

V Š B – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Ústav letecké dopravy

Aplikační možnosti prostorové navigace

Application Possibilities of RNAV Systems

Student:

Vojtěch Pešat

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Rudolf Volner, CSc.

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student:

Vojtěch Pešat

Studijní program:

B3712 Technologie letecké dopravy

Studijní obor:

3708R037 Technologie provozu letecké techniky

Téma:

Aplikační možnosti prostorové navigace
Application Possibilities of RNAV Systems

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu a vlastností.
2. Hardware-ové a software-ové řešení.
3. Aplikační možnosti.
4. Prezentační program.

BP musí v rámci úvodu obsahovat kapitolu se stanovením cílů práce a v závěru zhodnocení dosažených cílů.

Seznam doporučené odborné literatury:

Volner, R. a kol. Flight Planning Management. Brno: CERM Brno. 2007. ISBN 978-80-7204-496-2

Volner, R. Letecká radiotechnika. Praha: ČVUT Praha. 2003. ISBN 80-7204-294-7

Volner, R. Digitální technologie - elektronické přístrojové systémy. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2007. ISBN 978-80-248-1640-1

Volner, R. Radionavigace I. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2008. ISBN 978-80-248-1917-4

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

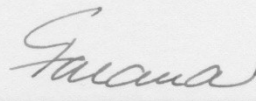
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Rudolf Volner, CSc.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Ing. Vladimír Smrž, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ STUDENTA

Já, Vojtěch Pešat, student Ústavu letecké dopravy Fakulty Strojní Vysoké Školy Báňské, prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne

.....

podpis studenta

Vojtěch Pešat
Nádražní 707
Vřesina, 742 85

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PEŠAT Vojtěch: Aplikální možnosti prostorové navigace.

Ostrava: Institut dopravy – Ústav letecké dopravy. Fakulta Strojní. VŠB – Technická Univerzita Ostrava, 2011, 44 stran, Bakalářská práce

Vedoucí: prof. Ing. Rudolf Volner, CSc.

Bakalářská práce se zabývá problematikou prostorové navigace a jejím využití v letecké technice. V úvodu jsou popsány komponenty celého systému, dále práce popisuje právní a normativní nařízení příslušných úřadů, softwarovým a hardwarovým řešením systému na typu letadla Boeing 737. Celý dokument se zaměřuje především na uživatelskou, to znamená pilotní stránku věci.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

PEŠAT Vojtěch: Application Possibilities of RNAV Systems.

Ostrava: Department of Air Transport. Faculty of Mechanical Engineering. VŠB – Technical University of Ostrava, 2011, 44 pages, Bachelor thesis.

Thesis head: prof. Ing. Rudolf Volner, CSc.

Bachelor thesis is dealing with area navigation and its utilization in aeronautical technics. In the beggining the main components of the whole system are described, further the thesis describe laws and norms related to the this problematic, software and hardware solutions on Boeing 737 aircraft type. The entire document is focused mainly for users – pilots.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych na tomto místě poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce, prof. Volnerovi, za jeho připomínky ke zpracování bakalářské práce. Rád bych poděkoval také pilotům z Czech Connect Airlines a.s., za poskytnuté materiály, názory, připomínky a obětovaný čas.

Děkuji.

OBSAH

	strana
Seznam použitých zkratek	9
0. CÍLE PRÁCE	11
1. ÚVOD	12
2. ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU PROSTOROVÉ NAVIGACE.....	13
2.1 Cíle RNAV	15
3. VSTUPNÍ INFORMACE SYSTÉMU RNAV	17
3.1 NDB	17
3.2 VOR	19
3.3 DME	21
3.4 ILS/ MLS.....	23
3.5 GNSS.....	25
3.6 IRS.....	29
3.7 LORAN C	31
4. VNITŘNÍ STRUKTURA RNAV	32
4.1 Směrová navigace (LNAV).....	32
4.2 Vertikální navigace (VNAV)	33
4.3 Databáze FMC.....	39
5. TYPY PROSTOROVÉ NAVIGACE.....	40
5.1 B-RNAV.....	40
5.2 P-RNAV	40
5.3 RNP-RNAV	41
6. NAVIGAČNÍ HARDWARE – BOEING 737	43
6.1 CDU	43

6.2	AFDS postupy	48
6.3	ADC poznámka	48
7.	VYHODNOCENÍ CÍLŮ	49
8.	ZÁVĚR	50
9.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	51

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Anglicky	Česky
AAIM	Aircraft autonomous integrity monitoring	Nezávislé sledování integrity leteckými systémy
A / T	Auto throttle	Automatický tah motoru
ABAS	Aircraft based augmentation system	Letadlový zpřesňující systém
ACT	Active	Aktivní
ADC	Air data computer	Počítač letových parametrů
ADF	Automatic direction finder	Automatický ukazatel směru
AFDS	Automatic flight director system	Automatický systém řízení
AFM	Aircraft flight manual	Letadlová příručka
AGL	Above ground level	Nad zemským povrchem
AIP	Aeronautical Information Publication	Publikace leteckých informací
AMSL	Above mean sea level	Nad mořem
AP	Autopilot	Autopilot
CDU	Control display unit	Jednotka řídicího displeje
CLR	Clear	Smazání
DME	Distance measuring equipment	Dálkoměrné zařízení
DVOR	Doppler VOR	Dopplerovský VOR
E / D	End of descent	Konec klesání
EADI	Electronic attitude deviation indicator	Elektornický indikátor poloh letadla (umělý horizont)
EHSI	Electronic horizontal situation indicator	Elektornický indikátor horizontální situace
ETA	Estimated time of arrival	Odhadovaná doba přiletu
FCOM	Flight crew operational manual	Provozní příručka letové posádky
FL	Flight level	Letová hladina
FMC	Flight management computer	Počítač řízení letu
FMS	Flight management system	Systém řízení letu
FPL	Flight plan	Letový plán
GBAS	Ground based augmentation system	Pozemní zpřesňující systém
GNSS	Ground navigation satellite system	Systém satelitní navigace
GP	Glide path	Sklužová rovina
GPWS	Ground proximity warning system	Výstražný systém blízkosti země
GS	Ground speed	Rychlost vůči zemi
ICAO	International civil aviation organization	Mezinárodní organizace pro civilní letectví

ILS	Instrument landing system	Přístrojový přistávací systém
INS	Inertial navigation system	Inerční navigační systém
IRS	Inertial reference system	Inerční referenční systém
LNAV	Lateral navigation	Horizontální navigace
LOC	Localizer	Směrová rovina
LORAN	Long range navigation	Navigace na dlouhé vzdálenosti
LS	Load sheet	Formulář hmotnosti a vyvážení
MCP	Mode control panel	Módový kontrolní panel
MLS	Microwave landing system	Mikrovlnný přistávací systém
MRK	Marker	Polohové návěstidlo
MSG	Message	Zpráva
N1	Engine RPM	Otáčky motoru
NDB	Non-directional beacon	Všesměrový maják
NM	Nautical miles	Námořní míle
OFST	Offset	Přehození
RAIM	Receiver autonomous integrity monitoring	Nezávislé sledování integrity přijímačem
RNAV	Area navigation	Prostorová navigace
RNP	Required navigation performance	Požadovaná navigační výkonnost
RTA	Required time of arrival	Zadaný čas přiletu
RTE	Route	Trasa
SBAS	Satellite based augmentation system	Satelitní zpřesňující systém
S / C	Start of climb	Začátek stoupání
SID	Standard instrument departure	Přístrojový odlet
STAR	Standard arrival	Přístrojový přilet
T / C	Top of climb	Vrchol stoupání
T / D	Top of descent	Vrchol klesání
TOGA	Take-off, Go-around	Vzlet, nezdařené přiblížení
TMA	Terminal monitoring area	Koncová řízená oblast
UHF	Ultra-high frequency	Ultravysoká frekvence
V / S	Vertical speed	Vertikální rychlost
VHF	Very high frequency	Velmi vysoká frekvence
VNAV	Vertical navigation	Vertikální navigace
VOR	VHF omnidirectional beacon	VHF radiomaják
WGS	World geodetic system	Světový geodetický systém
WPT	Waypoint	Traťový bod

0. CÍLE PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je seznámení s tematikou prostorové navigace. Práce v první části popisuje technické prostředky pro zajištění provozu systému prostorové navigace a požadavky na její přesnost, integritu a použitelnost.

