA definuje 4 hlavní pilíře, které musí podporovat budoucí APNT systém. Mezi tyto pilíře patří zajištění bezpečnosti s možností provedení bezpečného přistání za zhoršených meteorologických podmínek při letu podle přístrojů a pokračování letu během rušení GNSS bez významného zvýšení pracovní zátěže posádky. Další pilíře by měly zajistit kapacitu a efektivitu, například díky modifikaci trati, aby se letadlo vyhnulo zónám rušení GNSS. [7]

Současně FAA stanovuje výkonnostní požadavky pro budoucí APNT systémy, které zobrazuje obrázek č. 8.

		Navigation (≥ 99.0% Availability)		Surveillance (≥99.9% Availability)			Positioning	
		Accuracy (95%)	Containment (10 ⁻⁷)	Separation	NACp (95%)	NIC (10 ⁻⁷)	GNSS PNT (99.0 – 99.999%)	
APNT	En Route	*10 nm	20 nm	5 nm	308m (7)	1 nm (5)	GPS	
		*4 nm	8 nm					
		*2 nm	4 nm					
	Terminal	*1 nm	2 nm	3 nm	171m (8)	0.6 nm (6)	DME Only Gap	
	LNAV	*0.3 nm	0.6 nm					
RNP (AR)	*0.1 nm	**0.1 nm	2.5 nm DPA	171m (8)	0.2 nm (7)	SBAS		
LPV	16m/4m	40m/50m	2.5 nm DPA	171m (8)	0.2 nm (7)			
LPV-200	16m/4m	40m/35m						
GLS Cat-I	16m/4m	40m/10m	2.0 nm IPA	121 m (8)	0.2 nm (7)	GBAS		
GLS Cat-III	16m/2m	40m/10m						

* Operational requirements are defined for total system accuracy, which is dominated by fight technical error. Position accuracy for these operations is negligible.
** Containment for RNP AR is specified as a total system requirement; value representative of current approvals.

Obrázek 8: Výkonnostní požadavky FAA pro APNT systémy. [7]

V levém sloupci jsou uvedeny typy navigací a přiblížení. V pravém sloupci potom systémy, které v současné době splňují požadavky z prostředního sloupce. Pro dosažení těchto výkonnostních charakteristik FAA především vyvíjí a zkoumá systémy WAM (Wide Area Multi – Lateration), eDME a PL (Pseudolite Network). [14]

Jedním z projektů evropského SESAR JU je zavedení záložního systému pro GNSS. Projekt definoval určité požadavky pro budoucí APNT a rozdělil je do tří kategorií: podpora navigace, podpora ADS-B OUT a poskytování přesného času pro palubní systémy. Mezitím jsou tyto požadavky definovány na určité fáze projektu: krátko/střednědobé a dlouhodobé. [18]

Předmětem projektu je nejen definovat požadavky, ale také posoudit vybrané systémy, zda jsou schopny podporovat stanovené požadavky. Evropský SESAR považuje za konkrétní APNT systémy následující:

- LDACS
- DME/DME
- Multi DME
- eLoran [18]

Tyto systémy jsou zamýšleny pro různé období implementace definované Eurocontrolem:

1. Současnost, ve které se používá DME/DME(/IRS) a jen některé tratě jsou podporovány současnými APNT systémy.
2. Krátkodobé řešení, ve kterém nebudou zavedeny nové technologie, ale bude provedena EuroCAE WG 107 – účelem je revize existujícího dokumentu ED-57 „Minimum Performance Specification for Distance Measurement Equipment (DME/N and DME/P) – Ground Equipment” a vytváření dokumentu “Minimum System Performance Specification (MASPS) for DME Infrastructure Supporting PBN Positioning”.
3. Dlouhodobé řešení je zaměřeno na podporu RNP 1 pro výšky FL100 a výš a RNP 0.3 ve vybraných TMA.
4. Velmi dlouhodobé řešení by mělo podporovat RNP 0.1. [19, 60, 61]

V následujících podkapitolách budou představeny právě APNT systémy uvažované pro zavádění v Evropě spadající pod projekty včetně dosud nejmenovaného systému Mode N, které spadají pod projekty SESAR JU.

2.2 LDACS

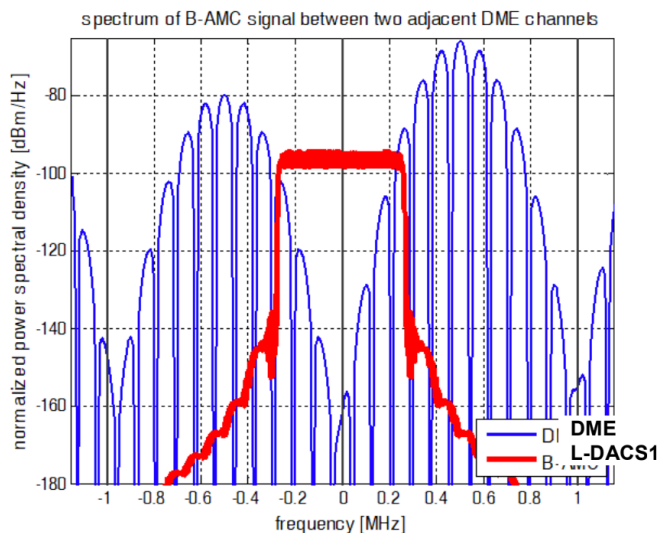
Tato část představení alternativních navigačních systémů bude zaměřena na systém LDACS (L-band Digital Aeronautical Communications System). Systém vyvíjí DLR (Německé středisko pro letectví a kosmonautiku) a je určen k poskytování komunikačních a navigačních služeb. Systém není založen na žádném z existujících systémů používaných v letectví. V současné době bylo provedeno testování a probíhá proces standardizace ICAO. [20]

2.2.1 Architektura systému

Systém LDACS funguje na základě sítě pozemních stanic, které pracují na různých kmitočtech. Komunikace mezi pozemní stanicí (GS) a letadlem (A/C) je zajištěna použitím OFDM¹ (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) technologie. LDACS dodržuje obousměrný mód vysílání, kde pro vzestupný spoj je vymezeno pásmo 985.5–1008.5 MHz a pro sestupný spoj 1048.5–1071.5 MHz. [18] Kanálová separace systému je 1 MHz, což umožňuje vysílání mezi dvojicemi pulzů DME bez vyvolání interference, obrázek č. 9.

¹ OFDM – je modulační technika, která využívá k přenosu dat velkého množství úzkopásmových nosných kmitočtů, které jsou navzájem ortogonální. [63]

Dále pro zmírnění interference mezi systémem LDACS a systémem DME, jehož síla impulzu může být výrazně větší než výkon LDACS, je nabízeno několik algoritmů pro řešení tohoto problému. Tyto algoritmy by měly zajistit spolehlivý provoz systému LDACS i při zvýšené interferenci ze strany ostatních systémů pracujících v pásmu L. [18]

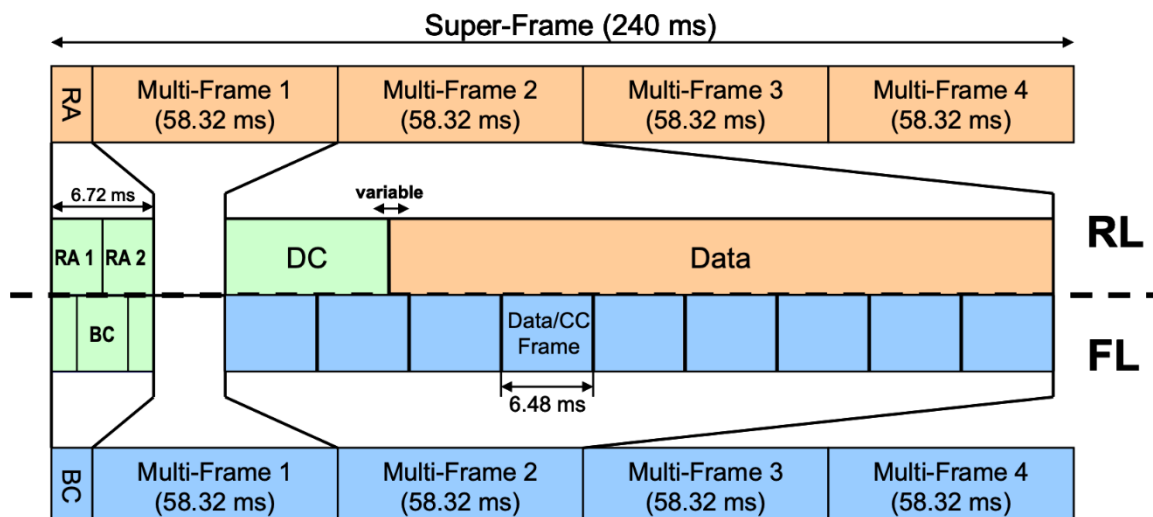


Obrázek 9: Signál LDACS mezi pulzy DME. [18]

2.2.2 Architektura framu

Systém je založen na vysílání super framů (SF), které zajišťují přenos dat pro poskytování komunikační a navigační služby. Architektura SF se liší u vzestupného a sestupného spoje. Tyto framy se vysílají pomocí výše zmíněné modulace OFDM a jejich délka je 240 ms. SF se dělí na 5 částí, které zaleží na typu spoje. Obsahem SF vzestupného spoje jsou 4 multi framy a 1 RA (Random Access), obsahem SF sestupného spoje jsou 4 multi framy a 1 BC (Broadcast).

Rozdělení SF je znázorněno na obrázku č. 10. [21]



Obrázek 10: Struktura framů LDACS. [22]

Jak je ukázáno na obrázku č. 10, obsah multi framů se liší v závislosti na typu spoje. Při vzestupném spoji každý čtvrtý multi frame obsahuje devět Data/CC framů. Při sestupném spoji každý čtvrtý multi frame obsahuje DC (Dedicated Control) framy a Data framy, jejich velikost se může měnit v závislosti na vysílané informaci. Každý Data/CC frame a BC frame, který se dále dělí na BC1, BC2 a BC3 framy, obsahuje na začátku synchronizační symboly. Synchronizační symboly jsou používány pro stanovení doby příjmu signálu GS na palubě letadla. [22, 21]

2.2.3 Komunikační služba

Komunikace pomocí LDACS využívá technologie mobilních sítí a jako LTE systémy používá OFDM jako modulační princip. OFDM je širokopásmová modulace využívající frekvenční dělení kanálu, která je využívána například v technologiích Wi-Fi 802.11ac a ve 4G. Technologie mobilních sítí dělí prostor na buňky. Buňkou je myšleno území o určitých rozměrech, které obsahuje svou vysílací a přijímací část. Tvar buněk se v idealizovaných případech volí jako šestiúhelník z důvodu neoptimálnějšího pokrytí prostoru, aby se signály jednotlivých stanic, které jsou umístěny uprostřed šestiúhelníku, nepřekrývaly a zaplňovaly co nejvíce prostoru. Pomocí sestupného spoje signál přijímá příslušná stanice a dále předává pomocí telekomunikačních linek. Při vysílání SF multi framy, které jsou součástí SF, obsahují zakódovanou komunikační zprávu – data link. Zejména Data/CC, DC a Data framy. [23, 31]

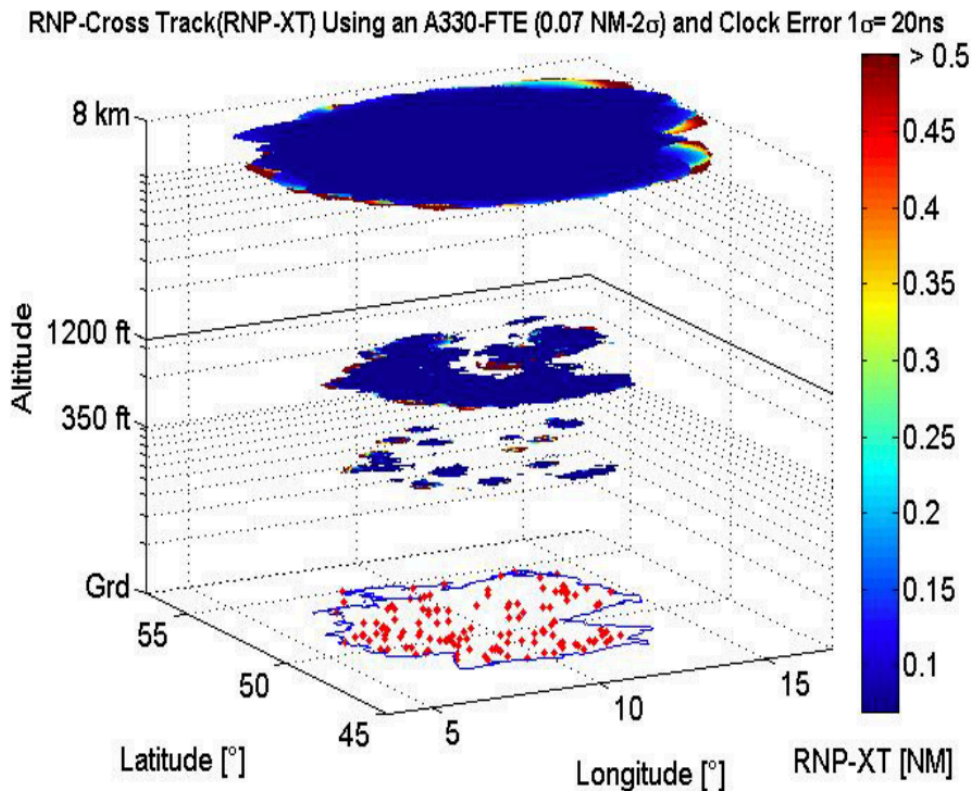
2.2.4 Navigační služba

Zjištění polohy probíhá měřením vzdálenosti od letadla do pozemní stanice. Stanice neustále vysílají vzestupné signály. Letadlo, které vstoupí do buňky s LDACS pokrytím, stanoví čas přijetí vzestupného signálu podle synchronizačních symbolů a posílá sestupný signál, který obsahuje synchronizační symboly. Všechna letadla v LDACS buňce se synchronizují, což zajišťuje synchronní vysílání sestupných signálů ze všech letadel. Letadla vysílají čas přijetí signálu a stanice, pro kterou je čas vysílání znám, vypočítá a vysílá zpátky rozdíl času vzestupným spojem. Použitím informace o rozdílu času mezi vysíláním a přijetím signálu ze 3 stanic a informací o umístění stanic je letadlo schopno určit polohu v prostoru. Alternativním způsobem zjištění polohy je zavedení další proměnné, kterou je čas vysílání signálu pozemní stanice do procesu výpočtu. Posledním způsobem je potřeba provádět měření z alespoň čtyř stanic. Navigační služba byla otestována a výsledky testování budou představeny v následující části. [24, 22]

2.2.5 Testování systému

V roce 2013 byl systém vyzkoušen použitím 4 stanic s rozestupem přibližně 50 km. Zkoušku uskutečňovala DLR použitím letadla Falcon. Na základě těchto výsledků byl simulován model systému se 159 stanicemi přes Německo. [18, 25]

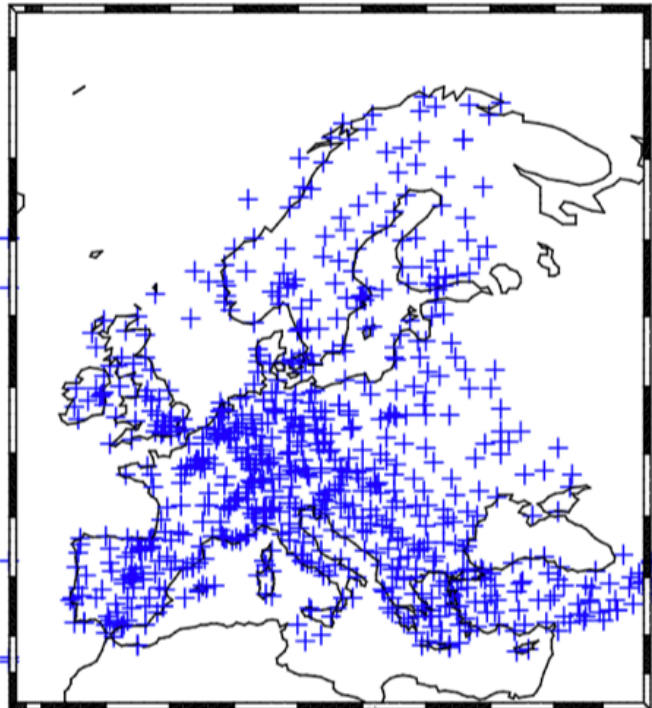
Červené tečky dole na obrázku č. 11 reprezentují umístění LDACS stanic (stanice nainstalované jako nadstavba DME/VOR stanic). Namodelovaná chyba času je 20 ns.