Ve druhé části jsou popsány konkrétní systémy, které přijaté informace zpracovávají z praktického pohledu pilota a jsou nastíněny postupy, které jsou důležitou součástí v soukolí prostorové navigace. Hardwarové zařízení pro řízení operací RNAV z letadel Boeing, je popsáno na konci práce.

Celý popsáný systém je poté aplikován do praxe popisem typů prostorové navigace a jejich využitím v budoucím vzdušném prostoru.

1. ÚVOD

Dlouhodobý pozitivní vývoj světové ekonomiky má na leteckou dopravu obrovský vliv. Jak silný tento vliv je, jsme si uvědomili nedávno, při ekonomické krizi, kdy stagnace ekonomiky dramaticky postihla letectví obecně. Letecká doprava a s ním spojené cestování, se jeví v posledních několika letech jako jeden z pilířů moderního světa tak, jak ho dnes vnímáme. Letectví je zkrátka stále mladým a dynamickým oborem a nynější životní styl napovídá, že jím ještě jistou dobu bude.

Samotné letectví se neustále vyvíjí tak, aby vyhovělo zvyšujícím se požadavkům na bezpečnost, pravidelnost a celkové pohodlí pasažérů. Dalším faktorem, který je bedlivě sledován, jsou ceny letenek, odvíjející se v neposlední řadě z celkové hospodárnosti letu. A tu ovlivňuje délka letěných tratí, kterou právě principy prostorové navigace (RNAV) podstatně zkracují.

Celkový nárůst letecké dopravy se také na mnoha místech potýká s hustým provozem a omezeným prostorem. Pokud má letectví splnit současné predikce a do roku 2020 zdvojnásobit počet přepravených pasažérů vzhledem k roku 2008 [8], musí se otázka propustnosti vzdušných prostorů urychleně řešit.

2. ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU PROSTOROVÉ NAVIGACE

Prostorová navigace je zaváděna primárně kvůli zvýšení propustnosti přeplněných vzdušných prostorů. Na provozovatele na jedné straně klade vyšší nároky na vstupní investice kvůli vysokým cenám těchto systémů, na druhou stranu dává provozovatelům možnost využít ideální letové profily a přímější letové cesty.

Úplný abstrakt ze systému RNAV je možné si představit jako systém, který vytváří virtuální model Země a udává nám naši polohu v tomto modelu. Zároveň zná všechny WPT, letové tratě, SIDy, STARy a polohy všech pozemních navigačních prostředků na daném území.

Prostorová navigace je způsob navigace umožňující letadlu navigaci ve všech fázích letu z místa A do místa B, bez nutnosti létání přes jednotlivé pozemní radionavigační prostředky, od jednoho k druhému. Trať musí být pokryta signálem navigačních prostředků, nebo se využije palubních samočinných navigačních zařízení, ve většině případů se však pracuje s kombinací obojího.

RNAV systémy využívají pro získání systémové polohy jeden nebo více zdrojů informací ze zařízení VOR, DME, ILS, MLS, Loran-C, GNSS, INS, IRS, ADC. Parametry těchto podsystémů jsou limitující i pro celý systém prostorové navigace, a proto jim věnují celou kapitolu 2, kde jsou systémy detailněji popsány.

Obecně je platné tvrzení, že spolehlivost RNAV je zvyšována zlepšováním parametrů svých podsystémů. Sledované faktory jsou zejména spolehlivost, integrita (dostupnost a nepřetržitost provozu) a přesnost informací. Všechny údaje z dostupných navigačních zařízení jsou zpracovávány systémem RNAV. Výsledkem musí být nejspolehlivější možná informace o poloze letadla, neustále se obnovující a další dodatečné informace pro letovou posádku.

Je zřejmé, že tratě letěné pomocí RNAV systémů jsou podstatně kratší, než let od VORu k VORu. Místo létání nad radionavigačními prostředky se let provádí přes WPTy, které jsou definované na základě pozice od pozemních navigačních zařízení, nebo které jsou dány souřadnicemi. Trať RNP se potom chová jako ochranná zóna této letové cesty.

Prostorová navigace se dělí podle dimenzí, ve kterých letadlo naviguje na:

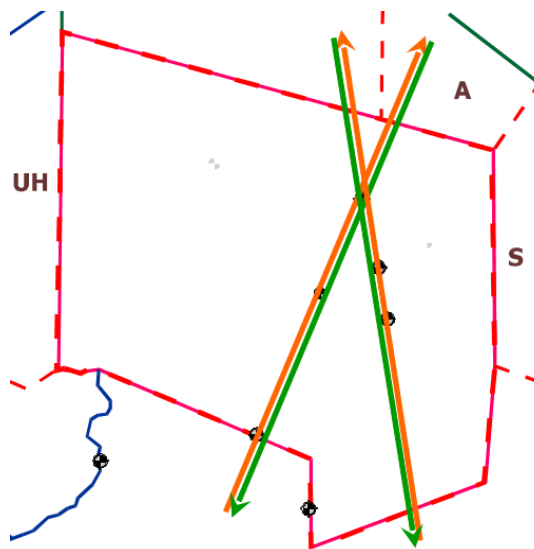
2D – LNAV, navigace pouze v rovině horizontální

3D – do procesu se zapojí VNAV, trojdimenzionální navigace

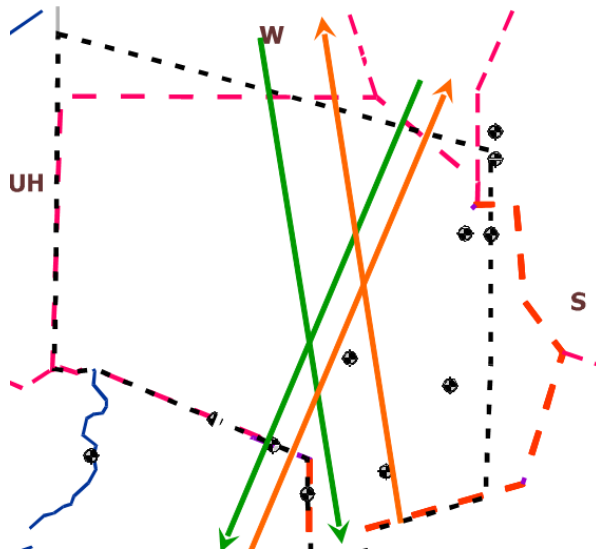
4D – systém bere v úvahu i čas, komplexní navigace v prostoru a čase

Další výhodou zavádění systému RNAV, jedna z hlavních, je zvyšování propustnosti vzdušného prostoru. Není-li potřeba létat přes radiomajáky, plánovači leteckých cest mohou rozdělit předtím obousměrné trasy horizontálním způsobem (viz obr. 1.1 a 1.2). Vyšší kapacita prostoru je dána logicky i zkrácením uletěných tratí. Důraz se klade na zvyšování, nebo minimálně udržení bezpečnosti provozu.