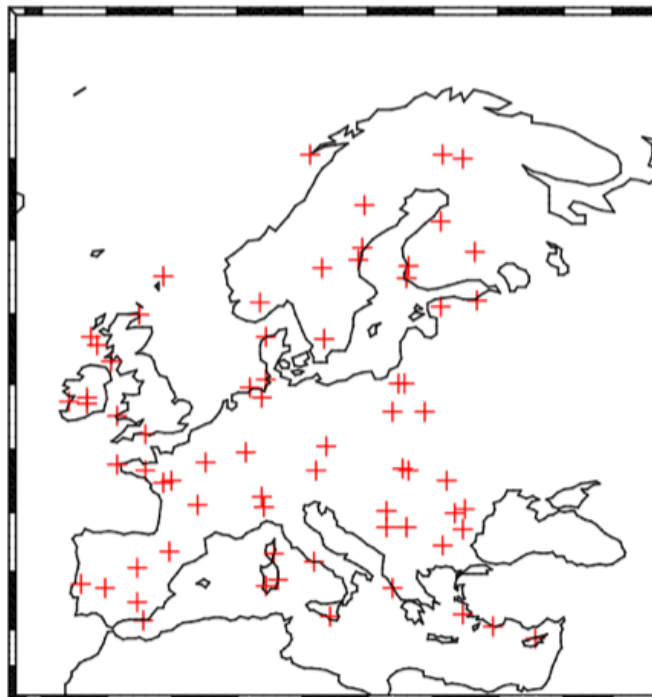
Obrázek 11: Výsledky modelace DLR v Německu. [25]

Výsledkem modelace byly hodnoty navigační výkonnosti v různých výškách – 350 ft (106.7 m), 1200 ft (365.8 m) a 8 km. Barevné plochy na obrázku udávají navigační výkonnost v těchto výškách. Ve výšce 350 ft byla největší navigační výkonnost dosažena jen v malých oblastech s vysokou hustotou stanic. Důvodem toho je zakřivení země, které zabraňuje viditelnosti LDACS stanic z paluby letadla. Z výšky 8 km lze dosáhnout vysoké navigační výkonnosti ve velkém rozsahu. [18, 25]

Výzkum v rámci Evropy byl představen ICAO v roce 2015 a byly použity 787 DME a 69 LDACS stanic. V rámci výzkumu byla posouzena přesnost systému. Na následujících dvou obrázcích je znázorněno umístění těchto stanic. Na obrázku č. 12 modrou barvou je označena poloha DME stanic použitých při měření a na obrázku č. 13 červenou barvou je označena poloha LDACS stanic. [18]



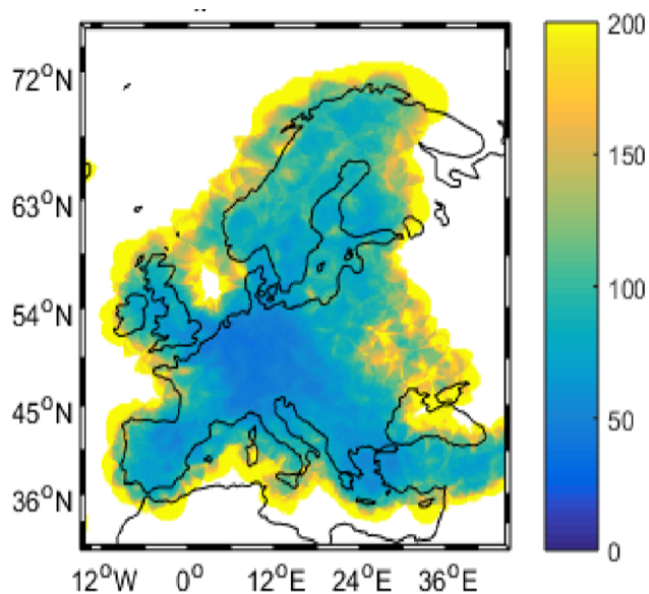
Obrázek 12: Umístění DME stanic. [18]



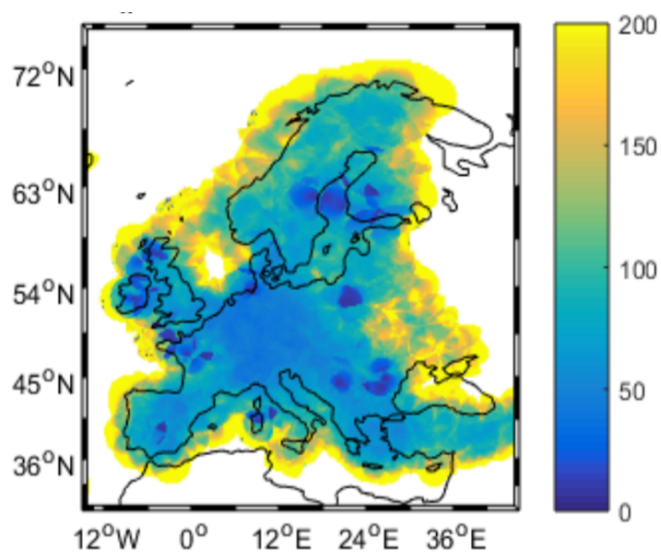
Obrázek 13: Umístění LDACS stanic. [18]

Očekávaná přesnost systému kolem stanic LDACS je mnohem větší, což je dáno tím, že systém LDACS poskytuje mnohem větší přesnost než DME. [18]

Obrázek č. 14 znázorňuje přesnost sítě DME z obrázku č. 12. Další obrázek č. 15 znázorňuje přesnost kombinace DME a LDACS stanic.



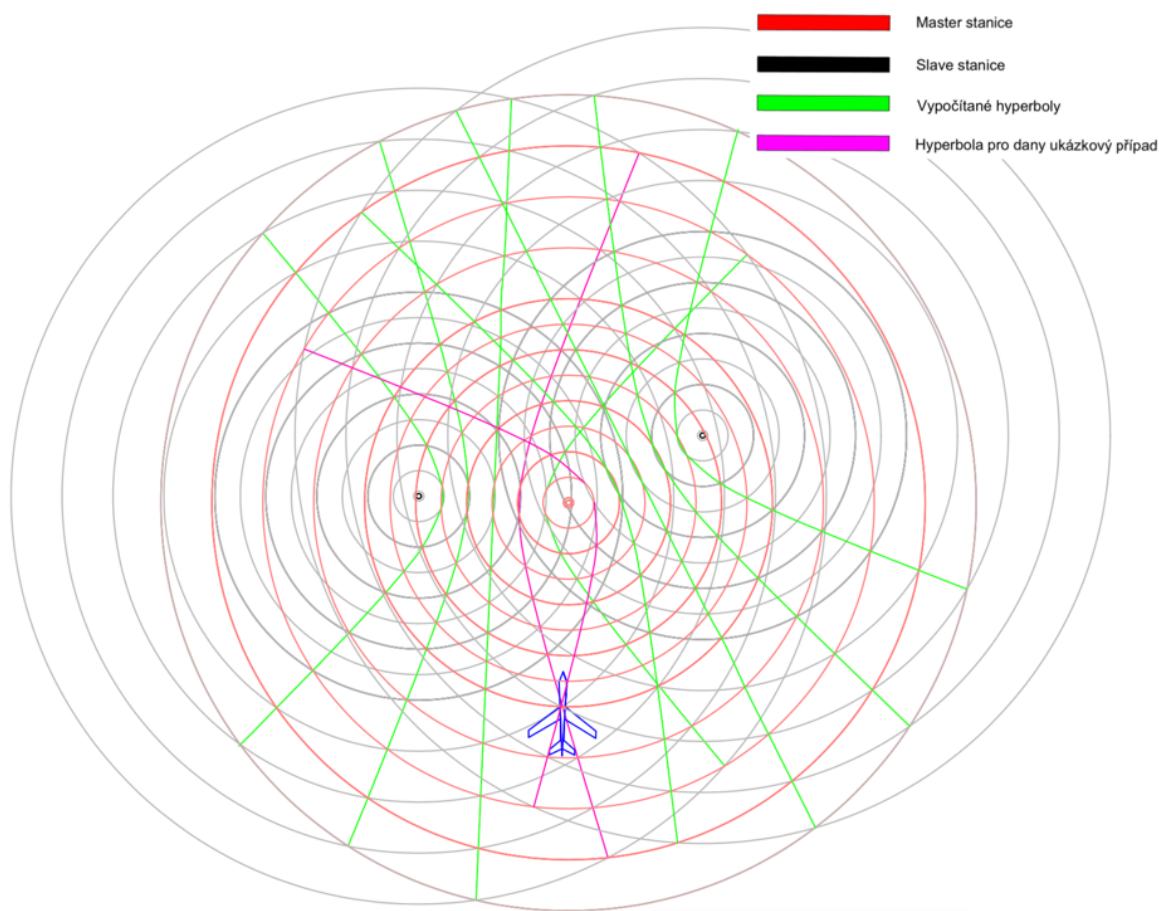
Obrázek 14: Přesnost sítě DME stanic. [18]



Obrázek 15: Přesnost spolupráce DME a LDACS. [18]

2.3 eLoran

Systém Loran (Long range navigation) má dlouhou historii, která začala po 2. světové válce. Jedná se o nízkofrekvenční navigační systém používaný pro navigaci lodí a letadel. V 50. letech 20. století byl představen Loran-C, který byl široce využíván z důvodu levných přijímačů a velkého dosahu. Loran-C využíval hyperbolický způsob určení polohy. Tento princip funguje na základě sítě pozemních stanic, které v případě Loran-C vysílají sledy impulzů. Jedna stanice je master, ostatní jsou slave. Letadlo nebo jakýkoliv jiný prostředek, který je vybaven Loran-C přijímačem, zaznamenává čas přijetí impulzu od každé stanice. Pomocí informace o rozdílu času mezi přijetím signálu z master a slave stanice vypočítává hyperbolu, na které se nachází. Přidáním další slave stanice, spojením ji s master stanicí a po provedení stejné operace jako v předchozím kroku se vypočítává další hyperbola, kde bodem křížení těchto dvou hyperbol bude poloha přijímače v rovině, obrázek č. 16. [26]



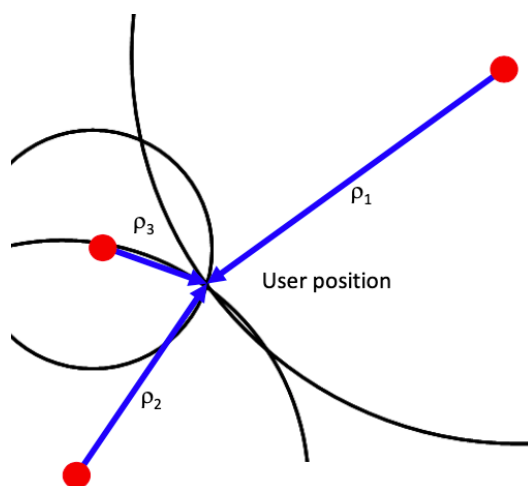
Obrázek 16: Výpočet polohy pomocí principu hyperbolické navigace. Zdroj: autor

Rozvoj satelitní navigace výrazně zmenšil využití Loran-C. Dlouhou dobu systém nebyl využíván a některé státy rozhodly o zrušení udržování stanic v provozu. Z důvodů popsaných na začátku této práce Spojené státy americké rozhodly o obnovení systému a jeho použití jako zálohy GNSS. O obnovu systému se rovněž zajímá Jižní Korea, kvůli rušení GNSS Severní Koreou z politických důvodů. Nový systém byl pojmenován eLoran a princip jeho funkce se výrazně liší oproti svému předchůdci. [27]

2.3.1 Princip eLoran

eLoran není pouze zlepšenou předchozí verzí, ale jde o nový systém, který je na původním Loranu-C postaven. Systém je založen na odlišném principu zjištění polohy než Loran-C a také zajišťuje další služby jako datový kanál.

Princip určení polohy je založen na porovnání času přijetí signálu od jeho vyslání. Všechny stanice jsou časově synchronizovány pomocí atomových hodin, což dovoluje zjistit TOT (Time Of Transmission) – čas vysílání. Měřením TOA (Time of Arrival) – času přijímání od 3 stanic se dá zjistit poloha v rovině, viz obrázek č. 17. [28]

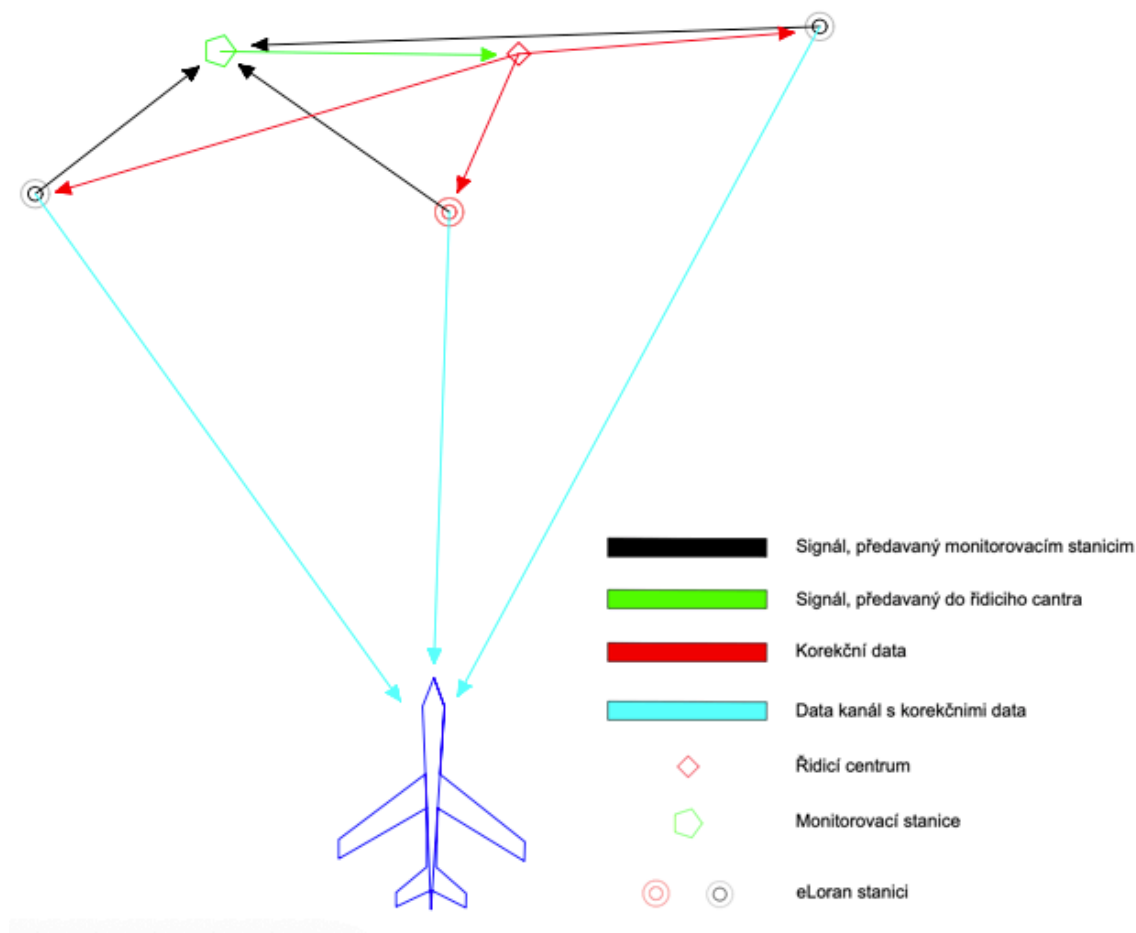


Obrázek 17: Princip zjištění polohy eLoran. [28]

Systém pracuje v pásmu dlouhých vln na frekvencích 90-110 kHz, kde je nutné řešit tendenci k nestandardní rychlosti šíření vln. Pro dosažení vysoké přesnosti je potřeba zavedení doplňující informace o šíření signálu. Jak již bylo zmíněno výše, přijímač eLoran porovnává čas přijetí a čas vysílání signálu s výslednou výpočetní rovnicí: $TOA = TOR$ (Time of Reception) – TOT . Tento čas se dá také představit jako součet času šíření signálu v různých podmínkách: [29]

$$TOA = TOR - TOT = PF + SF + ASF + \Delta Rx \quad (1)$$

V rovnici (1) je PF primárním faktorem, který odpovídá době šíření signálu atmosférou. Sekundární faktor (SF) představuje rozdíl v době šíření po moři. Primární a sekundární faktory jsou definovaná zpoždění a lze je vypočítat jako funkci vzdálenosti. Přidaným sekundárním faktorem (ASF) je zvláštní zpoždění v době přijetí (TOA) Loran signálu v terénu. Dodatečné zpoždění sekundárního faktoru je v době instalace většinou neznámé. Naštěstí zůstávají ASF v průběhu času velmi stabilní. Jakékoli jemné změny v ASF v průběhu času mohou být kompenzovány jedním nebo více rozdílnými místy referenční stanice eLoran poskytujícími korekce přes datový kanál Loran. Poslední součástí této rovnice je ΔR_x , která se jako jediná zjišťuje na palubě. Tento parametr zohledňuje zpoždění způsobené elektronikou přijímače a kabely. Ostatní dodatečné informace jsou zajištěny pomocí monitorovacích stanic a řídicích center. Monitorovací stanice přijímají signál, který dále posílají do řídicího centra. Řídicí centrum vyhodnotí signál a posílá korekční data na stanice, které už dále předávají korekční data uživatelům prostřednictvím datového kanálu. Popsaný princip je schematicky znázorněn na obrázku č. 18. [28, 29]



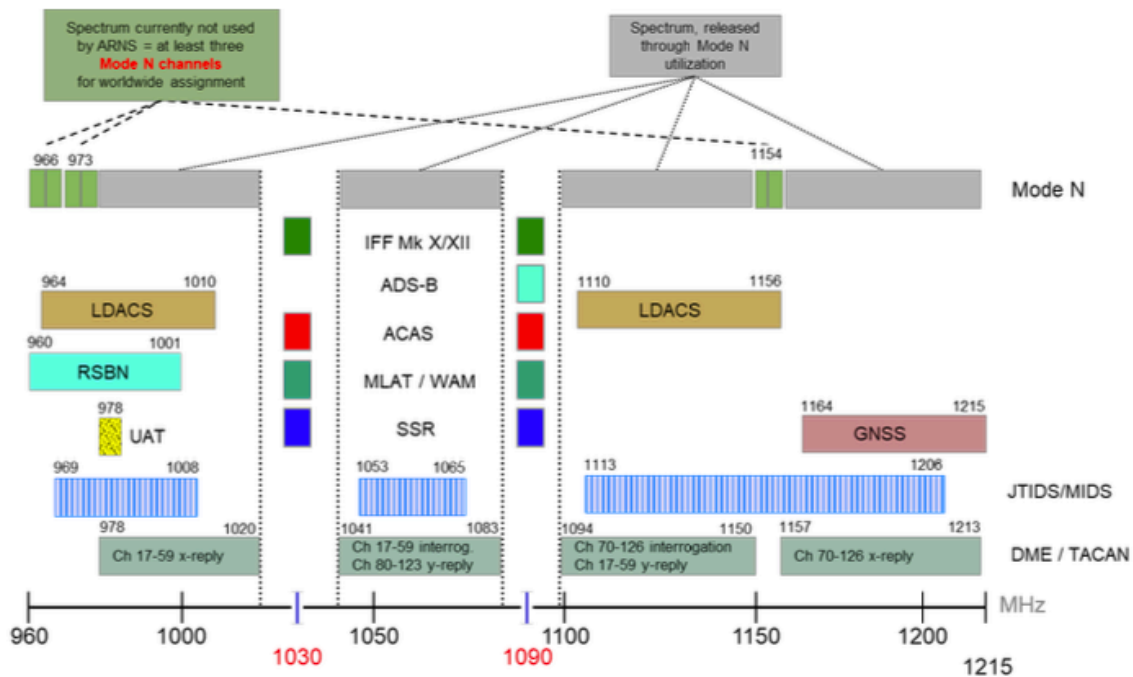
Obrázek 18: Princip zajištění doplňkové informace eLoran. Zdroj: autor

Všechny přenosy jsou synchronizovány s UTC (jako GPS). Na každé zmodernizované stanici Loran ve Spojených Státech jsou nainstalovány 3 atomové hodiny, což umožňuje nespoléhat se na čas GNSS. Přijímače používají signály „all in view“ - odchod od konceptu řetězce. Dříve se pro Loran-C používal koncept řetězce, což je vlastně poskytování navigační informace jen od jedné skupiny pozemních stanic (master, slave), ale některé Loran stanice sloužily pro více řetězců současně a z důvodu špatné časové synchronizace byla navigační chyba velká. Z důvodu, že všechny stanice jsou synchronizovány v čase, dovoluje eLoran odejít od koncepce řetězce a používat všechny stanice v dohledu. [27]

Další zlepšení eLoran zahrnuje jeden nebo více datových kanálů Loran, které poskytují: systémový čas v UTC (Koordinovaný světový čas), identitu stanic, varování vícecestného šíření, korekce pro systém eLoran, korekce pro systém GNSS podobně augmentačním systémům a denní čas. [26, 29]

2.4 Mode N

Mode N je další nový koncept pro APNT systém, vyvíjený německou společností DFS (Řízení letového provozu Německa). Hlavním účelem systému je poskytování navigační informace. Systém je zamýšlen pro fungování na jedné frekvenci a jako substituce stávajícího systému DME. Výhodou podobného modelu je snížení zatížení pásma L. Toto pásmo je vymezené rádiové spektrum od 1 GHz do 2 GHz [66]. V rozmezí 960–1215 MHz je vyhrazeno pro využití leteckými službami a je zde provozován velký počet civilních a vojenských, navigačních a přehledových systémů, které způsobují velké zatížení spektra, a je obtížné v pásmu provozovat nové systémy, protože by mohlo docházet k interferenci. Jedním ze systémů, který užívá velkou část spektra je DME, jehož architektura je popsána v následující části. Mode N je zaměřen na substituci tohoto systému využitím existujících DME pozemních stanic. Následující obrázek č. 19 uvádí systémy pracující v rozmezí 960–1215 MHz, uvolněnou část spektra po substituci DME a také možné frekvence pro systém Mode N. [30]



Obrázek 19: Systémy pracující v intervalu 960-1215 MHz pásma L. [30]

Jak je možné vidět z obrázku č. 19, v současné době jsou minimálně tři volné kmitočty, na kterých by Mode N mohl pracovat. Jsou to kmitočty 966, 973 a 1154 MHz.

2.4.1 Architektura systému

Navigační služba systému Mode N je založena na podobném principu jako multilaterace. Při standardním využití multilaterace časově synchronizované pozemní stanice přijímají signál od letadla. Na základě rozdílu přijímaného času dvou pozemních stanic (TOA) se vypočítává hyperbola, v jejíž libovolném bodě se letadlo může nacházet. Přidáním další stanice jsou pozemní stanice schopny vypočítat 2D polohu letadla, přidáním další stanice lze vypočítat polohu letadla v prostoru. Tento princip používá přehledový systém MLAT. Pro navigační účely Mode N obrací tento princip tak, že místo letadla je signál vysílán z pozemních stanic podobně, jak je popsáno v části 2.3. Dále Mode N stanice vysílají následující informace:

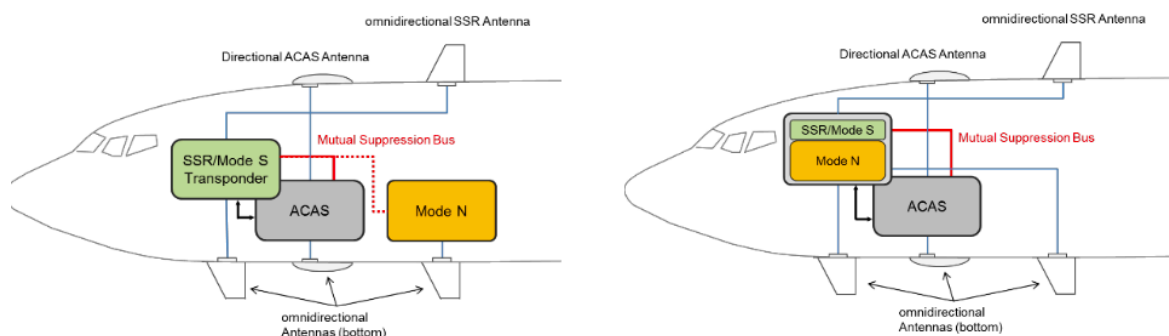
- Umístění pozemní stanice v WGS-84 souřadnicích
- Výšku antény
- Čas vysílání signálu
- Identifikační číslo stanice
- Informace o stavu stanice [30]

Systém taktéž poskytuje aktivní mód, při kterém je zajištěn obousměrný spoj. Tento spoj umožňuje poskytování dalších informací pro zlepšení přesnosti pomocí časové synchronizace mezi letadlem a pozemními stanicemi, poskytování navigační informace použitím šikmých vzdáleností, které umožní vyhnout se chybě časové synchronizace nebo nedostatku pozemních stanic zejména v malých výškách při vzletu a přistání. [30]

2.4.2 Implementace systému

Pro systém je nabízen následující způsob implementace:

1. Palubní segment Modu N je zamýšlen tak, aby dokázal fungovat se systémem DME a TACAN. Architektura tohoto vybavení umožňuje implementaci bez změny kabeláže a vnějších antén a pro implementaci na palubu letadla je nabízeno umístění Mode N zařízení v kombinaci s ostatními systémy, obrázek č. 20. To umožní snížit vzájemné potlačení na palubě a zlepšit dostupnost sekundárního radaru, zatímco SSR/Mode S a Mode N fungují paralelně. Takový plán umístění zařízení rovněž ušetří místo v letadle.



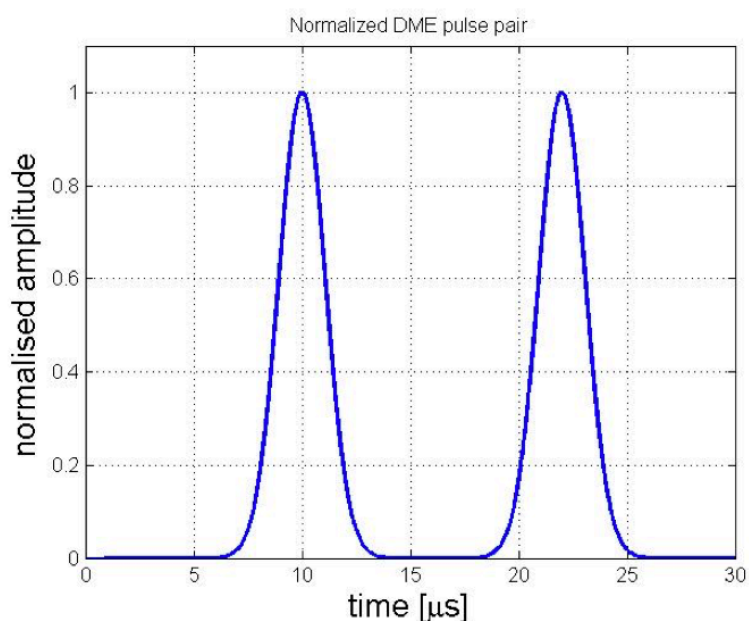
Obrázek 20: Možnost zabudování Mode N zařízení na palubě. Obrázek vlevo – zabudování zvlášť, obrázek vpravo – kombinace SSR/Mode S a Mode N. [30]

2. Implementace pozemních stanic systému Mode N může být orientována na jiné CNS systémy tak, aby nevznikala mezera pokrytí. V Německu se například ukázalo, že substituce DME stanic stanicemi Mode N nevyvolá žádné mezery pokrytí, ale jsou k nim být potřebné radiofrekvenční stanice (RF) pro synchronizaci času. Synchronizace času v rámci systému Mode N funguje na základě sítě RF stanic a lokálních vysoko přesných hodin, které jsou spojené s jednou ze stanic této sítě. Podle této stanice se synchronizují další stanice umístěné vedle. [30]

3. Dalším standardem, který systém Mode N zamýšlí využít, je podoba dlouhých zpráv, které jsou využívány ve zprávách Mode S. Tento faktor nabízí možnost výrazně zkrátit dobu implementace.

2.5 APNT založené na systému DME

Systém DME je široce využíván po celém světě. Systém funguje na základě dotazů vyslaných z paluby letadla a odpovědí vysílaných z pozemní stanice. Tyto dotazy a odpovědi jsou elektromagnetické pulzy, přesněji dvojice pulzů v případě DME. Ukázka dvojice pulzů vysílaných systémem DME je znázorněna na obrázku č. 21. [32]



Obrázek 21: Ukázka dvou impulzů DME. [33]

Posláním dotazu a přijetím odpovědi se dá zjistit šikmá vzdálenost ze stanice do letadla, což je hlavním navigačním údajem systému. Šikmá vzdálenost se vypočítává podle vzorce: [35]

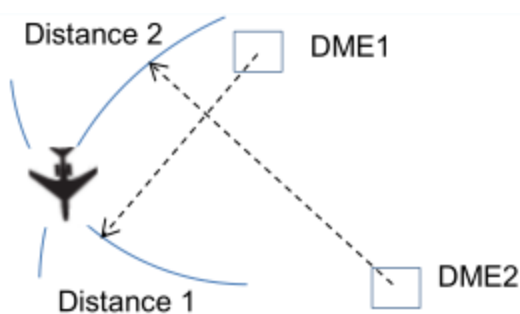
$$R = \frac{\tau - d}{2} * c \quad (2)$$

Dále systém poskytuje několik pracovních módů:

- Auto Standby Mode – zamezí, aby palubní systém dotazoval pozemní DME odpovídač, když je letadlo mimo pokrytí daného majáku

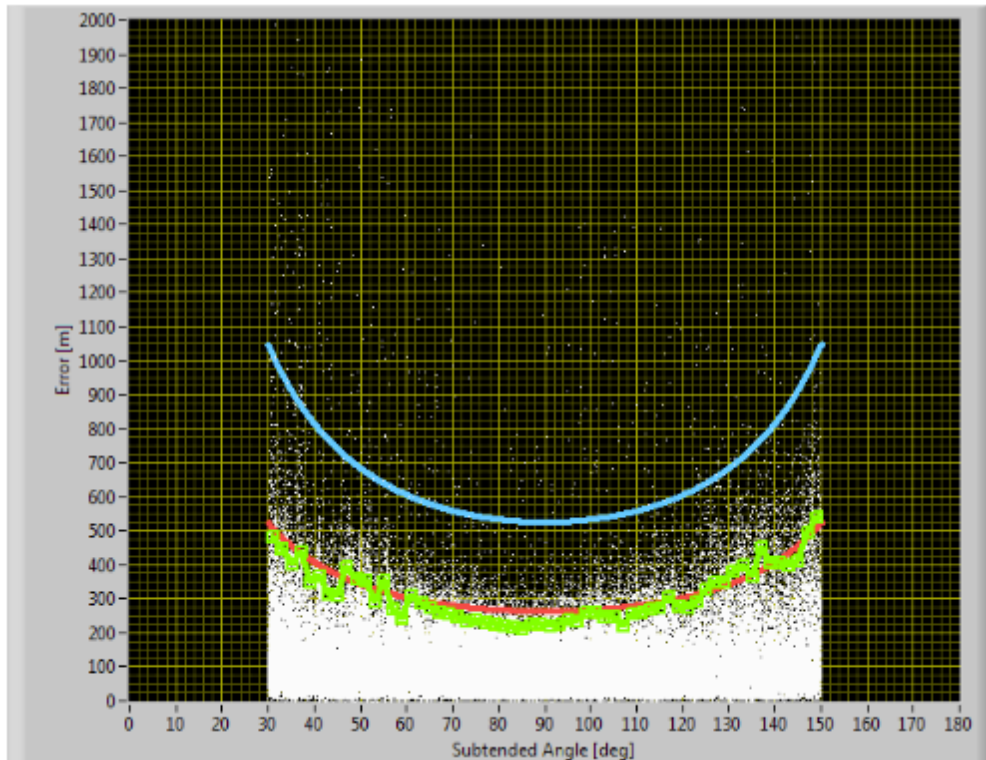
- Squitter – schopnost majáku vysílat dvojici pulzů i přesto, že není dotazován žádným letadlem
- Jitter – úmyslná náhodná změna opakovací periody vysílání pulzních dvojic palubním dotazovačem
- DME dead time – 60 μ s interval pro přijetí dotazu od letadla, během kterého stanice neodesílá žádné jiné dvojice pulzů. [35]

Pro navigaci se systém používá v kombinaci například se systémem VOR, kde se DME používá pro zjištění vzdálenosti od majáku a VOR pro určení azimutu k majáku. Další kombinací může být DME/DME, kde se použitím dvou šikmých vzdáleností dá vypočítat poloha. Více na obrázku č. 22.