Zavedení paralelních a zdvojených tras je umožněno zvýšenou přesností navigace tak, že letadla mohou letět blíž sobě, protože jejich poloha je známa s větší přesností a dá se tak zaručit bezpečný rozestup obou strojů v prostoru.



obr. 2.1 – Letové trasy před RNAV (ideálně)



obr. 2.2 – Letové trasy RNAV

Další velkou výhodou systému RNAV je možnost zavádění nových přibližovacích tratí i na letištích, která nejsou vybavena vhodnými pozemními navigačními prostředky. Do úvahy zejména v Americe připadávají GPS přiblížení, které mohou být definovány na jakkoliv malém letišti. Náklady na zavedení takového systému jsou neporovnatelně menší než údržba například systému ILS.

2.1 CÍLE RNAV

Na základě předcházející kapitoly si dovoluji formulovat hlavní cíle RNAV schematicky.

- **Letové trasy**
 - rozhodování o výběru trasy je flexibilnější
 - možnost volby „ortodromických“ tratí
 - zavedení paralelních letových cest
 - zkrácení celkové doby letu
 - RVSM
 - růst kapacity vzdušného prostoru
- **Přiletové a odletové trasy**
 - zavádění přístrojového přiblížení na dosud nevybavené letiště
 - jednodušší postupy SID a STAR
 - snížení hlukové zátěže poblíž obydlených oblastí
 - efektivnější postupy ATC při řazení letadel na přistání

- **Ekonomika**
 - snížení celkové spotřeby paliva
 - možnost postupného rušení pozemních navigačních zařízení
- **Pracovní zátěž posádky**
 - předpoklad podstatného snížení

3. VSTUPNÍ INFORMACE SYSTÉMU RNAV

System RNAV dostává vstupní informace z celé řady oddělených navigačních prostředků. Na těchto zařízeních poté stojí přesnost určení systémové polohy. V Boeingu je systém nastaven tak, že primární je dvojitý IRS, který zpřesňuje svoji polohu pomocí ostatních navigačních prostředků.

3.1 NDB

Pozemní vysílače NDB jsou navigační prostředky, jež vysílají signál do všech směrů rovnoměrně. Letadlový systém, který využívá majáků NDB k navigaci, se jmenuje ADF a jeho indikátor ukazuje směrem na naladěný maják.

Maják NDB, fungující v Evropě obvykle ve spektru 225 – 455 kHz, vyzařuje nosnou vlnu amplitudově modulovanou nízkofrekvenčním identifikačním znakem. Existují dva typy vyzařovacích charakteristik:

- Majáky s krátkým dosahem – N0N A1A
- Majáky s dlouhým dosahem – N0N A1A

Záření A1A kóduje nosnou vlnu. Pro příjem zvukového signálu je ale potřeba druhé, vlastní frekvence. Aby bylo možné přijímat i druhou, “audio” frekvenci, musí být N0N frekvence spárované.

A2A záření moduluje frekvenci zvukové stopy přímo na nosnou vlnu NDB a přijímán je pouze jeden signál. Demodulátor v tomto případě vysílá identifikační tón do sluchátek pilota.

Základem měření úhlu osy letadla od majáku je rámová anténa s nesměrovou anténou. Otočná rámová anténa se otáčí kolem své svislé osy do té chvíle, než se zjistí minimální příjem indukovaného napětí. Protože tyto místa jsou při osmičkové vyzařovací charakteristice dvě, přidávám pro jednoznačnost indikace všesměrovou anténu. Sloužená charakteristika rámové a všesměrové antény potom vytváří srdcovku, která již má minimum jen jedno a indikace směru je tím jednoznačná.

V dnešní letecké technice se využívají dvě nepohyblivé rámové antény a goniometrickým výpočtem se počítá místo nejmenšího indukovaného napětí, které je přenášeno na ručku indikátoru ADF.

System ADF je ovlivněn několika typy chyb, obecně ale platí, že čím výš se letadlo nachází, tím je indikace NDB přesnější a méně zatížená chybovostí. Následující chyby musí být brány v potaz:

3.1.1 Chyba odrazem od ionosféry

Během soumraku a úsvitu se objevuje tato chybovost, která má za následek rozkmitání indikace ADF. Je to následek příjmu odražených signálů od ionosféry v oblasti 50 až 100 km od majáku NDB. Čím je letadlo dál od stanice, tím je rozkmit větší, eliminuje se určením průměru, okolo kterého indikace kolísá, nebo je-li to možné, přeladěním na NDB vysílajícím v pásmu pod 350 kHz, které jsou touto chybou ovlivněny jen minimálně.

3.1.2 Chyba odrazem od hor či útesů

Odrazem od nerovných ploch se směr paprsků může měnit, proto je v blízkosti pohoří a jiných zemských nerovností indikace ADF často neurčitá. Vhodné je ladit jen silné majáky, nebo létat ve vyšších hladinách, kde se tato chyba tolik neprojeví.

3.1.3 Pobřežní chyba

Nízkofrekvenční rádiové vlny mohou být ohýbány nebo lámány při přechodu z vody na pevninu nebo obráceně. Pilot letící nad vodní hladinou by tedy neměl využívat NDB signál, když přelétává pobřeží pod úhlem menším než je 30°.

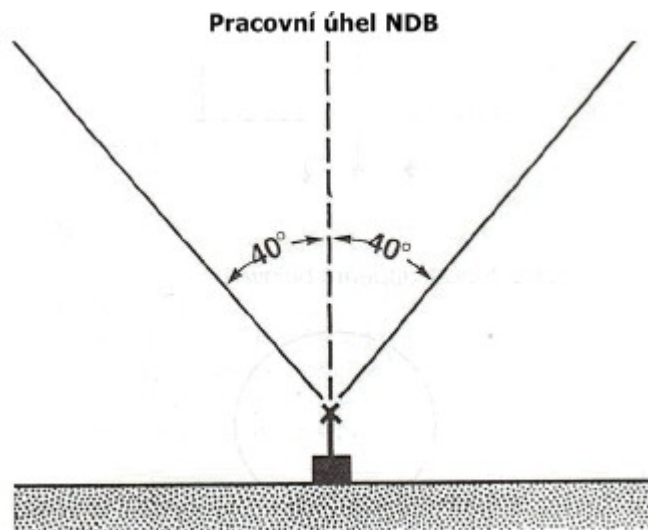
3.1.4 Vliv bouřek

Silné elektrické výboje v blízkosti bouřek způsobují změnu indikace ADF do místa výskytu takového elektrického výboje. Výchyly ručky způsobené bouřkou je vhodné ignorovat.

3.1.5 Pracovní úhel NDB

Pracovní úhel majáku NDB ohraničen místy, kde je přijímaný signál o víc než 50% slabší než vyzařované maximum. Toto vychází v průměru někde k elevačnímu úhlu 40°, kde

indikace bude zatížena chybou. Při letové hladině FL 360 se jedná o kruh v průměru 20km, se středem v místě majáku, kde se pohybujeme v “hluché” oblasti.



obr. 3.1 - NDB

Výhodou tohoto staršího systému je jeho ekonomická nenáročnost i fakt, že je nízkofrekvenční a tím pádem má delší dosah než dnes běžné VHF radiostanice. Na rozsáhlých územích třeba Ruska, je také stále jedinou pozemní navigační možností. Úhlová přesnost NDB by měla být do intervalu $\pm 6^\circ$.

ADF systém automaticky indikuje magnetický a relativní směr k vybranému zařízení NDB. Signály z ADF (většinou jsou instalovány dva nezávislé systémy ADF) jsou zobrazeny na obrazovce EHSI, nebo RDMI. S ADF je také přijímaný specifický zvukový signál pozemní stanice. Lze ho odposlechnout, zvolením na zvukovém přepínacím ovladači.

Když je informace o kurzu nebo HDG neplatná, nebo není přijatá, na EHSI se informace nezobrazí a na RDMI nebude indikován správný směr.

Obecně se dá říct, že majáky NDB jsou zastaralé a dávno překonané pozemní navigační prostředky, a proto se postupně vyřazují z provozu.