Obrázek 22: Princip zjištění polohy pomocí DME/DME. [36]

Systém DME byl vyvíjen a standardizován v minulém století, ale od té doby došlo u technologií k velkému pokroku. Proto pro zjištění současné přesnosti DSNA (Direction Générale de l'Aviation Civile of France) provedla výzkum. Výsledkem zkoumání přesnosti více než 800 000 šikmých vzdáleností z více než 100 DME stanic bylo zjištěno, že v 95 % měření se chyba šikmé vzdálenosti rovnala nebo byla menší než 0,1 NM. Další výzkum se týkal přesnosti DME/DME pro zjištění polohy. Výsledky, které jsou znázorněny na obrázku č. 23, kde na ose X je chyba v metrech a na ose Y je úhel, který svírají dvě stanice DME a letadlo, prokazují, že reálné zjištění polohy dosahuje výrazně větší přesnosti než podle standardu. A proto je zřejmé, že systém ve skutečnosti dosahuje přesnosti požadované pro APNT systémy a je žádoucí změna standardu DME. [18]



Obrázek 23: Současná přesnost DME. Světle modrá křivka – chyba podle dnešních standardů, červená – 2 sigma ze skutečných chyb, zelená – 95 % procent výsledku leží pod touto křivkou. [18]

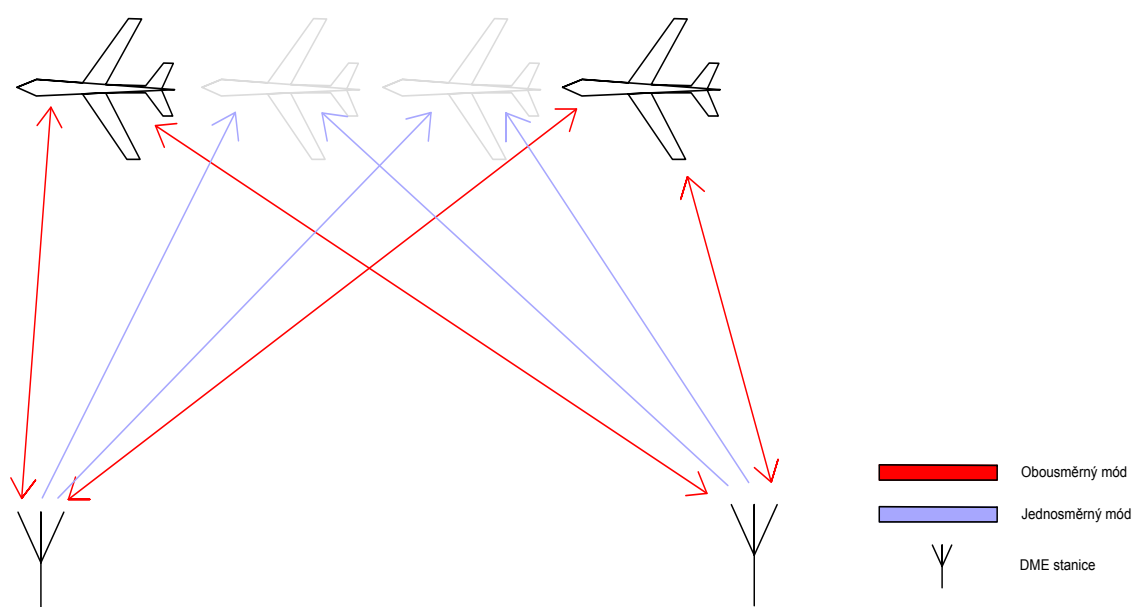
Proto, aby systém vyhovoval dalším požadavkům, jsou potřeba další zlepšení systému, která se budou týkat zajištění integrity, navýšení kapacity a dalšího zlepšení přesnosti. Další návrhy na zlepšení systému DME, které jsou navrhovány v rámci evropských projektů, jsou popsány dále v této práci.

2.5.1 DME Hybrid Ranging

Využití více DME současně jedním přijímacím zařízením může vyvolat přetížení pozemní DME stanice, což může mít za následek snížení účinnosti a také kapacity odpovědí. Proto ICAO specifikuje množství dotazů posílaných z paluby letadla do pozemních stanic, což může silně ovlivnit přesnost systému. Právě pro překonání této nedokonalosti je nabízeno zavedení pasivního výpočtu polohy. Tento způsob vychází z existující schopnosti DME vysílat nevyžadované dvojice signálu. Pasivní výpočet polohy může být proveden pomocí přijímání předdefinované pseudoposlopnosti dvojic pulzů vysílané z pozemní stanice. Tato metoda zjišťování polohy potřebuje minimálně 3 stanice pro zjištění polohy oproti dvou stanicím při použití dnešní metody DME/DME – 2 měření pro zjištění pseudovzdáleností, 1 měření pro zjištění časové odchylky. Taktéž je potřeba mít stanice vzájemně synchronizované.

Největší výhodou pasivního výpočtu polohy je neomezená kapacita systému oproti omezené stávajícího DME systému. [18, 34]

Některé z těchto požadavků mohou být zmírněny použitím přepínání mezi jednosměrným a obousměrným módem. Obousměrný mód se používá pro periodickou synchronizaci a jednosměrný pro aktualizaci polohy. Při obousměrném spoji přijímač získá časovou odchylku a z toho vyplývá, že pro výpočet polohy jsou potřebné jen 2 stanice. Tento hybridní způsob dovoluje výrazně zmírnit zatížení kanálu, což má za následek schopnost poskytovat informace o poloze většímu počtu letadel. Schematický princip zjištění polohy tímto způsobem je znázorněn na obrázku č. 24. Technologie Hybrid Ranging pro DME je uvažovaná nejen evropskými projekty ale také agenturou FAA. [18, 34]



Obrázek 24: Princip DME Hybrid Ranging. Zdroj: autor

2.5.2 DME Pulse Rise Time

Jak již bylo popsáno v části 1.5 v současné době, podle ICAO PBN manuálu, může DME podporovat navigační výkonnost až RNAV 1 na zodpovědnost konkrétního státu pro zajištění infrastruktury odpovídající požadované navigační výkonnosti, konkrétně NSE (Navigation System Error). Pro zlepšení přesnosti systému je potřeba zmírnit dopad chyb, které jsou způsobeny současnou přesností funkce systému a podobou pulzních dvojic. Chyba přístrojů pozemního odpovídače nastane, pokud je potřeba aplikovat fixní zpoždění na odpověď dotazu z paluby. Řešením tohoto problému je poslední generace DME odpovídače, která výrazně

zmírňuje výše popsanou chybu. Navíc vzestupný a sestupný spoj se sleduje v rámci monitoringu signálů. Proto se změnou standardu dá dosáhnout nižší NSE. Co se týká chyby způsobené šířením, může se vyskytnout dvakrát při zjištění šikmé vzdálenosti – jednou při vzestupném spoji, podruhé při sestupném. Jedním z komponentů ovlivňující TOA (Time Of Arrival) je čas nárůstu impulsu. Čím je rychlejší, tím je menší chyba a větší přesnost. Bohužel rychlejší doby náběhu mají negativní dopady na zvětšení zatížení frekvenčního spektra a zvýšení interference sousedního kanálu. Přesto dnes standardní specifikace doby náběhu pulzů stále nabízejí určitý prostor pro zlepšení. V současné době ICAO stanovuje čas nárůstu impulsu méně než 3 μs a EUROCAE (Evropská společnost pro stanovení standardu v oblasti letectví) $1,5 < x < 3 \mu\text{s}$. Změnou dolní a horní hranice se dá dosáhnout vyšší přesnosti. [18]

2.5.3 Multi – DME

Další zlepšení se může týkat algoritmu FMS pro zjišťování polohy pomocí DME/DME. Tento algoritmus pracuje na principu rekursivní filtrace signálu nejlepší dvojice DME stanic, které jsou vybrány tak, aby se vyhnuly nestabilitě a zajistily vhodnou geometrii. Výsledkem rekursivní filtrace, která pro výpočet momentální polohy používá předchozí hodnoty, je statistický odhad přesnosti systému. Tento statistický odhad ale bohužel nezajišťuje integritu systému, což neodpovídá RNP specifikacím z manuálu PBN, který je popsán v části 4. Navíc RNP specifikace požadují OBPMA (On-Board Performance Monitoring and Alerting). Účelem OBPMA je zajištění ochrany před nezjištěným selháním v systémech navigace s pravděpodobností výskytu vyšší než $10^{-5} [\text{h}^{-1}]$. [18]

Podle plánu zavedení PBN v Evropě jsou APNT systémy vyvíjeny především pro zajištění požadované navigační výkonnosti v oblastech TMA (Terminal Manoeuvring Area) velkých letišť, kde je hustota DME stanic dostatečná pro přijímání signálu z více než dvou stanic. Příkladem může být letiště CDG (Charles-de-Gaulle) v Paříži, kde počet DME stanic ve výšce 6000 ft a v rozsahu 40NM je vždy větší než 20. Pro zjištění polohy v prostoru jsou potřeba 3 šikmé vzdálenosti a 4 pro odstranění nejistot měření. Tím pádem pro zajištění integrity je potřeba 5 měření šikmé vzdálenosti anebo barometrická výška. Současné přijímače podporují přijetí signálu z většího počtu stanic, který je dostatečný pro tuto operaci. Pro zajištění integrity při použití více stanic je používán AIM (Autonomous Integrity Monitoring), který zajišťuje hodnotu integrity – $10^{-5} [\text{h}^{-1}]$ pro OBPMA ze specifikace RNP 1. Toto monitorování je taktéž zaměřeno na zjištění a eliminaci chybných měření s výjimkou maximální nedetekované chyby $10^{-3} [\text{h}^{-1}]$ na transpondéru, aby se zabránilo riziku dvojitého selhání. Ale výzkum zavedení dalších rozsahů do aktualizace současných algoritmů a odvození integrity ukázal, že dochází k aproximaci a nelinearitě.

Nově nabízený algoritmus umožňuje odstranění těchto problémů a zajišťuje parametry, které jsou popsány v tabulce č. 4. [18]

Tabulka 4: Výsledné hodnoty při použití nového algoritmu. [18]

Úroveň zabezpečení	10^{-7} [h ⁻¹]
Pravděpodobnost falešného upozornění	10^{-4} [h ⁻¹]
Pravděpodobnost chybného detekování	10^{-3} [h ⁻¹]

3 Posouzení výkonnosti APNT systémů na základě dostupných informací

V předchozí kapitole byly představeny jednotlivé APNT a popsán jejich princip. V této části bude posouzena výkonnost těchto systémů na základě dostupných informací a uvedeny další doplňkové parametry, které mohou být výhodné při rozhodování o zavedení nového APNT systému. Při posouzení jsou vyhodnoceny výkonnostní parametry jednotlivých systémů a na základě tohoto posouzení je vytvořen návrh na možnou implementaci APNT ve vybraném regionu. V průběhu posouzení pro systém DME budou uvažovány hodnoty všech vylepšení, která jsou popsána v části č. 2.5.

3.1 Posouzení výkonnosti systémů z hlediska přesnosti

„Přesnost je rozdíl mezi navigačním výstupem a skutečnou polohou letadla.“ [65]
Pro posouzení z hlediska přesnosti bude představena přesnost systému na základě dostupných informací a bude také porovnána s nejvíce využívaným a jedním z nejpřesnějších navigačních systémů – GPS. Zdrojem srovnávací hodnoty je hodnota horizontální přesnosti v 95 % případů (2σ) amerického systému GPS – 7.8 m, což je běžně dosažitelná hodnota přesnosti pro tento systém. [37, 38]

Pro porovnání jednotlivých APNT systémů bylo zvoleno procentuální vyjádření poklesu anebo přírůstu přesnosti jednotlivého APNT systému oproti přesnosti GPS, které bylo provedeno pomocí vzorce (3).

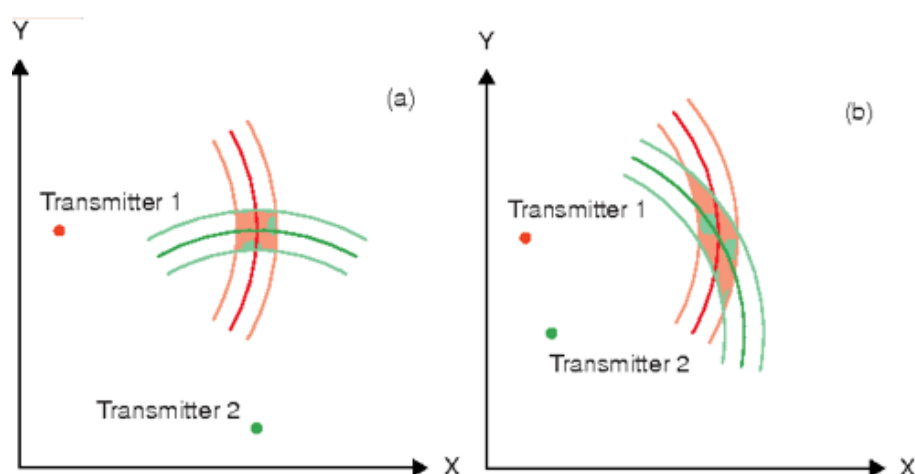
$$\text{Změna přesnosti} = \frac{\text{Přesnost GNSS}}{\text{Přesnost APNT systému}} * 100 \quad (3)$$

Tabulka 5: Porovnání přesnosti APNT systému s přesností GPS. [46, 68, 69]

APNT systém	Uváděná přesnost APNT systému [m]	Porovnávací hodnota přesnosti GPS [m]	Procentuální vyjádření dosahování přesnosti APNT systému ve srovnání s GPS [%]
Mode N	40	7,8	19,5
eLoran	20		39
LDACS	20		39
DME*	47		16,6

* Pro posouzení přesnosti byly použity hodnoty systému DME Pulse Rise Time

Podle výsledků z tabulky č. 5 je zřejmé, že žádný APNT systém nedosahuje přesnost GPS. Systémy, které dosahují nejvyšší přesnosti jsou: eLoran a LDACS. Ale je třeba zohlednit, že představená přesnost je dosahována v ideálních podmínkách. V případě Modu N, DME a eLoranu hodnoty mohou být silně ovlivněny geometrií stanic, tato chyba se obecně nazývá DOP (Dilution of precision). Na obrázku č. 25 je znázorněna ukázka dobré geometrie vlevo a špatné vpravo. V případě špatné geometrie jednotlivé chyby každého vysílače tvoří výrazně větší plochu, na které se přijímač může nacházet. [40]



Obrázek 25: Ukázka špatné a dobré geometrie stanic. [40]

Pro posouzení výkonnosti z hlediska přesnosti APNT systémů je zavedena škála, podle které se přesnost bude hodnotit. Pokud procentuální vyjádření přesnosti APNT systému, uvedené

v tabulce č. 5, dosahuje třetiny, tzn. 33,3 %, systém bude ohodnocen jedním bodem. Pokud systém dosahuje třetiny až dvou třetin procentuálního vyjádření přesnosti, tedy 33,3 % – 66,6 %, systém bude ohodnocen dvěma body. V případě dosažení přesnosti dvou třetin až plného dosažení přesnosti systému GPS podle procentuálního vyjádření, bude systém ohodnocen třemi body. Ohodnocení jednotlivých APNT systémů je znázorněno v tabulce č. 6.

Tabulka 6: Zhodnocení z hlediska přesnosti.

	APNT systém			
	Mode N	LDACS	eLoran	DME
Hodnocení z hlediska přesnosti	1 b	2 b	2 b	1 b

3.2 Posouzení z hlediska integrity

„Integrita je měřítkem důvěry o korektnosti informací poskytovaných celým systémem. Integrita zahrnuje schopnost systému provádět včasné a odůvodněné varování pro uživatele ve chvíli, kdy systém nesmí být použit pro určitou činnost.“ [42]

Stejně jako pro posouzení přesnosti budou použity hodnoty stávající přesnosti systému GPS. Tato hodnota je pro GPS $1-10^{-5}$ [39]. Výsledky porovnání jsou znázorněny v tabulce č. 7.

Tabulka 7: Porovnání přesnosti APNT systému s integritou GPS. [18, 26, 44]

APNT systém	Plánovaná integrita APNT systému [h^{-1}]	Porovnávací hodnota integrity GPS [h^{-1}]	Přírůst integrity APNT systému oproti GPS [Vyšší /Nižší/Stejná]
Mode N	$1-10^{-5}$ *	$1-10^{-5}$	Stejná
eLoran	$1-10^{-6}$		Vyšší
LDACS	$1-10^{-5}$		Stejná
DME	$1-10^{-7}$ **		Vyšší

* Hodnota integrity systému Mode N nebyla nalezena v dostupných zdrojích, proto je uvažována nejhorší hodnota z ostatních představených APNT systémů.

** Integrita byla odvozena z úrovně zabezpečení systému Multi-DME podle [41]

Pro posouzení bude integrita ohodnocena podobně jako přesnost. Ohodnocení integrity je provedeno formou bodování, a to je provedeno podle číselného řádu rizika integrity. V případě rizika integrity 10^{-5} je systém ohodnocen jedním bodem, v případě rizika integrity 10^{-6} je systém ohodnocen dvěma body a v případě rizika integrity 10^{-7} je systém ohodnocen třemi body. Výsledné hodnocení je znázorněno v tabulce č. 8.

Tabulka 8: Výsledné hodnocení z hlediska integrity.

	APNT systém			
	Mode N	LDACS	eLoran	DME
Hodnocení z hlediska integrity	1 b	1 b	2 b	3 b

Jak je vidět z porovnání, integrita ani jednoho systému není menší než integrita GPS. V případě systému Multi DME a také systému eLoran by integrita měla dosahovat lepších hodnot.

3.3 Posouzení kontinuity a dostupnosti

Výkonnostní charakteristiky kontinuita a dostupnost vyjadřují tyto vlastnosti systému:

- Kontinuita
„Kontinuita navigačního systému je jeho schopnost vykonávat svou funkci bez neplánovaných přerušení během zamýšlené doby provozu. Týká se schopnosti navigačního systému poskytovat navigační výstup se specifikovanou úrovní přesnosti a integrity během zamýšlené doby provozu, za předpokladu, že byl k dispozici na začátku operace.“ [45]
- Dostupnost
„Dostupnost je definována jako procento času, během kterého je služba k dispozici (tj. Spolehlivé informace jsou předloženy posádce, autopilotu nebo jinému systému řídicímu let letadla) pro použití s ohledem na všechny výpadky bez ohledu na jejich původ. Služba je k dispozici, jsou-li splněny požadavky na přesnost, integritu a kontinuitu. Přesné měření dostupnosti takového systému by trvalo mnoho let, aby doba měření byla delší než průměrná doba před selháním a opravou (MTBF a MTTR). Skutečnou dostupnost systému lze určit měřením až po skončení jeho životnosti.“ [45]

Kontinuita a dostupnost jsou kritéria, která se vyhodnocují na základě informací z měření v delším časovém horizontu, pokud je systém již v provozu, případně se dají odhadnout při testování nebo při modelování systémů. Bohužel při vytváření této práce nebyly nalezeny hodnoty těchto kritérií pro většinu systémů. Proto v rámci této části jsou posouzeny schopnosti systémů, které přinášejí výhody z pohledu umožnění rychlejší a snadnější implementace systémů nebo nabízí i další služby kromě navigačních a určení času, neboť tyto služby mají oproti jiným konceptům již plně zajištěny.

3.4 Doplnkové charakteristiky systémů

Z důvodu, který popisují výše, jsou v této části představeny a ohodnoceny doplňkové schopnosti a charakteristiky systémů udávající výhody z různých hledisek.

Ohodnocení přínosu těchto doplňkových charakteristik proběhne formou bodování, kde budou rozděleny do dvou skupin: z hlediska implementace a z hlediska přenosných sekundárních charakteristik systémů. Z důvodu, že tyto charakteristiky přímo neovlivňují výkonnost APNT systémů a představují spíše výhody jednotlivých systémů, jsou ohodnocené maximálním dosažitelným počtem bodů 1.

3.4.1 Posouzení z hlediska implementace

V této části budou uvedeny faktory, které byly nalezeny v dostupných zdrojích, pro usnadnění implementace a jak je popsáno výše, budou v této části následně ohodnoceny. Hlavním faktorem, usnadňující implementaci, je založení systému na stávajícím. Tento faktor ovlivňuje implementaci pozemních zařízení, palubního vybavení a dále standardizaci systému. V rámci tohoto posouzení nebude představen systém LDACS, protože je novým systémem a k jeho zavedení je potřeba vytvoření zcela nové pozemní infrastruktury pozemních stanic, zavedení standardizace pro daný systém a vybavení letadel avionikou potřebnou pro využití služeb nabízených systémem LDACS.

Implementace pozemních stanic

Založení systému na již stávajícím dává možnost využití modernizovaných stávajících pozemních stanic, což může zkrátit dobu zavedení systému do provozu a někdy i nižší náklady na implementaci. Mezi systémy, u kterých je plánováno využití stávajících pozemních stanic, patří vylepšení systému DME, jehož síť má velký počet stanic umístěných na všech kontinentech. Systém Loran-C, na kterém je založen eLoran, nemá tak vysoký počet stávajících stanic. V současné době jsou stanice, jejichž modernizací se dá dosáhnout

přesnosti a integrity popsaných na začátku této kapitoly, umístěny převážně na pobřeží. Z důvodu velkého dosahu se systém eLoran dá využít pro navigaci nad oceány a nad odlehlými oblastmi na kontinentech. Posledním systémem zaměřeným na využívání stávající infrastruktury je Mode N, který je zaměřen na substituci DME a využití jeho stanic.

Posouzení z tohoto hlediska je provedeno způsobem zhodnocení složitosti implementace pozemních stanic na základě dostupných zdrojů. V případě potřeby výstavby zcela nové sítě pozemních stanic je systém ohodnocen nulou. V případě potřeby hluboké modernizace stanic, například jako v případě eLoranu, kde je potřeba zavedení atomových hodin, je systém ohodnocen polovinou z maximálně dosažitelného hodnocení. V případě minimálních změn v provozu pozemních stanic je systém ohodnocen maximálním počtem 1 bodu, kterého dosáhl pouze systém DME.

Implementace palubního vybavení

Stejně jako v případě implementace pozemních stanic, dává založení APNT systému na stávajícím možnost využití stávající avioniky s mírnou modernizací. Takovou možnost nabízí systém DME, který nepotřebuje změnu palubního vybavení, pouze jeho modernizaci. Výhodou stávajícího DME je, že s tímto systémem se můžeme setkat na palubě skoro každého letadla, což by mohlo být předpokladem k usnadnění implementace. Také lze použít stávající avioniku systému Loran-C, na které je eLoran založen. Podle DFS, společnosti, která vyvíjí Mode N, pro použití tohoto systému by letadlo mělo být vybaveno specifickou avionikou, která ale využívá stávající kabeláž a anténu. Posouzení z tohoto hlediska je provedeno podobně jako ohodnocení implementace pozemních stanic, to znamená podle náročnosti zavedení palubního vybavení. [26, 30, 43]

Standardizace systému

Standardizace systému hraje velkou roli při implementaci, a to z toho důvodů, že pokud systém není standardizován, nebude možné jeho využití. Složitost standardizace může ovlivnit výše popsaný faktor – zda je systém založen na stávajícím systému. Například Mode N, používá existující standardy ICAO pro SSR/Mode S. Tato podmínka dokáže výrazně zkrátit dobu standardizace oproti zcela novému systému. Podobná situace nastává s eLoranem, pro který je zde možnost použití standardu Loran-C s minimálními změnami. Dále LDACS, který je zcela novým systémem a jeho standardizace již probíhá, ale oproti například Modu N bude složitější a delší. Mezitím standardizace různých vylepšení DME potřebuje změnu stávajících standardů.

Z důvodu nedostatku informací o složitostech standardizace pro jednotlivé systémy hodnocení z tohoto hlediska, se tento parametr bude hodnotit 1 bodem v případě, že má systém základ pro ulehčení standardizace anebo nulou v případě, že systém takový základ nemá.

Výsledné hodnocení systémů podle výše uvedených parametrů je znázorněno v tabulce č. 9.

Tabulka 9: Ohodnocení APNT systémů z hlediska implementace.

	APNT systém			
	Mode N	LDACS	eLoran	DME
Hodnocení z hlediska implementace pozemních stanic	0,5 b	0 b	0,5 b	1 b
Hodnocení z hlediska implementace palubního vybavení	0,5 b	0 b	1 b	1 b
Hodnocení z hlediska standardizace	1 b	0 b	1 b	1 b
Výsledné hodnocení z hlediska implementace	2 b	0 b	2,5 b	3 b

O výsledku posouzení se dá jednoznačně říct, že LDACS je nejobtížnějším systémem k implementaci z důvodů vytvoření nové infrastruktury a standardizace. Dalším systémem, u něhož je potřebná nejen modernizace infrastruktury, ale taktéž zavedení nové avioniky, je Mode N. Systémy eLoran a vylepšení DME, které jsou představeny v rámci této práce, jsou schopny využívat stávající modernizovanou infrastrukturu a dále také upravené a aktualizované standardy.

3.4.2 Posouzení z hlediska přínosných sekundárních charakteristik systémů

V této části budou uvedeny faktory, nalezeny v dostupných zdrojích, které poskytují sekundární funkce systému a můžou sloužit jako výhoda v provozu. Jak je popsáno výše, budou v této části následně ohodnoceny.

Tyto faktory tvoří další 3 charakteristiky systému:

Uvolnění pásma L

Motivace pro uvolnění pásma L je popsána v části o Modu N. Mezi systémy alternativního PNT, zajišťujícími tuto možnost, patří v první řadě Mode N, který, jak bylo popsáno u představení systémů, je zaměřen na substituci DME – jednoho z nejvíce zatěžujících systémů pásma L, proto je ohodnocen bodem 1. Další systémy, LDACS a DME naopak způsobují zmíněné zatížení tohoto leteckého frekvenčního pásma. Z tohoto důvodu je u nich tento parametr ohodnocen 0 bodů. Systém eLoran pracuje na zcela odlišných kmitočtech, a tak žádné další zatížení nezpůsobuje, zároveň nepomáhá v uvolnění pásma, a proto mu byl přidělen 0,5 bod.

Poskytování komunikační služby

Poskytování komunikační služby systémem dovoluje zabezpečení stávajících komunikačních systémů. Systémy poskytující komunikační službu jsou LDACS, který má přímo v architektuře systémů zamýšlenou komunikační službu – data link, která je popsána v části o architektuře daného systému. LDACS je jediný z představených APNT systémů, který má popsanou komunikační službu. [48]

Dosah

Velký dosah systému dovoluje vybudování sítě s menší hustotou stanic a co je navíc důležité, umožní systému poskytovat navigační službu nad větší částí oceánu v případě stanic umístěných na břehu. Dosah jednotlivých systémů je uveden v tabulce č. 10.

Tabulka 10: Dosah jednotlivých APNT systémů. [35, 43, 46]

APNT systém	Dosah [NM]
Mode N	200
LDACS	180
eLoran	695
DME	200

Z tabulky lze vidět, že dosah systému LDACS, DME a Mode N je shodný. Ale dosah systému eLoran je o mnohem větší než dosah systémů zmíněných předtím. Na druhou stranu pro dosažení hodnoty dosahu uvedené v tabulce systémem eLoran je potřeba velký příkon.

Škála ohodnocení následující: pokud má systém dosah do 200 NM, je ohodnocen nulou, v případě dosahu nad 200 NM je systém ohodnocen bodem 1.

Výsledné hodnocení systémů na základě sekundárních charakteristik je znázorněno v tabulce č. 11.

Tabulka 11: Ohodnocení APNT systému z hlediska sekundárních charakteristik.

	APNT systém			
	Mode N	LDACS	eLoran	DME
Hodnocení z hlediska uvolnění pásma L	1 b	0 b	0,5 b	0 b
Hodnocení z hlediska poskytování komunikačních služeb	0 b	1 b	0 b	0 b
Hodnocení z hlediska dosahu	0 b	0 b	1 b	0 b
Výsledné hodnocení z hlediska sekundárních charakteristik	1 b	1 b	1,5 b	0 b

3.4.3 Závěr posouzení z hlediska implementace a doplňkových charakteristik

V této části je představeno výsledné hodnocení APNT systémů. Byla spočítána hodnocení z hlediska integrity, přesnosti a výsledné hodnocení z hlediska sekundárních charakteristik a implementace. Výsledné hodnocení APNT systémů je znázorněno v tabulce č. 12.

Tabulka 12: Výsledné hodnocení APNT systémů.

	APNT systém			
	Mode N	LDACS	eLoran	DME
Hodnocení z hlediska přesnosti	1 b	2 b	2 b	1 b
Hodnocení z hlediska integrity	1 b	1 b	2 b	3 b
Výsledné hodnocení z hlediska implementace	2 b	0 b	2,5 b	3 b
Výsledné hodnocení z hlediska sekundárních charakteristik	1 b	1 b	1,5 b	0 b
Výsledné hodnocení APNT systému	5 b	4 b	6 b	7 b

Mezi systémy, které dostaly vysoký počet bodů patří eLoran a DME. Malý bodový zisk systému Mode N je ovlivněn nedostatkem informací, a tak je v tomto případě uvažováno s nejnižším ohodnocením integrity. V případě provedení posouzení pouze z kompletních informací u všech systémů by byly výsledky hodnocení podobné až na systém LDACS. Tyto výsledky jsou ovlivněny tím, že do bodování byl zahrnut proces implementace, a protože se něho jako u jediného systému jedná o zcela nový systém, byl tímto hodnocením znevýhodněn. Na druhou stranu hodnocení ukázalo, že systém DME, který má bodově nejvyšší zisk nevykazuje žádné výhody z pohledu sekundárních charakteristik.

V případě zavádění systému je nutné zvážit, kam chceme jednotlivé APNT systémy zavádět, jelikož výhody každého z nich se dají použít v různých podmínkách provozu. Příkladem těchto výhod je využití velkého dosahu eLoranu v odlehlých oblastech kontinentů a nad oceány, proto je při zavedení APNT systémů do provozu třeba zvážit takové faktory, jako je například hustota provozu v oblasti zavedení. Pokud by například proběhla standardizace systému LDACS a byl by postupně zaváděn jako mezinárodní standard za účelem zajištění komunikační služby, mohla by se v budoucnu využít právě jeho navigační funkce. U systému DME je v posouzení zjevné, že pokud by docházelo k postupné modernizaci systému, jako například změna tvaru pulsu či změna logiky algoritmizace v FMS (Multi-DME), jedná se o APNT systém, který je využitelný v krátkodobém horizontu. Pokud by se rozhodlo o zavedení systému Mode N jako standardu pro APNT, stanice DME by mohly být dále modernizovány a postupně převáděny právě na tento systém.

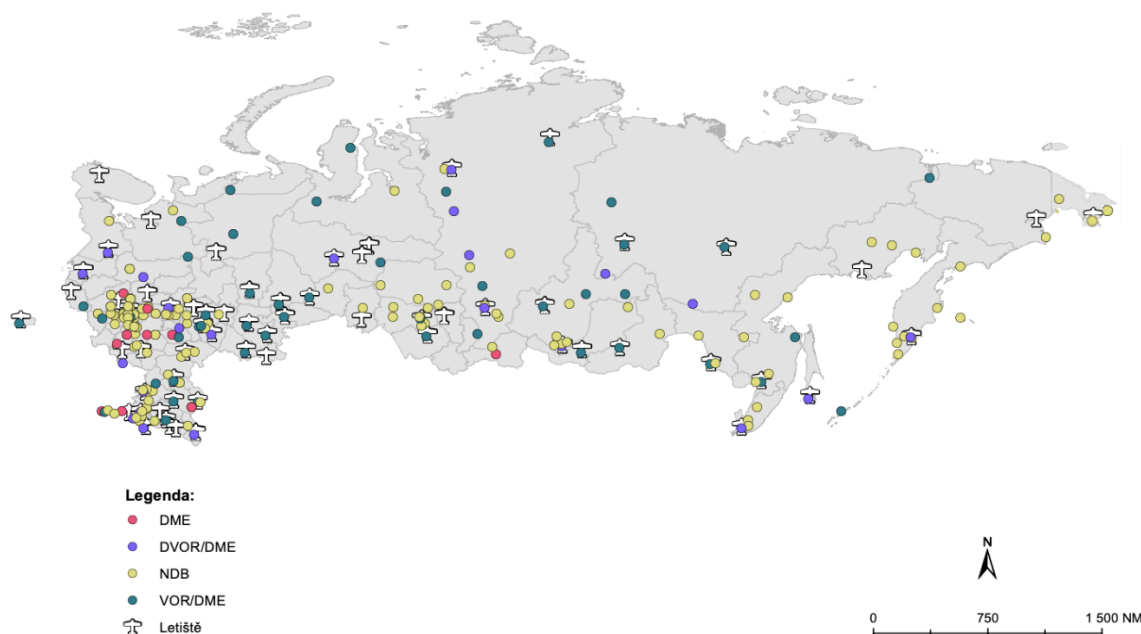
3.5 Návrh zavedení APNT systémů na konkrétním území

Cílem této části je návrh zavedení APNT systémů na konkrétním území. V případě skutečného zavedení APNT systémů je potřeba zvážit okolní podmínky. Mezi tyto podmínky může patřit hustota provozu v dané oblasti, hustota stávající sítě radionavigačních systémů a dále podmínky terénu pro výstavbu nových stanic. Pro ukázkou implementace výše popsaných systémů bylo zvoleno území Ruské federace. Důvodem výběru byla velká rozloha státu a různorodost provozu. Následující mapa obsahuje radionavigační systémy tohoto státu a byla vytvořena pomocí programu ArcGIS z informací o umístění DME, NDB (Nesměrový radiomaják), VOR/DME a DVOR/DME stanic z letecké informační příručky Ruské federace. [49]

Je znázorněna na obrázku č. 26.