3.2 VOR

VOR je směrově vyzařující rádiový maják na krátké vzdálenosti, který umožňuje palubním přístrojům měřit radiály, to znamená ortodromické směry od majáku k letadlu (QDR), nebo opačně, od letadlu k majáku (QDM). V praxi je ještě maják VOR často spřažen se zařízením

DME, takže poloha letadla vzhledem k pozemnímu zařízení je jasně dána. Toto spojení směrového majáku VOR a zařízení na měření vzdáleností DME je základem pro blízkou rádiovou navigaci, na níž je založena evropská prostorová navigace. Vojenský systém TACAN je kombinace směrového majáku a DME.

Modernější forma systému VOR je DVOR (Dopplerovský VOR), využívající Dopplerova jevu při určování radiálů.



obr 3.2 - DVOR na letišti KSRQ (Sarasota, FL, USA), foto: Autor

Přiřazené kmitočtové pásmo, ve kterém zařízení VOR pracuje je od 108,00MHz do 117,95MHz. Znamená to celkem 160 možných kmitočtů, se vzájemným rozestupem 50kHz, přitom v pásmu 108,00 – 111,975 jsou používány pouze na jmenovitých kmitočtech, které mají na místě desetiny MHz sudou číslici.

Pozemní stanice VOR se skládá ze dvou druhů antén. Všesměrový unipól vysílá referenční signál, který přináší do měření VOR základní informaci, a to počátek měření fáze. Proto je fáze referenčního signálu v každém bodě okolí stejná. Směrová anténa vyzařuje harmonický signál na nosném kmitočtu. Tím, že se směrová anténa otočí třicetkrát za sekundu, je jeho amplituda v každém místě příjmu periodicky měněna s kmitočtem 30Hz. Tento proměnný signál slouží jako měřicí signál v místě každého letadla.

V letadlové stanici VOR se fáze porovnávají měřením rozdílu fází mezi dvěma napětími o stejných kmitočtech.

Dosah vysílačů VOR je ovlivněn výkonem vysílače, terénem v okolí, ale hlavně výškou letu. Teoretický dosah signál VOR lze orientačně spočítat tímto vzorcem:

$$\text{Maximální teoretický dosah [NM]} = 1.25 * [(H_1)^{0,5} + (H_2)^{0,5}]$$

H_1 = AMSL výška antény majáku VOR [ft]

H_2 = AMSL výška letu [ft]

Pro ilustraci, když je letadlo v FL 360, maják VOR v 0 ft AMSL, maximální dosah signálu VOR, vychází přibližně 240 NM. Oblast pokrytí signálem VOR je tedy ve výšce 36 000 ft kruh s průměrem 480 NM. Majáky DVOR mají dosah ještě delší.

Celková chyba nesmí překročit 5° a čím blíže je letadlo majáku VOR, tím je měření přesnější. Chybovost může způsobit i takový detail jako je vzrostlá tráva, stromy, nebo budovy v okolí majáku VOR.

Stejně jako u NDB, i u zařízení VOR mluvíme o mrtvém kuželu (oblast bez signálu), minimální požadavek ICAO správnosti indikace je v elevačním úhlu 40° (až 100° úhel mrtvého kužele), ale většina majáků má mrtvý kužel znatelně užší- 20°-30°.

RNAV umí zpracovávat systémovou polohu z měření dvou rozdílných stanic VOR jednoduchým průsečíkem dvou radiálů, nebo definováním WPT na základě radiál/ vzdálenost.

3.3 DME

Dálkoměrný systém DME se používá na měření šikmé vzdálenosti letadla od pozemního majáku. V letadle je palubní dotazovač, pozemní maják plní funkci odpovídače.

Palubní dotazovač vysílá dvojice impulsů s předem definovaným intervalem. Při příjmu pozemního odpovídače je signál s předem definovaným zpožděním poslán na frekvenci zpět, zpětně přijat do letadla a vzdálenost od letadla od majáku vypočítána na základě rozdílu časů vyslání a přijmutí.

DME má většinou párované kmitočty se zařízením VOR umístěným na společném místě. Posádce letounu proto stačí jen naladit frekvenci VOR a frekvence DME je nastavena automaticky. Pásmo provozních kmitočtů dotazovače a odpovídače DME je 960 až 1215 MHz

Dosah DME je limitován nejvíce tím, že funguje jen na přímou dohlednost. I tak je schopen dosáhnout a spolehlivě využít signálu DME letadlo vzdálené až 200 NM. Negativně na integritu sledování se projevují terénní nerovnosti, které mohou zastínit přímou viditelnost.

Přesnost se mění v závislosti na vzdálenosti letadla od majáku. Podle ICAO specifikace musí DME splňovat přesnost $0,25 \text{ NM} \pm 1,25\%$ měřené vzdálenosti v 95% případech měření. Tato povolená odchylka v sobě už zahrnuje chyby na palubním i pozemním zařízení DME, vliv poruch v troposféře a vliv interference v prostředí.

Je nutné vědět, že se jedná o šikmou vzdálenost, nikoliv vodorovnou. Tento fakt se dá zanedbat, když je letadlo od majáku daleko, když se ale letoun přiblíží majáku DME na zhruba trojnásobek výšky, je potřeba vzdálenost šikmou, přepočítávat pomocí Pythagorovy věty. V poloze přímo nad DME je šikmá indikovaná vzdálenost rovna výšce nad majákem, respektive nad terénem. Mrtvý úhel zařízení DME je malý, až zanedbatelný a většinou nedochází k přerušování měření díky paměti palubního zařízení.

Toto zařízení se dá také využít pro měření pozemní rychlosti (GS), ale hlavně je základním prostředkem realizace prostorové navigace. Měření vzdáleností od dvou rozdílných vysílačů DME je velmi přesné a spolehlivé. Jeden pozemní maják dokáže obsloužit až 100 letadlových dotazovačů.

Většinou jsou v letadle instalovány dva na sobě nezávislé systémy DME. FMC dokáže ladit jejich frekvence v závislosti na poloze letadla automaticky, nebo je možné tyto frekvence ladit manuálně na VHF navigačním panelu. Rozhoduje poloha přepínače AUTO / MANUAL.

Do FMC je dodávána velmi přesná informace o poloze právě díky systému DME, když se palubní systémy DME naladí na dva rozdílné majáky DME, nebo na spřažený VOR / DME. Vzdálenost od majáku DME je zobrazena na EHSI.

3.3.1 TACAN

Systém TACAN - Taktický navigační systém – je sdružený dálkoměrný systém DME se systémem úhломěrným. Je používán vojenským letectvem na západě a pro civilní létání je určen VORTAC, kombinace mezi úhломěrným zařízením VOR a dálkoměrným DME využitým z TACANu.

3.4 ILS/ MLS

ILS je primární přistávací systém, vyznačuje se vysokou přesností a je proto důležitý při fázi konečného přiblížení na přistání. Díky informacím z ILS je možné provádět i automatické přiblížení a přistání.

Přesné přiblížení je definováno tak, že dává informaci jak o směrovém, tak vertikálním vedení. Toto ILS splňuje, protože má jak skluzovou rovinu (glide), tak směrovou rovinu (localizer). ILS signál splňuje požadavky na integritu a uvádí jasné pokyny pro pilota jak letadlo držet ve středu obou rovin. Systém ILS je většinou ještě propojen se systémem DME, pro větší přesnost než varianta s návěstidly (markery).

LOC a glide fungují na oddělených frekvencích (LOC na VHF od 108 do 112 MHz, vždy na lichých desetínách s posunem po padesáti kHz a glide na UHF 329,15 – 335 MHz s posunem po 150 kHz). Frekvence LOC/glide jsou párovány, to znamená, že při zvolení frekvence ILS (zadáva se frekvence LOC) se frekvence glidu automaticky přiřadí. Návěstidla mají nosnou frekvenci VHF 75MHz.