ROZMÍSTĚNÍ EN-ROUTE RADIONAVIGAČNÍCH ZAŘÍZENÍ

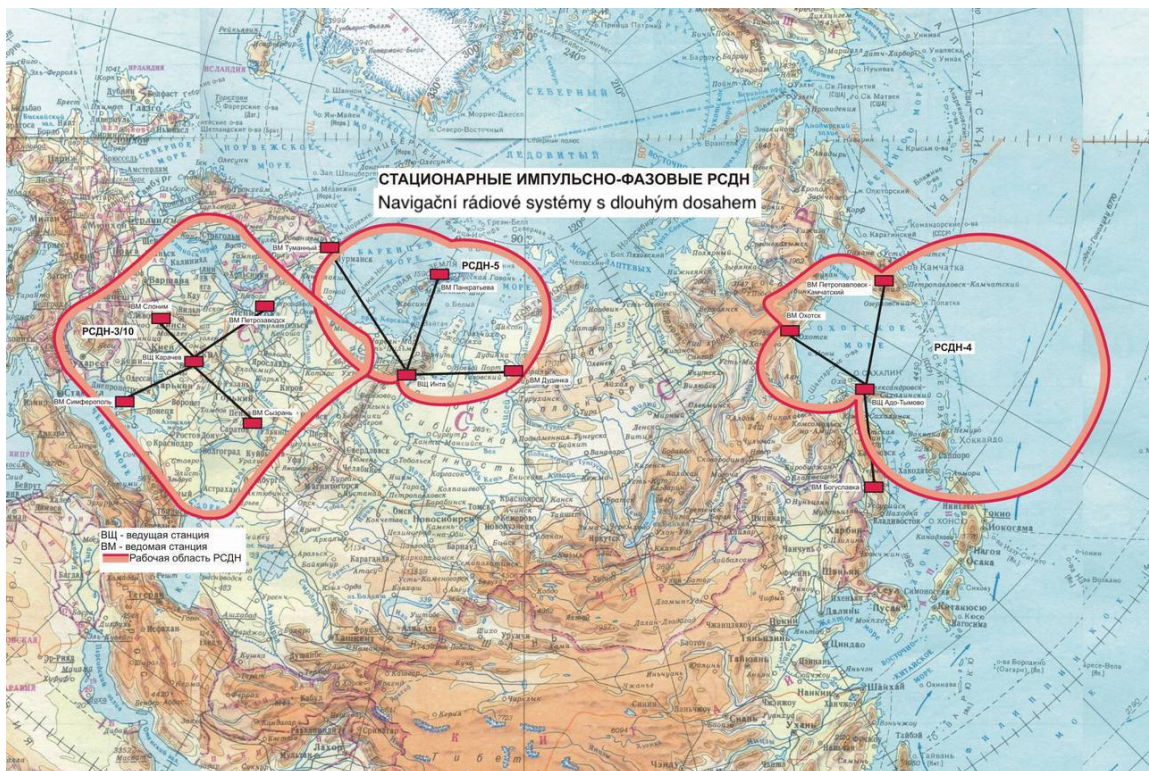
v Ruské Federaci v roce 2020



Obrázek 26: Umístění En-Route radionavigačních zařízení na území Ruské federace.

V případě Ruské federace je možné území rozdělit do dvou částí, kde západní část státu má výrazně větší hustotu provozu oproti východní části, což má za následek menší počet radionavigačních zařízení na východě. Nicméně východní část vzdušného prostoru Ruské federace je důležitou součástí tratí letů, například mezi Asií a Severní Amerikou, Evropou a Japonskem.

Další systém, jehož stanice by se mohly využít při zavádění APNT na území Ruské federace je systém Chaika. Tento systém byl zařazen do provozu v roce 1958 a byl zamýšlen jako ruský analog americkému systému Loran-C. Princip určení polohy těchto dvou systémů je stejný a je popsán v části č. 2.3. Pro zvýšení kvality navigační služby se systém postupně modernizoval a v současné době vyhovuje aktuálnímu pokroku radiotechniky. Systém Chaika má v provozu 3 řetězce РСНД-3/10, РСНД-4, РСНД-5 (РСНД – Радиотехнические системы дальней навигации – Radionavigační systémy s dlouhým dosahem). Umístění a pokrytí těchto stanic je zobrazeno na obrázku č. 27. [50, 51]



Obrázek 27: Umístění stanic systému Chaika. [50]

Návrh zavedení

Při návrhu APNT řešení v rámci vzdušného prostoru Ruské federace jsou použity systémy:

DME – Použitím DME s výše popsanými vylepšeními, jehož zavedení je snazší než zavedení ostatních APNT systémů, se dá zajistit vyšší navigační výkonnost v době výstavby infrastruktury pro eLoran a LDACS.

eLoran – Pro využití daného systému na území Ruské federace se dá použít stávající stanice systému Chaika, který je popsán výše.

LDACS a Mode N – Podle návrhu společnosti DLR, která systémy vyvíjí, by tyto dva systémy měly fungovat ve společném konceptu. LDACS zajišťuje primárně komunikační službu a Mode N poskytuje službu navigační. LDACS navíc může fungovat jako podpora navigační služby. [52, 62]

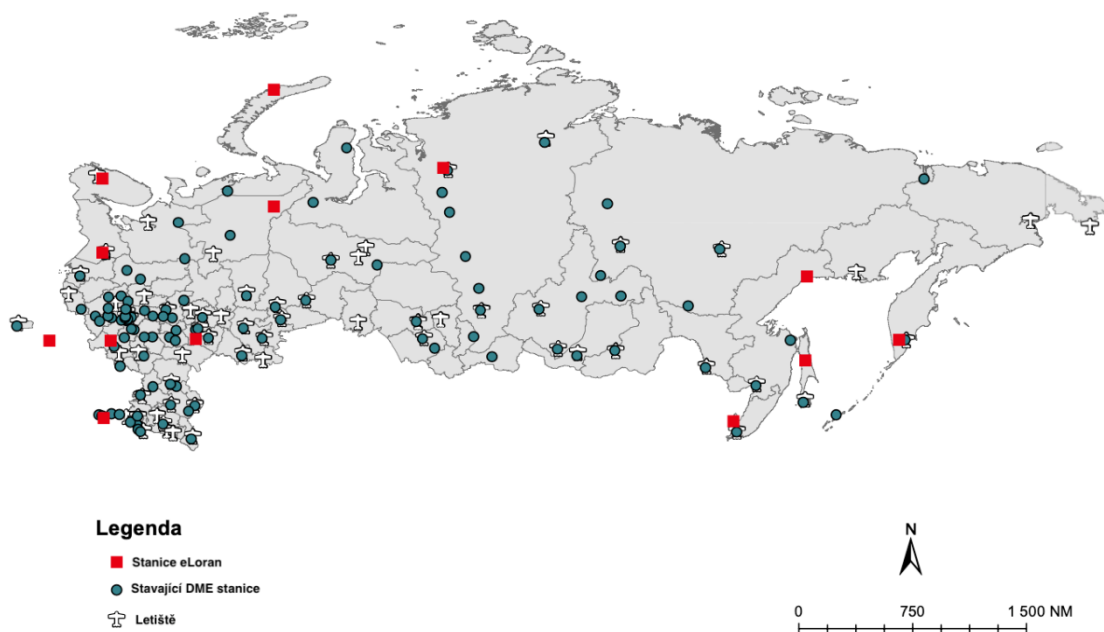
Pro případ implementace v Ruské federaci je poté navržen následující postup řešení:

- V první fázi aktualizace stávajících DME a zavedení dalších stanic zejména v jihovýchodní oblasti pro zajištění vysoké navigační výkonnosti. Ve druhé fázi budou stávající a nové stanice použity pro systém Mode N v dalším kroku.

- Modernizace stanic systému Chaika do eLoran a rozšíření sítě o další stanice. V tomto návrhu se nabízí jako řešení zavedení dalších stanic pro poskytování navigační služby v severní části Ruska. Odchod od konceptu řetězce u systému eLoran dává možnost doplnění stávající sítě stanic Chaika a využití bez ohledu na párování stanic.
- Zavedení LDACS stanic pro zajištění komunikační služby v oblastech provozu s vysokou hustotou, především v západní a jižní oblasti Ruské federace. Postupná náhrada DME stanic Modem N, který, jak bylo zmíněno dříve, uvolní pásmo L a zvětší přesnost navigační služby v daném území.

Pokud budou splněny všechny tyto fáze, mapa radionavigačních zařízení v Ruské federaci bude vypadat jako na následujícím obrázku č. 28.

NÁVRH ZAVEDENÍ APNT V RUSKÉ FEDERACI

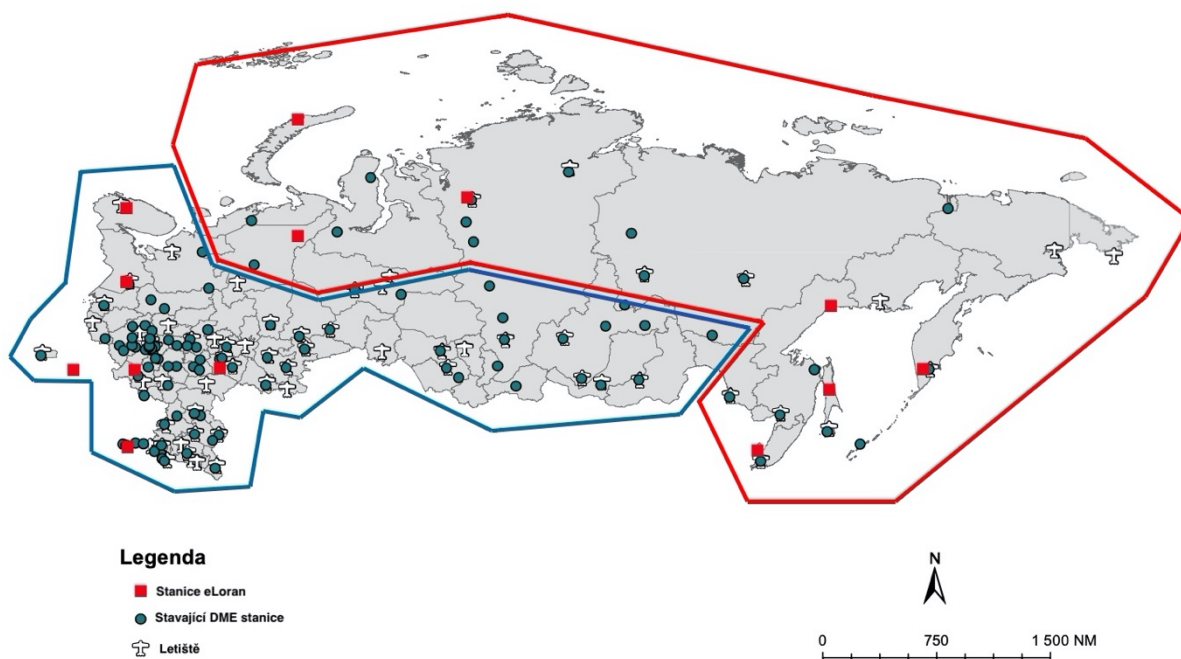


Obrázek 28: Umístění radionavigačních zařízení, nabízejících možnost pro modernizace na APNT.

Dané APNT řešení je navrženo na základě využití existující infrastruktury se záměrem co nejvyššího procenta pokrytí území APNT systémy. Západní část území Ruské federace nabízí možnost výběru APNT systému, a to z důvodu, že jsou v provozu současně systém DME, jehož stanice mohou být substituovány systémem Mode N, a systém Chaika, jehož stanice by se mohly využít pro modernizaci na systém eLoran. Důvodem k výběru APNT systému mohou být náklady na modernizaci a případné doplnění sítě stanic. Při výběru systému eLoran pro

APNT v západní části Ruské federace lze odstranit některé DME stanice, což zmírní náklady na poskytování navigační služby v okolí. Na druhou stranu v případě zavedení Mode N ve společném konceptu se systémem LDACS se dá zajistit komunikační služba v západní části Ruské federace. Dále je navrženo použití systému Mode N a LDACS v jižní oblasti, kde je vysoká hustota provozu a v současné době tam fungují pozemní navigační systémy VOR, DVOR, DME, NDB nebo jejich kombinace. V severní a východní části Ruské federace je navržena modernizace systému Chaika do systému eLoran, což bude nejvhodnějším řešením vzhledem ke stávající infrastruktuře a velkému dosahu systému eLoran. Výsledné navrhované řešení v případě zavedení systémů Mode a LDACS je znázorněno na obrázku č. 29.

NÁVRH ZAVEDENÍ APNT V RUSKÉ FEDERACI



Obrázek 29: Schematické pokrytí APNT systémů při zavedení systémů Mode N a LDACS v západní části Ruské federace. Modře – Mode N a LDACS, červeně – eLoran.

Toto řešení poskytne plné pokrytí na území Ruské federace, což zabezpečí lety v případě ztráty signálu GNSS. Ke zlepšení dojde zejména ve východní části státu, kde bude použit systém eLoran. Na druhou stranu, zavedení těchto systémů v rámci Ruské federace, podobně jako celosvětově, je ovlivněno především politickými a ekonomickými okolnostmi, které není možné v práci zhodnotit.

4 Zhodnocení využitelnosti systému v konceptu s PBN

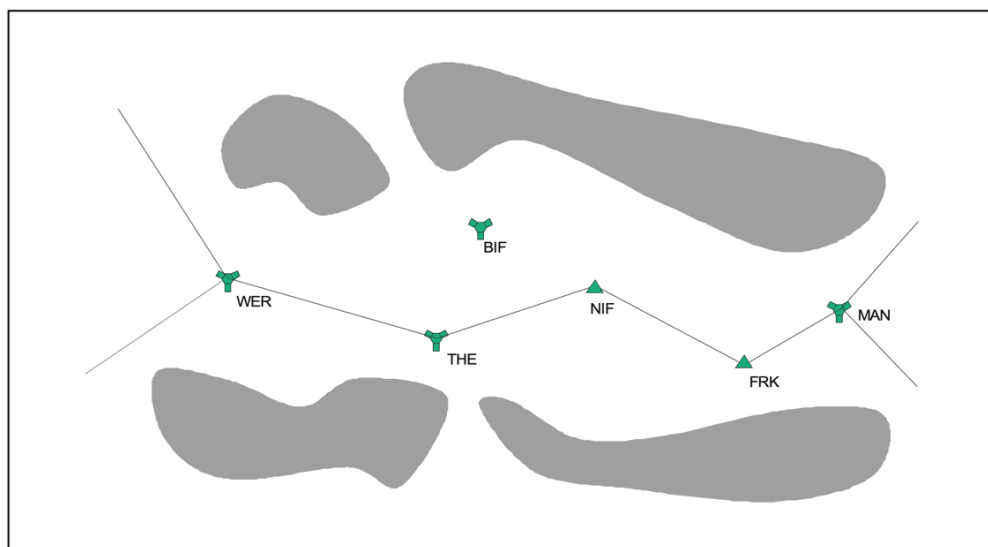
PBN je navigace založena na výkonnosti a zavádí se jako řešení následujících úloh:

- Snížená spotřeby paliva
- Rostoucí požadavky na ochranu životního prostředí
- Rostoucí potřeby pro přistání pomocí RNAV

Většina těchto požadavků může být splněna použitím současných technologií. Na to koncept stanovuje dvě skupiny specifikací – RNP a RNAV, které jsou sjednocením požadavků potřebných pro dosažení určité navigační výkonnosti. Tyto specifikace jsou v podstatě podobné, avšak hlavním rozdílem mezi nimi je, že RNP vyžaduje palubní sledování navigační výkonnosti a varování, RNAV nikoli. Mezitím RNAV umožňuje provoz letadla po zvolené trati. Koncepty sestavení letových tratí podle RNAV a RNP a jejich předchůdce jsou popsány dále.

Sestavení konvenční tratě

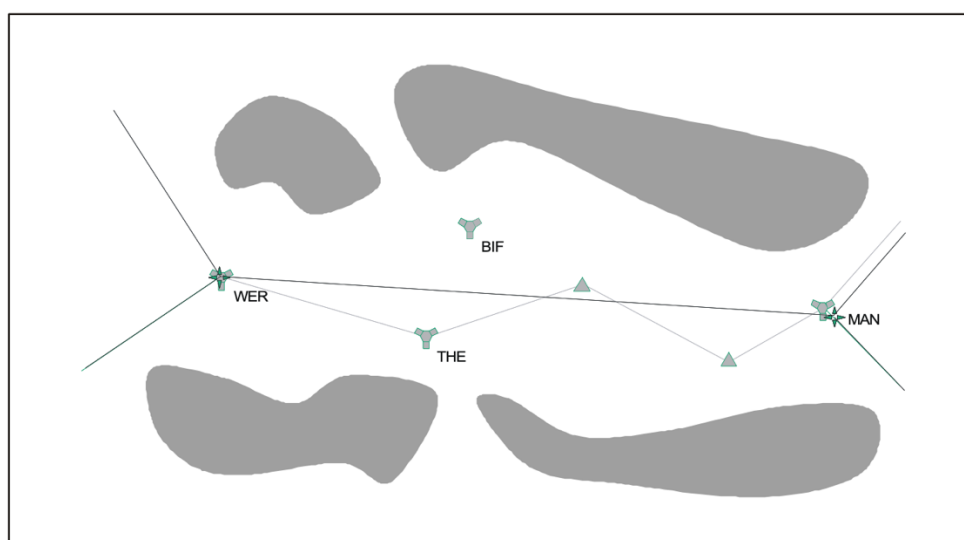
Sestavení konvenční tratě probíhá podle přímých signálů od pozemních radionavigačních prostředků např. DME, což znamená, že sestavení tratě je přímo závislé na jejich umístění. Kvůli takovému sestavení tratě se zvětšuje délka trati a chyba navigačního přístroje se zvětšuje s narůstající vzdáleností letadla od navigačního prostředku. Příklad sestavení tratě touto metodou je znázorněn na obrázku č. 30. [53]



Obrázek 30: Sestavení konvenční tratě. [53]

Sestavení tratě pomocí RNAV

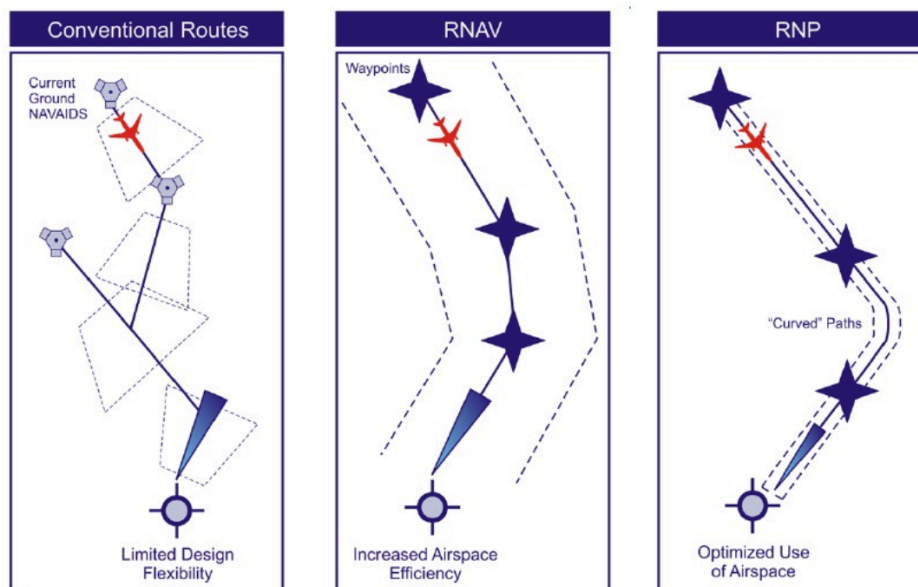
Plánování tratě pomocí RNAV používá kontrolní body, podle kterých je trať sestavována. Kontrolní body mají definován název, zeměpisnou délku a šířku. Při umístění těchto kontrolních bodů se zohledňuje pokrytí pozemních nebo kosmických navigačních zařízení, navigační zařízení na palubě letadla anebo jejich kombinaci. Znamená to, že systém vede letadlo po trati, která není ovlivněna umístěním pozemních navigačních prostředků. Velkým přínosem této technologie je zvýšená efektivita vzdušného prostoru, oproti principu popsanému v předchozí části, a v neposlední řadě schopnost ukládat cesty do databází, což sníží pracovní zátěž pilota. Příklad sestavení RNAV tratě je znázorněn na obrázku č. 31. [53]



Obrázek 31: Sestavení tratě pomocí RNAV. [53]

Sestavení tratě pomocí RNP

Sestavení tratě pomocí RNP je založeno na navigační výkonnosti. Tato charakteristika přesně definuje řadu požadavků na tuto výkonnost, kterou letadlo musí splňovat. Při splnění těchto požadavků je možné letět po přesné letové dráze, klíčová je v tomto případě schopnost poskytnutí výstrahy v případě nedostatečné navigační výkonnosti. Znázornění tratě, sestavené podle konvekční metody, RNAV a RNP jsou uvedené na obrázku č. 32. [53]



Obrázek 32: Trati, sestavené podle konvekční metody (vlevo), RNAV (uprostřed) a RNP (vpravo). [67]

Stanovení přesnosti těchto navigačních specifikací je založeno na číslech uvedených za názvem specifikace, například RNAV 2 nebo RNP 4. Například u navigační specifikace RNAV 5 horizontální přesnost určení polohy systému nesmí poklesnout pod 5 NM v 95 % doby letu. ICAO definuje čtyři specifikace pro RNAV a dále sedm specifikací pro RNP. Přehled specifikací je shrnut v tabulce č. 13. [53]

Tabulka 13: Přehled navigačních specifikací PBN. [55]

Navigation Specification	Flight Phase							
	En Route Oceanic Remote	En Route Continental	ARR	Approach				DEP
				Initial	Intermed	Final	Missed	
RNAV 10 (RNP 10)	10							
RNAV 5		5	5					
RNAV 2		2	2					2
RNAV 1		1	1	1	1		1	1
RNP4	4							
RNP2	2	2						
RNP1			1	1	1		1	1
Advanced RNP	2	2 or 1	1	1	1	0.3	1	1
RNP APCH				1	1	0.3	1	
RNP AR APCH				1-0.1	1-0.1	0.3-0.1	1-0.1	
RNP 0.3		0.3	0.3	0.3	0.3	-	0.3	0.3

Z tabulky lze vidět, že specifikace s nejnáročnějšími požadavky je RNP 0.3, která se v současné době používá výhradně pro vrtulníky. Podle Global Air Navigation Plan (GANP) 2013–2028 od ICAO [54] by tato specifikace měla v budoucnu podporovat fázi konečného přiblížení, a také by měla umožnit pokles vlivu vrtulníků na zatížení vzdušného prostoru. Dále byla během Workshopu ICAO v roce 2017 ohledně PBN prodiskutována možnost využití RNP 0.3 také pro letadla s pevným křídlem. [54, 56, 57]

4.1 Posouzení APNT systémů v konceptu PBN

Aby APNT systémy vyhovovaly v konceptu PBN, je potřeba splnit stanovené požadavky. Na začátku tohoto posouzení je vhodné zmínit, že všechny tyto systémy se vyvíjejí s ohledem na to, aby splňovaly požadavky RNP 0.3. Pro splnění této specifikace definuje ICAO čtyři parametry:

- Přesnost

Jak bylo zmíněno dříve, číslo za specifikací označuje požadavek na přesnost. V případě RNP 0.3 je 555,6 m. Tato hodnota odpovídá celkové chybě TSE (Total System Error – technická chyba letu), která se skládá ze složek FTE (Flight Technical Error – letová technická chyba), PDE (Path Definition Error – chyba definice dráhy) a NSE (Navigation System Error – chyba navigačního systému). Pro hodnocení systémů APNT z pohledu přesnosti je proto důležitá právě hodnota NSE. Aby tyto systémy vyhovovaly podmínce RNP 0.3, musí systémy tedy dosahovat daleko větší přesnosti, než je 555,6 m (hodnota TSE). [53]

- Integrita

V případě RNP 0.3 vyžaduje ICAO integritu na úrovni $1-10^{-5}$ [h^{-1}], což je stejná hodnota jako u posouzení z hlediska integrity v části 3.2 této práce. Během zmíněného posouzení bylo zjištěno, že integrita představených systémů buď splňuje požadovanou úroveň integrity, anebo zajišťuje integritu vyšší. [53]

- Kontinuita

Pro RNP 0.3 stanovuje ICAO následující definici kontinuity:

„Pro účely této specifikace se ztráta funkce klasifikuje jako malá poruchová podmínka pro lety ve vzdáleném kontinentálním vzdušném prostoru a pro námořní provoz. Instalace redundantních nezávislých dálkových navigačních systémů může splnit tento požadavek na kontinuitu. Ztráta funkce je klasifikována jako méně závažná poruchová podmínka

pro ostatní operace RNP 0.3, pokud se operátor může změnit na jiný existující navigační systém a pokračovat na příslušné letiště.“ [53]

Z této definice plyne zajištění kontinuity pro tuto specifikaci, které může být vyřešeno buď vybavením letadla redundantními nezávislými dálkovými navigačními systémy, nebo změnou navigačního prostředku za letu.

- Chyba SIS (Signal In Space)

Chyba Signal In Space je chyba přímo spojena se satelity, a to především s atomovými hodinami a polohou satelitu na oběžné dráze. Pro tento typ chyby ICAO stanovuje přesné požadavky na varování v případě překročení definované hranice chyby SIS. Tím, že se tato chyba vztahuje k satelitům, není potřeba řešit splnění tohoto požadavku v případě APNT systémů. [58, 59]

4.2 Využitelnost systémů APNT v PBN konceptu

Jak vyplývá z výše uvedeného posouzení jednotlivých výkonnostních parametrů PBN a posouzení jednotlivých APNT systémů v kapitole č. 3, všechny hodnocené systémy mají dle parametrů z dostupných zdrojů dostatečnou výkonnost i přesnost, aby splnily požadavky na použití v provozu konceptu PBN.

Vzhledem k tomu, že se dá očekávat, že hodnoty přesnosti a integrity byly ve většině případů uvedeny pro nejlepší možný případ, můžou se ve skutečném prostředí dosažené parametry značně lišit. Z tohoto důvodu je nutné při zavádění APNT systému zvážit potřebu dosažení výkonnostních požadavků pro vybranou navigační specifikaci a přizpůsobit jim celou implementaci systému.

Závěr

Motivace k napsání této práce spočívala v představení, odůvodnění, a především posouzení jednotlivých APNT systémů. Díky tomuto posouzení je vytvořen přehled jak navigační výkonnosti, tak doplňkových charakteristik. Představené ohodnocení je možné použít při výběru systému na konkrétním území a toto ohodnocení systémů se dá průběžně aktualizovat pro použití při návržení implementace v budoucnu.

Na začátku této práce byly detailně zpracovány zdroje a důsledky rušení GNSS. Dále byly představeny jednotlivé APNT systémy, které jsou v rámci projektu Jednotné evropské nebe považovány za možná řešení. Pro tento popis byly využity hlavně evropské zdroje, ale v některých případech, jako je DME Hybrid Ranging, i jiné zahraniční z toho důvodu, že tento systém je uvažován jako APNT řešení také ve Spojených státech amerických.

Ve třetí části práce bylo provedeno detailní posouzení na základě dostupných zdrojů, při kterém byla zhodnocena přesnost a integrita systémů LDACS, Mode N, eLoran a DME s použitím všech představených vylepšení. Porovnávací hodnotou pro tyto parametry byly zvoleny hodnoty přesnosti a integrity amerického GPS. Z výsledků posouzení vyplynulo, že nejlepší přesnosti dosahují systémy LDACS a eLoran. Nejvýkonnějším systémem z pohledu integrity je systém DME s vylepšením Multi-DME dosahující lepší integrity než systém GPS. Dalšími parametry pro hodnocení byly vybrány charakteristiky systémů pro snadnější implementaci, kde největšího bodového zisku dosáhl systém DME, a přínosné sekundární charakteristiky, kde největšího bodového zisku dosáhl systém eLoran. Ve výsledném hodnocení získaly nejvíce bodů systémy DME a eLoran. Menšího bodového zisku dosáhly systémy Mode N a LDACS. Celkové ohodnocení a jednotlivé bodové zisky byly následně zdůvodněny v samostatné podkapitole. Zejména hodnoty doplňkových charakteristik ukazují, že je velmi důležité, kam budou jednotlivé APNT systémy zaváděny, jelikož výhody každého z nich se dají použít v různých podmínkách provozu. Systém Mode N nemohl být plně posouzen kvůli nedostatku informací, jelikož některé hodnoty nejsou veřejně dostupné.

Další částí posouzení byl návrh zavedení APNT systémů na území Ruské federace. Byla popsána stávající síť radionavigačních zařízení na tomto území a jednotlivé systémy této sítě, které se dají využít na APNT systémy. Konkrétně byla navržena dvě řešení. Výběr jakéhokoliv řešení však bude vždy ovlivněn ekonomickými a politickými důvody.

Na závěr kapitoly byla ohodnocena možnost využití APNT systémů v konceptu s PBN, kde na základě dostupných informací bylo posouzeno, že všechny APNT systémy uvedené

v práci vyhovují specifikaci RNP 0.3. K tomuto výsledku bylo dospěno prostřednictvím dostupných informací. Z důvodů vysoké výkonnosti z pohledu integrity a přesnosti a z důvodu zaměření na tuto specifikaci RNP 0.3, autor předpokládá, že představené APNT systémy by mohly vyhovovat nejen nárokům RNP 0.3, ale také RNP 0.1 a budou představovat přijatelné pozemní zabezpečení při výpadku GNSS.

Autor došel k závěru, že všechny APNT systémy představené v bakalářské práci splňují veškeré nároky z popsaných pohledů. Nicméně vývoj a případná implementace popsaných APNT systémů jsou závislé na podpoře konceptů ze strany různých seskupení organizací a mezinárodních projektů (SESAR JU) či amerického NextGen a odvíjí se od celosvětových plánů modernizace v oblasti CNS, jako např. ICAO GANP. V případě takového zhodnocení systémů, které ovlivní zavádění nového palubního a pozemního vybavení, mohou být do výběru zahrnuta další ekonomická a politická hlediska, která nemohla být na základě dostupných informací v práci posouzena.

Seznam citací

- [1] List of Positioning Satellites [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <https://qzss.go.jp/en/technical/satellites/index.html>
- [2] SANZ SUBIRANA, J., J.M. JUAN ZORNOZA a M. HERNÁNDEZ-PAJARES. GNSS DATA PROCESSING: Volume I: Fundamentals and Algorithms [online]. TM-23/1. European Space Agency, 2013 [cit. 2020-08-07]. ISBN 978-92-9221-886-7. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/GNSS_Book/ESA_GNSS-Book_TM-23_Vol_I.pdf
- [3] GNSS Interference 2019 [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <https://safetyfirst.airbus.com/gnss-interference/>
- [4] POSPÍŠIL, Martin. RUŠENÍ SIGNÁLU GNSS A DOPAD NA LETECTVÍ. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Jakub Kraus. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/85336>
- [5] Jamming and Spoofing of GNSS Signals – An Underestimated Risk?! [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2015/papers/ts05g/TS05G_ruegamer_kowalewski_7486.pdf
- [6] VLČEK, Tomáš. GNSS RUŠENÍ. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Jakub Kraus. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/73192?show=full>
- [7] NARINS, Mitch, Sherman LO, Leo ELDREDGE, Mike HARRISON, Randy KENAGY a Per ENGE. Alternative Position, Navigation, and Timing -- The Need for Robust Radionavigation [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Alternative-Position-%2C-Navigation-%2C-and-Timing-The-Narins-Eldredge/f77415aca3927b29ef597a2ac4f38501773cc811>
- [8] Jammer-Store [online]. [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: www.jammer-store.com
- [9] The Navigation Solution [online]. [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1724>
- [10] SERGEI, Boguslavskii. Красуха 4: методы борьбы [online]. 2019 [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: <https://militaryarms.ru/voennaya-texnika/boevye-mashiny/krasuxa-4/>
- [11] ICAO ASSEMBLY — 40TH SESSION TECHNICAL COMMISSION, INTERFERENCE-RESILIENT SATELLITE-BASED CNS SYSTEMS, Assembly – 40th session[online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: https://www.icao.int/Meetings/a40/Documents/WP/wp_082_en.pdf
- [12] RQ-170 Sentinel [online]. [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: <http://ammokor.ucoz.ru/index/0-288>