3.4.1 Směrová rovina (LOC)

Anténa LOC vysílače je umístěna většinou na středové čáře RWY přibližně 300 metrů za koncem RWY. Samotné zařízení je široké zhruba 20 metrů a má tři metry na výšku a skládá se z řady dipólů a reflektorových jednotek. Rádiový signál vyzařovaný směrovou anténou LOC vytváří složený vzor ze dvou polí, které se vzájemně kříží. Oba signály jsou na stejné frekvenci jinak modulovány tak, aby je letadlová stanice dokázala od sebe rozeznat. Nalevo od středové čáry RWY při pohledu z letadla letícího na APP převládá signál modulovaný devadesáti Hz, na pravé straně převládá signál modulovaný frekvencí 150Hz. Letadlová stanice potom vyhodnocuje svojí polohu na základě poměru signálů. Na prodloužené středové čáře RWY jsou oba signály v rovnocenném poměru.

Dosah signálu LOC je 25 NM $\pm 10^\circ$ od osy RWY a $\pm 35^\circ$ od osy do vzdálenosti 17 NM. Vertikálně je potom rozsah od $3/4^\circ$ do 7° elevačního úhlu od antény LOC.

3.4.2 Vertikální vedení (glide)

Umístění antény glidu je 300 metrů za prahem dráhy a 150 metrů od osy RWY. Dotykový bod RWY je v místě kde se GP protíná s plochou RWY. Toto zajišťuje udržení přeletu prahu dráhy v určité výšce tak, aby nedošlo ke střetu s předměty před prahem RWY.

Na vertikální vedení letadel se využívá UHF pro větší přesnost a princip je stejný jako u LOC. Spodní část vyzařovaného paprsku je modulovaná stopadesáti Hz, vrchní polovina devadesáti Hz. Nastavením sestupové roviny ILS se určí sestupový úhel, nejběžněji se volí 3°.

V blízkosti prahu dráhy se GP velmi úží, proto pro přistání na kategorii III je nutné mít na palubě radiovýškoměr. Umístění antény skluzového paprsku a elevační úhel GP je závislý na těchto faktorech.

- Přijatelné úhly klesání a rychlosti klesání pro letadla, která letiště využívají
- Pozice překážek a bezpečná výška pro přelet překážek
- Horizontální krytí
- Problémy prostorového uspořádání
- Délka RWY
- Vhodnost použití 50 ft při přeletu prahu dráhy

Dosah signálu skluzové roviny je $\pm 8^\circ$ od osy RWY do vzdálenosti zhruba 10 NN. První, co letová posádka zachytí je tedy LOC, až potom je v dosahu skluzová rovina.

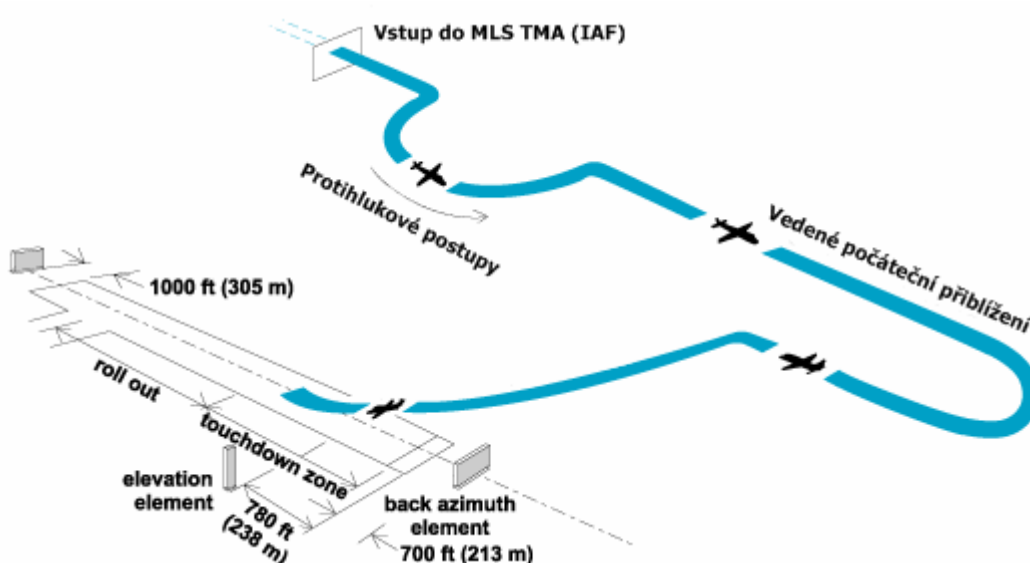
3.4.3 Polohová návěstidla (MRK)

Polohová návěstidla jsou jednoduché zařízení pracující na frekvenci 75 MHz a slouží k upřesnění polohy při přiblížení. Vnější MRK je vzdáleno 7 až 12 km od prahu dráhy, vysílá dvě čárky za sekundu a je spojeno s fialovým světlem. Pole kde je tato indikace je zhruba 600 metrů na sestupové ose dlouhé. Střední MRK je umístěn asi 1 km od prahu, vysílá čárky a tečky a rozsvítí se na panelu oranžové světlo. Vnitřní MRK 75 metrů od prahu – šest teček za sekundu – bílá barva.

MRK jsou velmi jednoduché a nepotřebují žádné složité systémy na palubě letadel. Modernější a víceúčelovější je ale použití zařízení DME.

3.4.4 Mikrovlnný přistávací systém (MLS)

MLS byl systém, který se neujal a široce nerozšířil kvůli finanční náročnosti letadlového vybavení. Dnes se příliš nepoužívá, i když jeho řešení a využití by bylo na mnoha místech vhodné. Ve zkratce jde o přistávací systém, který letadlo vede stejným způsobem jako ILS, ale jeho paprsky a tedy celé přiblížení “umí zatáčet”. Z obrázku je jasné, jak propracované přiblížení by díky systému MLS mohlo být definované. Letadlo by celou dobu bylo vedené stejným způsobem jako je vedené na ILS, tzn. povelový přístroj se dvěma indikátory, jedním horizontálním a druhým vertikálním i s možností převedení těchto signálů na automatické řízení letu.



obr. 3.3 – možné použití MLS v TMA

ILS systémy jsou lazeny manuálně na navigačním rádiu a ve většině případů jsou na palubě letounu instalovány dva na sobě nezávislé systémy.

Informace ze systému ILS (nebo MLS) jsou zobrazeny na EADI a EHSI displejích. Samozřejmě jen při správném nastavení frekvencí na VOR / ILS navigačním rádiu a pohybu letounu ve vyzařovacím paprsku pozemní stanice.

3.5 GNSS

Ze všech systému radionavigace je tento nejmladší a zažívá stále překotný vývoj. Bez pochyb je budoucností radionavigace a tudíž systém na jehož základě bude jednou snad stát i prostorová navigace v letecké technice. Současná situace je taková, že GNSS nebyl uznán organizací ICAO jako primární zdroj navigačních informací pro nedostatečnou integritu.

Systémy GNSS využívají umělých družic Země, takzvaných satelitů. Satelitní navigace je velmi přesná a jako výstupní údaj vychází informace o poloze přijímače v souřadnicovém systému. Nejznámější systémy GNSS jsou americký NAVSTAR- GPS; ruský Glonass a plánují se čínský Compass a evropský Galileo.

Obecně GNSS fungují na jednom z těchto základních principů:

3.5.1 Úhломěrná metoda

Je to historicky první z používaných metod družicové navigace. Z pozemské stanice se zaměřuje satelit určením jeho elevačního úhlu pomocí směrové antény. Všechny body se stejným elevačním úhlem k dané družici vytváří kužel s vrcholem v družici. Dalším měřením získáme další kužel. Průsečík těchto kuželů se Zemí, nebo zadanou letovou hladinou je naše zjištěná poloha.

Takovéto řešení není ani přesné ani jednoduché na provedení, takže se již od úhломěrné metody ustoupilo.

3.5.2 Dopplerovská metoda

Měření pracuje na principu vypočítávání změny frekvence pohybujícího se zdroje. Ze tří měření vzniknou tři rovnice o třech neznámých. Abychom byli schopni určit trojrozměrnou pozici, potřebujeme měřit k minimálně dvěma samostatným družicím.

3.5.3 Dálkoměrná metoda

Při tomto řešení palubní zařízení vypočítává polohu pomocí měření vzdáleností od přijímače k družici. Princip měření vzdálenosti je velmi podobný jako u zařízení DME a také je velmi přesný. V přijímané informaci je zakódovaná také pozice družice. Provedením a zpracováním minimálně tří družicových signálů můžeme určit polohu uživatele v souřadnicovém systému.

U GPS NAVSTAR se používá tato metoda, respektive její pasivní forma. Ta se liší od získu informací od DME tím, že nezjišťuje čas, kdy byl signál vyslán, ale pracuje se stejným časem jako vysílající družice. Tento čas je označován jako systémový čas a je synchronizován

v přijímané informaci z družice, která obsahuje přesné cesiové hodiny. Tato metoda se jeví jako nejjednodušší a zajišťuje nejvyšší přesnost a proto jí využívají současné systémy GNSS.

Celý systém je ještě pro zpřesnění a odstranění chyb podporován upřesňujícími údaji vysílanými ze Země. Jedna z metod jak tohoto docílit se jmenuje diferenční měření (DGPS). Jedná se v principu o referenční stanice s velmi přesně zadanými souřadnicemi, která na jedné straně přijímá signály z družic a porovnáním dvou poloh, tj. vypočtené a skutečné, určí chybu. Tu zakóduje a vysílá opravný signál GPS přijímačům v okolí. Podmínka funkčnosti systému je, aby celý proces probíhal v reálném čase s nejmenším možným opožděním.

3.5.4 SBAS

SBAS je druh diferenčního zpřesňujícího měření polohy. Pozemní stanice přijímají signál z družic GNSS a vyhodnocují odchylku přijatého signálu se svou vlastní polohou. Na základě tohoto měření vyšlou opravný signál. Systém dokáže varovat pilota o nepřesnosti měření GNSS během krátkého časového intervalu (řádově sekundy).

3.5.5 GBAS

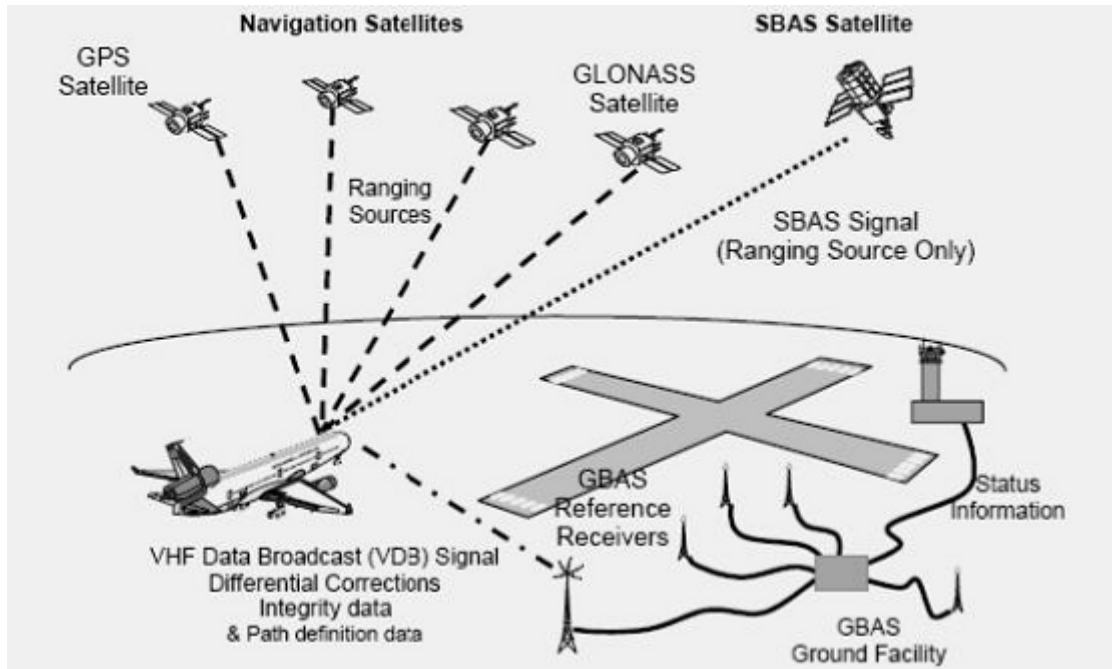
Pozemní část diferenčního zpřesňování polohy se nazývá GBAS. Je tvořena z pozemních vysílačů v blízkosti letiště. Zpřesňující informace vysílají všem letadlovým stanicím v okolí, které je zpracují a vyhodnotí svou odchylku.

3.5.6 ABAS

Palubní zpřesňující systém (ABAS) slouží k udržení integrity a spolehlivosti signálu GNSS. Systém byl vyvinut zejména pro letectví a potřebu uchovat provozuschopnost navigačních zařízení i po výpadku nebo chybném měření jednoho nebo více satelitů GNSS. Používá k tomu dvě metody:

- RAIM – GNSS přijímač sleduje informace z jednotlivých satelitů a při odchylce příjem signálu z daného vysílače pozastaví a zároveň indikuje chybu letové posádce. Posuzuje tedy odchylky mezi informacemi jednotlivých satelitů od sebe.

- AAIM – Tato metoda porovnává výslednou informaci z přijímače GNSS s dalšími jinak měřenými údaji, například z INS / IRS, DME, atd.



3.4 - Struktura GNSS

Důležité pro další rozvoj GPS navigace v letectví je fakt, že jako upřesňující doplňkové prostředky můžou být použity další systémy, které se už používají.

- Inerciální systémy
- Přesné přibližovací systémy ILS
- LORAN C
- Omega
- Barometrické a radiové výškoměry
- kompas a rychloměry

Při vysoké míře integrace navigačních prostředků bude toto provázání systémů další krok pro leteckou navigaci. Dlouho se považovalo za problém GNSS špatný výpočet výšek, tomu ale jednoduše lze zabránit tím, že vezmeme do úvahy barometrický výškoměr. Dokonce je tímto ještě zpětně možné upřesnit horizontální pozici.

3.6 IRS

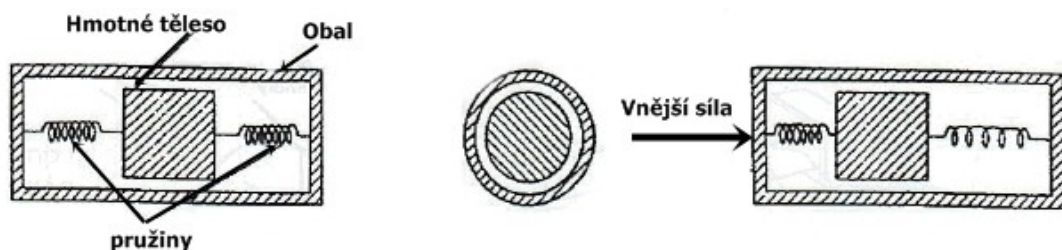
Systémy IRS jsou pro zajišťování provozu RNAV například v letadlech Boeing primární. Všechny ostatní systémy neslouží k ničemu jinému, než k upřesňování systémové pozice IRS. Jedná se jen o zapojení, v každém případě však inerciální systémy jsou velmi spolehlivé a dobře využitelné.