- [13] PLENINGER, Stanislav, Ph.D. CNS (Communication-Navigation-Surveillance) Systémy [přednáška]. Praha: FD ČVUT, 2018/2019.
- [14] ICAO Nav specifications [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <https://www.icao.int/EURNAT/Other%20Meetings%20Seminars%20and%20Workshops/PBN%20and%20Associated%20PANS-OPS%20Provisions%20Workshops/PBN%20and%20Associated%20PANS-OPS%20Provisions%20Implementation%20Workshop%20Belarus/PBN%20and%20PANS%20OPS%20Imp%20Wkshp%20BLR%20PPT03.pdf>
- [15] TWELFTH AIR NAVIGATION CONFERENCE ICAO, Doc 10007 [online]. 2012 [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: https://cfapp.icao.int/tools/ATMiKIT/story_content/external_files/10007_en.pdf
- [16] NARINS, Mitch, Per ENGE, Sherman LO, Yu-Hsuan CHEN a Michael HARRISON. The Need for Robust and Resilient Position, Navigation, and Timing for the US National Airspace System [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: https://web.stanford.edu/group/scpnt/gpslab/pubs/papers/NarinsLo_ENCGNSS_2014.pdf
- [17] LAWRENCE, Deborah. Alternative Position , Navigation , and Timing [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/governance/advisory/meetings/2014-06/lawrence.pdf>
- [18] VITAN, Valeriu, Gerhard BERZ, Luca SAINI, Petr HOTMAR, Jean-Pierre ARETHENS a Boubeker BELABBAS. RESEARCH ON ALTERNATIVE POSITIONING NAVIGATION AND TIMING IN EUROPE [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8384887>
- [19] OSECHAS, Okuary a Valeriu VITAN. RESEARCH ON A-PNT IN EUROPE [online]. Institute for Communications and Navigation German Aerospace Center – DLR, 2018 [cit. 2020-08-10]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/governance/advisory/meetings/2018-12/osechas.pdf>
- [20] Future aeronautical communication LDACS [online]. [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <https://www.ldacs.com/>
- [21] GLIGOREVIC, Snjezana, Ulrich EPPLE a Michael SCHNELL. The LDACS1 Physical Layer Design [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/221917219_The_LDACS1_Physical_Layer_Design
- [22] HOFFMANN, Felix, Ulrich EPPLE a Michael SCHNELL. USING THE FUTURE L-BAND COMMUNICATION SYSTEM FOR NAVIGATION [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5935294>

- [23] SHUTIN, ELWISCHGER, SCHNECKENBURGER a BELABBAS. Positioning results for LDACS1 based navigation with measurement data [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Positioning-results-for-LDACS1-based-navigation-Schneckenburger-Elwischger/d62a6feff685148ac8f57ba0638f727995345360>
- [24] HAN, Shuan, Zijun GONG, Weixiao MENG, Chang LI a Xuemai GU. Future Alternative Positioning, Navigation, and Timing Techniques: A Survey [online]. 2016 [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7593455>
- [25] BELABBAS, Boubeker, Michael FELUX, Nicolas SCHNECKENBURGER a Michael MEURER. LDACS1 for an Alternate Positioning Navigation and Time Service [online]. German Aerospace Center (DLR), 2014 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/225025072_LDACS1_for_an_Alternate_Positioning_Navigation_and_Time_Service
- [26] Enhanced Loran (eLoran) [online]. 2007 [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <https://rntfnd.org/wp-content/uploads/eLoran-Definition-Document-0-1-Released.pdf>
- [27] HELFRICK, Albert. Principles of Avionics [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=0BI6ioB8kM8C&pg=PA81&lpg=PA81&dq=Time-of-transmission+control+eloran&source=bl&ots=seKJ_C3lKe&sig=ACfU3U1-XJek-CgwzLKO3mlsYf24TeBKYQ&hl=ru&sa=X&ved=2ahUKEwjMPTYv9HpAhUGwQIHHdawCQkQ6AEwAHoECAgQAQ#v=onepage&q&f=false
- [28] HELWIG, OFFERMANS, SCHUE a STOUT. ELoran System Definition and Signal Specification Tutorial [online]. 2011 [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <http://www.ursanav.com/wp-content/uploads/UrsaNav-ILA-40-eLoran-Signal-Specification-Tutorial.pdf>
- [29] Innovation: Enhanced Loran [online]. 2015 [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <https://www.gpsworld.com/innovation-enhanced-loran/>
- [30] Mode N–A Concept of Modern Navigation and an Alternative Position, Navigation & Timing System for Aviation[online]. Innovation im Fokus, 2017 [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: https://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Flugsicherung/Forschung%20&%20Entwicklung/Servicebereich/Forschungszeitschrift%20„Innovation%20im%20Fokus“/Fokus1702.pdf
- [31] MEURER, Michael. L-band Digital Aeronautical Communications System (LDACS) [online]. German Aerospace Center (DLR), 2020 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <https://tools.ietf.org/html/draft-maeurer-raw-ldacs-01#section-3.1>

- [32] DME [online]. Moderní Letecká Navigace [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: <http://www.airnav.eu/index.php?stranka=DME>
- [33] STEINGASS, Alexander. Analysis of DME/TACAN Interference in the Lower L-Band [online]. DLR [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: <https://elib.dlr.de/82284/1/ION%202013%20Paper%20Airborne%20DME.pdf>
- [34] NARINS, Mitch, Sherman LO, Per ENGE, Yu-Hsuang CHEN a Michael HARRISON. The Need for Robust and Resilient Position, Navigation, and Timing for the US National Airspace System [online]. [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: https://web.stanford.edu/group/scpnt/gpslab/pubs/papers/NarinsLo_ENCGNSS_2014.pdf
- [35] PLENINGER, Stanislav, Ph.D. DME [přednáška]. Praha: FD ČVUT, 2018/2019.
- [36] AREA NAVIGATION - RNAV - SYSTEMS [online]. 2020 [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: https://mediawiki.ivao.aero/index.php?title=Area_Navigation_-_RNAV_-_Systems#Author
- [37] Satellite Navigation – GPS – How It Works [online]. FAA, 2020 [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/gps/howitworks/
- [38] GPS Accuracy [online]. GPS.gov, 2020 [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>
- [39] Innovation: Digging into GPS Integrity [online]. GPS World, 2011 [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: <https://www.gpsworld.com/gnss-systeminnovation-digging-gps-integrity-12254/>
- [40] LANGLEY, Richard. Dilution of Precision [online]. GPS WORLD, 1999 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: https://pdfs.semanticscholar.org/c04c/d3dc971734ebe2ba1aa113e417e8b28b248c.pdf?_ga=2.202838929.1012386658.1596932972-12363048.1596501092
- [41] REPORT ON THE PERFORMANCE AND LEVEL OF INTEGRITY FOR SAFETY AND LIABILITY CRITICAL MULTI-APPLICATIONS [online]. EUROPEAN GNSS AGENCY, 2015 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: https://www.gsa.europa.eu/sites/default/files/calls_for_proposals/Annex%202.pdf
- [42] PŘEDPIS O CIVILNÍ LETECKÉ TELEKOMUNIKAČNÍ SLUŽBĚ SVAZEK II - SPOJOVACÍ POSTUPY L 10 [online]. Ministerstvo dopravy ČR, 2003 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-10/L-10ii/index.htm>

- [43] ELoran Points of Light [online]. Billerica, Massachusetts, USA: Courtesy of UrsaNav, 2016 [cit. 2020-08-07].
- [44] BELABBAS, Boubeker, Michael FELUX, Michael MEURER a Nikolas SCHNECKENBURBER. LDACS1 for an Alternate Positioning Navigation and Time Service [online]. 2014 [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/225025072_LDACS1_for_an_Alternate_Positioning_Navigation_and_Time_Service
- [45] OCHIENG, Washington Yotto. GPS Integrity and Potential Impact on Aviation Safety [online]. 2003 [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/231788519_GPS_Integrity_and_Potential_Impact_on_Aviation_Safety
- [46] BELABBAS, Boubeker, Rachit KUMAR, Okuary OSECHAS a Giuseppe BATTISTA. New APNT Ranging Signals as an Opportunity for Rationalizing Ground Infrastructure [online]. DLR, 2018 [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8384979>
- [47] GNSS - Global Navigation Satellite System [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <https://www.czechspaceportal.cz/en/section-3/gnss-systems/>
- [48] HORN, Andreas. Alternative Positioning, Navigation and Timing (APNT) options for aviation under scrutiny [online]. Tobias Buedel, 2019 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/335160016_Alternative_Positioning_Navigation_and_Timing_APNT_options_for_aviation_under_scrutiny
- [49] AIP of Russia book 1. International Aerodromes of the Russian Federation [online]. [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <http://www.caiga.ru/common/AirInter/?lang=en>
- [50] Нужны ли Вооруженным силам России радиотехнические системы дальней радионавигации? [online]. Vojennoje obrazovanije, 2013 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <https://topwar.ru/29362-nuzhny-li-vooruzhennym-silam-rossii-radiotekhnicheskie-sistemy-dalney-radionavigacii.html>
- [51] Радионавигационные системы LORAN-C и «ЧАЙКА» [online]. Radio systemy, 2007 [cit. 2020-08-09].
- [52] BATTISTA, Giuseppe, Rachit KUMAR, Okuary OSECHAS a Boubeker BELABBAS. New APNT Ranging Signals as an Opportunity for Rationalizing Ground Infrastructure [online]. German Aerospace Center (DLR), Institute of Communications and Navigation, 2018 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: https://elib.dlr.de/132811/1/icns_paper_12012018_biblatex.pdf
- [53] Performance-based Navigation (PBN) Manual [online]. International Civil Aviation Organization, 2013 [cit. 2020-08-09]. ISBN 978-92-9231-198-8. Dostupné z:

- http://www.peter2000.co.uk/aviation/icao-documents/DOC-9613_PBN-MANUA_R04_01JAN13.pdf
- [54] Global Air Navigation Plan 2013-2028 [online]. ICAO, 2013 [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2014/RRSTGO/GlobalAirNavigationPlan.pdf>
- [55] Introducing Performance Based Navigation (PBN) and Advanced RNP (A-RNP) [online]. EUROCONTROL, 2013 [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-06/2013-introducing-pbn-a-rnp.pdf>
- [56] DOGGETT, Ron. Performance Based Navigation Implementation [online]. Australian Government, Civil Aviation Safety Authority [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: https://www.icao.int/APAC/Meetings/meeting_PBN_TF10_archive/02%20-%20PBN%20New%20Specs.pdf
- [57] Performance Based Navigation WORKSHOP Session 1 [online]. ICAO, 2017 [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: <https://www.icao.int/APAC/Meetings/2017%20PBN%20Workshop/PBN%20Workshop%20BKK%20Session%201.pdf>
- [58] XINGXIN GAO, Grace, Haochen TANG, Juan BLANCH, Jiyun LEE, Todd WALTER a Per ENGE. Methodology and Case Studies of Signal-in-Space Error Calculation [online]. Stanford University, USA . KAIST, Korea [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: https://web.stanford.edu/group/scpnt/gpslab/pubs/papers/Gao_IONGNSS_2009.pdf
- [59] CHEN, Liang, Wenhai JIAO, Xiaorui HUANG, Changjiang GENG, Lun AI, Lu LU a Zhigang HU. Study on Signal-In-Space Errors Calculation Method and Statistical Characterization of BeiDou Navigation Satellite System [online]. China, 2013 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/289767574_Study_on_Signal-In-Space_Errors_Calculation_Method_and_Statistical_Characterization_of_BeiDou_Navigation_Satellite_System
- [60] OSECHAS, Okuary, Giuseppe BATTISTA, Shrivathsan NARAYANAN, Omar GARCÍA CRESPILO a Michael MEURER. Near and Long-Term Visions for APNT [online]. DLR, 2019 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8735395&tag=1>
- [61] TECHNICAL WORK PROGRAMME [online]. EUROCAE, 2019 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <https://www.eurocae.net/media/1567/eurocae-public-twp-2019.pdf>
- [62] Konzultace s Ing. Terezou TOPKOVOU, vedoucí této bakalářské práce. 2020, Praha.

- [63] SPURNÝ, Jan. Modulace OFDM. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Stanislav Hanus, CSc. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/2766/final-thesis.pdf?sequence=8&isAllowed=y>
- [64] The Electromagnetic Spectrum and the Color Light Spectrum [online]. [cit. 2020-08-10]. Dostupné z: <https://emandpplabs.nscee.edu/cool/temporary/doors/electrospectrum/spectrum.htm>
- [65] PLENINGER, Stanislav, Ph.D. GNSS part 1 [přednáška]. Praha: FD ČVUT, 2018/2019.
- [66] The Electromagnetic Spectrum and the Color Light Spectrum [online]. [cit. 2020-08-10]. Dostupné z: <https://emandpplabs.nscee.edu/cool/temporary/doors/electrospectrum/spectrum.htm>
- [67] Exposing a NextGen Fraud: the so-called 'Conventional' ZigZag Routes [online]. Aviation Impact Reform, 2016 [cit. 2020-08-10]. Dostupné z: <http://aireform.com/exposing-a-nextgen-fraud-the-so-called-conventional-zigzag-routes/>
- [68] KIM, Euiho a Jiwon SEO. SFOL Pulse: A High Accuracy DME Pulse for Alternative Aircraft Position and Navigation [online]. NCBI, 2017 [cit. 2020-08-10]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5677242/>
- [69] CZAPLEWSKI, KRZYSZTOF a ADAM WEINTRIT. THE IDENTIFICATION OF POSSIBLE APPLICATIONS OF THE E-LORAN SYSTEM: ANNUAL OF NAVIGATION 25/2018 [online]. 2018 [cit. 2020-08-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/334068349_The_Identification_of_Possible_Applications_of_the_E-Loran_System

Seznam obrázků

Obrázek 1: Segmenty GNSS. [2].....	12
Obrázek 2: Princip zjištění polohy GNSS. [9]	14
Obrázek 3: Rozdělení GNSS rušení. Zdroj: autor	15
Obrázek 4: Přehled PPD. [8]	17
Obrázek 5: Krasnuča – 4. [10].....	17
Obrázek 6: UAV Lockheed Martin RQ-170 Sentinel. [12]	18
Obrázek 7: Dálnice vedle airfieldu na letišti v Newarku. [34].....	19
Obrázek 8: Výkonnostní požadavky FAA pro APNT systémy. [7]	23
Obrázek 9: Signál LDACS mezi pulzy DME. [18]	25
Obrázek 10: Struktura framů LDACS. [22]	26
Obrázek 11: Výsledky modelace DLR v Německu. [25].....	28
Obrázek 12: Umístění DME stanic. [18]	29
Obrázek 13: Umístění LDACS stanic. [18]	29
Obrázek 14: Přesnost sítě DME stanic. [18].....	30
Obrázek 15: Přesnost spolupráce DME a LDACS. [18]	30
Obrázek 16: Výpočet polohy pomocí principu hyperbolické navigace. Zdroj: autor	31
Obrázek 17: Princip zjištění polohy eLoran. [28]	32
Obrázek 18: Princip zajištění doplňkové informace eLoran. Zdroj: autor	33
Obrázek 19: Systémy pracující v intervalu 960-1215 MHz pásma L. [30].....	35
Obrázek 20: Možnost zabudování Mode N zařízení na palubě. Obrázek vlevo – zabudování zvlášť, obrázek vpravo – kombinace SSR/Mode S a Mode N. [30].....	36
Obrázek 21: Ukázka dvou impulzu DME. [33].....	37
Obrázek 22: Princip zjištění polohy pomocí DME/DME. [36].....	38
Obrázek 23: Současná přesnost DME. Světle modrá křivka – chyba podle dnešních standardů, červená – 2 sigma ze skutečných chyb, zelená – 95 % procent výsledku leží pod touto křivkou. [18].....	39
Obrázek 24: Princip DME Hybrid Ranging. Zdroj: autor	40
Obrázek 25: Ukázka špatné a dobré geometrie stanic. [40].....	44
Obrázek 26: Umístění En-Route radionavigačních zařízení na území Ruské federace.	53
Obrázek 27: Umístění stanic systému Chaika. [50].....	54
Obrázek 28: Umístění radionavigačních zařízení, nabízejících možnost pro modernizace na APNT.	55
Obrázek 29: Schematické pokrytí APNT systémů při zavedení systémů Mode N a LDACS v západní části Ruské federace. Modře – Mode N a LDACS, červeně – eLoran.	56

Obrázek 30: Sestavení konvenční tratě. [53]	57
Obrázek 31: Sestavení tratě pomocí RNAV. [53]	58
Obrázek 32: Trate, sestavené podle konvekční metody (vlevo), RNAV (uprostřed) a RNP (vpravo). [67]	59

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled parametrů kosmického segmentu globálních navigačních systémů. [1]	12
Tabulka 2: Chyba polohy GNSS při neantropogenním rušení. [6]	16
Tabulka 3: Porovnání výkonnosti GNSS a DME/DME/IRS. [14]	20
Tabulka 4: Výsledné hodnoty při použití nového algoritmu. [18]	42
Tabulka 5: Porovnání přesnosti APNT systému s přesností GPS. [46, 68, 69]	44
Tabulka 6: Zhodnocení z hlediska přesnosti.	45
Tabulka 7: Porovnání přesnosti APNT systému s integritou GPS. [18, 26, 44]	45
Tabulka 8: Výsledné hodnocení z hlediska integrity	46
Tabulka 9: Ohodnocení APNT systémů z hlediska implementace	49
Tabulka 10: Dosah jednotlivých APNT systémů. [35, 43, 46]	50
Tabulka 11: Ohodnocení APNT systému z hlediska sekundárních charakteristik.	51
Tabulka 12: Výsledné hodnocení APNT systémů.	51
Tabulka 13: Přehled navigačních specifikací PBN. [55]	59