Inerciální navigační systémy jsou systémy, které jako jediné nepotřebují a nevyužívají žádné pozemní zařízení k určování polohy. Vše co potřebují vědět pro správnou funkčnost celého systému, je pozice letadla při spuštění systému, upřesněnou většinou ještě o bod při vjezdu na dráhu. Vhodné referenční místa jsou například práh dráhy, posunutý práh dráhy, nebo místo vzletu z TWY.

Rychlost a poloha letadla se počítají od referenčního bodu pomocí zrychlení letadla vzhledem k zemi. Inerciální systém je založen na integraci akcelerace, z níž se vyhodnocuje rychlost a vzdálenost (propojení s časem). Protože akcelerace je vektor, dává systém polohu dle os X a Y vůči počátečním souřadnicím. Systém také vyhodnocuje vzdálenost a směr k místu určení nebo traťovému bodu a odchylku od tratě.

Na horizontální navigaci jsou potřeba minimálně dva akcelerometry na sebe kolmé. Obvykle se směřuje jeden na sever a druhý na východ, což zjednodušuje vyhodnocování změny polohy v prostoru. Aby nedocházelo k rušení v měření, je celý systém stabilizován na gyroskopu.

3.6.1 Princip



obr. 3.5 – Princip akcelerometru

Na obrázku je zřetelný princip činnosti akcelerometru. Jakákoliv vnější síla vyvolává pohyb hmotného tělesa zavěšeného mezi dvěma pružinami. Dnešní technické provedení akcelerometrů je dávno jiné. Existují dva základní typy; mechanické akcelerometry a elektrické akcelerometry. Rozdělují se podle toho, zda síla vracející je do nulové polohy nebo

měřicí mechanismus využívají mechanických vlastností použitých materiálů, nebo elektrických, popřípadě magnetických sil. Na obou typech jsou vyžadovány tyto vlastnosti:

- nízký práh citlivosti
- velký rozsah citlivosti
- lineární výstup
- vysoká rozlišovací schopnost

3.6.2 Dvojitý IRS / Dvojitý FMC

V tomto systémovém rozestavení existují dva systémy IRS. Levé IRS dává informace levému FMC a pravé IRS informuje pravé FMC. FMS neustále kontroluje dodávaná data z obou IRS. Když vznikne mezi oběma údaji diference, není možnost stanovit, který ze systémů IRS je porušen. Správná poloha se definuje dál až při příjmu vnějšího referenčního signálu z jiného systému. Vnější referenční informace je porovnávána s polohami udávanými IRS pomocí Kalmánovy filtrace. Čím je let delší, tím se zvětšují odchylky obou IRS a musí být opravován signály z vnějšku.

U dvojitého systému FMC existují tyto čtyři možné režimy činnosti:

- Duální režim - Jedno FMC je řídicí člen a druhé FMC je člen řízený. Obě FMC nezávisle určují polohu. FMS porovnává jejich diferenci před indikací na EFIS. Systémová poloha na CDU se může mírně lišit od polohy letadla podle EFIS. Oba piloti vidí ty samé údaje na EFIS.
- Nezávislá činnost - Obě FMC pracují nezávazně a vzájemně mezi sebou nekomunikují. Výsledkem je, že poloha kterou indikuje levý EFIS se liší od polohy indikované pravým EFISem.
- Funkce jednoho FMC je nejistá – pokračuje se v činnosti prostřednictvím druhého – neporušeného FMC.
- Obě FMC nefunkční – Při situaci, kdy nefunguje ani jedno ze dvou FMC je informace z IRS využito přímo v EFIS. Systém automatického řízení letadla není provozuschopný.

3.6.3 Trojitý IRS / Dvojitý FMC

Všechny data z tří systémů IRS jsou nejdříve přeneseny do FMS, v systému jsou porovnány aby nebyly propuštěny data s velkou diferencí. Dále je poloha průměrována s daty externích zdrojů a dále upřesňována. Pro určení konečné výsledné systémové polohy je využívána Kalmánova filtrace.

3.6.4 Kalmánova filtrace

Jedná se o metodu zpracování všech dostupných dat. Vychází se z principu, že na začátku letu, na prahu RWY, je poloha IRS nejpřesnější a postupem letu se váha informace z IRS menší až se zastaví na přesnosti právě dostupném navigačním prostředku. Model tedy přikládá největší váhu datům z IRS na začátku letu a postupně počítá systémovou polohu čím dál víc z externích navigačních prostředků. Chyba údajů IRS roste zhruba rychlostí 1 NM za hodinu letu. Při vletu do oblasti přesných přibližovacích systémů jako ILS, se informace znovu zpřesní. Kalmánova filtrace tedy v principu má za úkol vybrat nejrelevantnější ze všech dostupných dat.

3.7 LORAN C

LORAN je navigační systém na dlouhé vzdálenosti vyvinutý během druhé světové války. Jeho činnost měla být zastavena již v roce 2000, přesto je stále funkční. Jedná se o hyperbolický navigační systém. Pozemní stanice jsou spojeny v řetězci, kde jeden člen je vedoucí a ostatní stanice jsou sekundární (identifikované písmeny W, X, Y a Z). Vzdálenost mezi jednotlivými stanicemi je mezi 600 NM a 1000 NM.

Na příklad na Faerských ostrovech se nachází vedoucí stanice LORANu pro letový koridor z Evropy do Severní Ameriky. Systém využívá nízkých frekvencí od 90 do 110 kHz, čímž dosahuje teoretického dosahu až 1500 NM. Díky dlouhému dosahu byl tento systém vhodný pro radionavigaci nad mořem. Žádný maják ale není postaven na jižní polokouli, takže se systém nemohl využívat celosvětově.

Přesnost systému byla na svou dobu ojedinělá (0,5 NM v rozsahu 1000 NM od vysílače), ale i ta už je překonaná, zejména systémy GNSS.

4. VNITŘNÍ STRUKTURA RNAV

4.1 SMĚROVÁ NAVIGACE (LNAV)

LNAV je systém automatického řízení letu k následujícímu WPT dle FMS ve směrové rovině. Správná funkce systému LNAV je zajištěna, když se letadlo nachází do 3 NM od aktivní tratě.

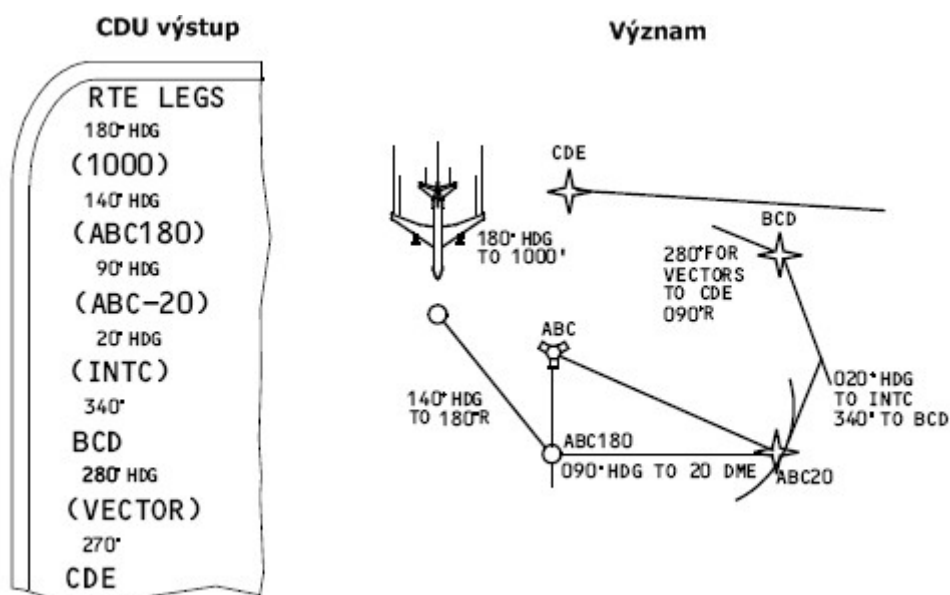
4.1.1 Traťový bod – WPT

Označení navigačních bodů WPT je zobrazeno na obrazovce EHSI, nebo na CDU. WPT je možno vybrat z FMS databáze, nebo zadat do FMS ručně. U ručně zadaných bodů se objevuje informace “NOT IN DATA BASE”, jako upozornění na zvýšenou možnost chybovosti při zadávání. Ručně zadat WPT je možno buď zadáním zeměpisné délky a zeměpisné šířky, radiálem a vzdáleností od DME a průsečíkem dvou radiálů. Existují tyto typy WPT:

- **Dlouhé názvy traťových bodů** - Názvy s více než pěti identifikačními znaky jsou zkracovány několika způsoby: vynecháním zdvojených hlásek, ubíráním samohlásek (první samohláska zůstává, ubíráním souhlásek zprava doleva, poslední hláska vždy zůstává, nebo při dvou slovných názvech spojováním slov a dalším zkracováním.
- **WPT s názvy radionavigačních prostředků** – traťový bod ležící v místě radionavigačního majáku nese identifikaci daného prostředku. Jsou v délce jedno až čtyřpísmenných skupin.
- **Názvy WPT Fixů** – skupiny až pětispisemenných názvů označující místo fixů.
- **Nepojmenované traťové body** – body, místa křížení tratí a DME fixy bez zadaného identifikačního názvu

Traťové body mohou být také definovány podmínkou bez přesného zeměpisného určení místa. Pro ilustraci je vše dokresleno na obrázku pod odstavcem. Jsou to body podmíněné:

- proklesanou výškou
- přeletem radiálu
- vzdáleností od DME



obr. 4.1 - Aktivní LNAV výstup se promítá na obrazovku EHSI a je barevně rozlišena:

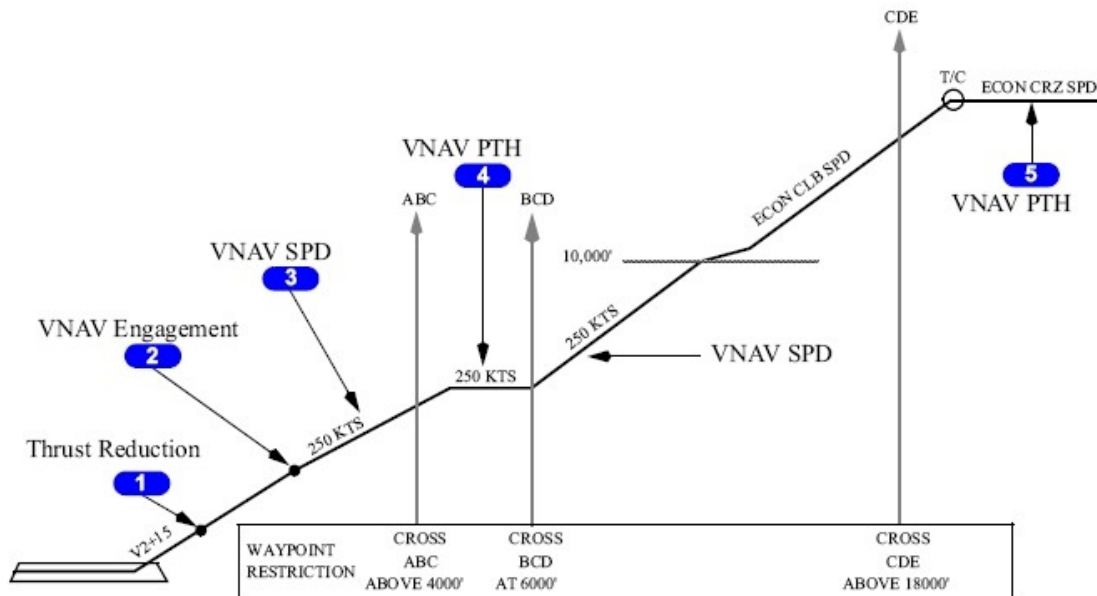
- Neaktivní letová trasa je značená modrozelenou přerušovanou čarou až do potvrzení (EXEC) letovou posádkou
- Aktivní trasa je značena fuchsiovou nepřerušovanou čarou
- Úpravy v aktivní trase jsou značeny bílou přerušovanou čarou
- Upravované traťové body WPT jsou bílé
- Potvrzené traťové odchylky jsou značeny čerchovanou fuchsiovou čarou
- Trať nevydařeného přiblížení jsou zobrazeny modrozeleně až do chvíle aktivace

4.2 VERTIKÁLNÍ NAVIGACE (VNAV)

Vertikální navigace VNAV poskytuje vertikální profil letu a jeho vedení v letu po trati, stoupání i klesání.

VNAV kontroluje vertikální trasu a rychlost podle dat limitů definovaných ve WPT. Tyto limity jsou editovatelné na straně LEGS v CDU, cesta k nim vede přes pravý sloupec lajnových tlačítek. Barometrické výškové omezení musí být pod letovou trasou, aby nabyly platnosti. Hodnoty vložené jako součást postupů, nebo které jsou vloženy manuálně, jsou zvýrazněny velkými písmeny a číslicemi. Předvídané hodnoty systémem FMC jsou psány malým písmem a nechovají se jako letová omezení. WPT mohou mít zadané omezení na výšku, rychlost, nebo oba dva parametry.

4.2.1 Stoupání



obr 4.2 – Vertikální profil tratě VNAV stoupání

1. Redukce tahu – Redukce tahu se použije buď manuálně zmáčknutím tlačítka “N1”, nebo automaticky po přestoupení výšky pro snížení tahu, když je takovým systémem letadlo vybaveno.
2. Zapojení VNAV – Po zapojení systému, VNAV zvyšuje rychlost na letovou posádkou zadanou hodnotu
3. VNAV stoupání – po dosažení stoupací rychlosti systém VNAV hlídá všechna výšková omezení v daném odletu SID. Zde na příkladu vidíme přelet bodu ABC ve výšce nad 4000ft.
4. Omezení stoupání – V SID odletu může být horní výškové omezení. Letadlo pod vedením VNAV splní tyto kritéria a během vodorovného letu letí na rychlosti definované pilotem, omezené charakteristikami dalšího WPT, omezené SID postupy, nebo základní VNAV stoupací rychlostí.
5. Vrchol stoupání (T/C) – bod ve kterém FMC nastavuje letové parametry na let po trati. Na EHSI se tento bod zobrazuje jako zelená kružnice s popiskem T / C. Do tohoto bodu letadlo stoupalo na tomto příkladu ekonomickou stoupací rychlostí, dopočítanou dle VNAV a údajů zadaných do FMS.

4.2.2 Let po trati

Po přeletu T/C je přes FMC zvolena traťová rychlost buď podle výpočtů FMS, nebo dle manuálního zadání letovou posádkou. Automatické ovládání tahu motoru, když je zapnuto, nastaví výkon pro let v hladině s požadovanou rychlostí. Když se do FMS zadává cost index roven nule, FMC nastavuje výkon, se kterým letadlo doletí na maximální dolet.

Palivové a časové výpočty jsou založeny na konstantní letové hladině, dokud není vloženo jakékoliv stoupání na trati. Takovéto traťové stoupání se definuje přes WPT a FMC dopočítává předpokládaný začátek stoupání, které zobrazuje na EHSI zelenou kružnicí s popiskem S / C. Vzdálenost a ETA k nejbližšímu dalšímu stoupání na trati je zobrazeno na CDU stránkách CRZ (cruise- let po trati) a PROGRESS.

4.2.3 Klesání

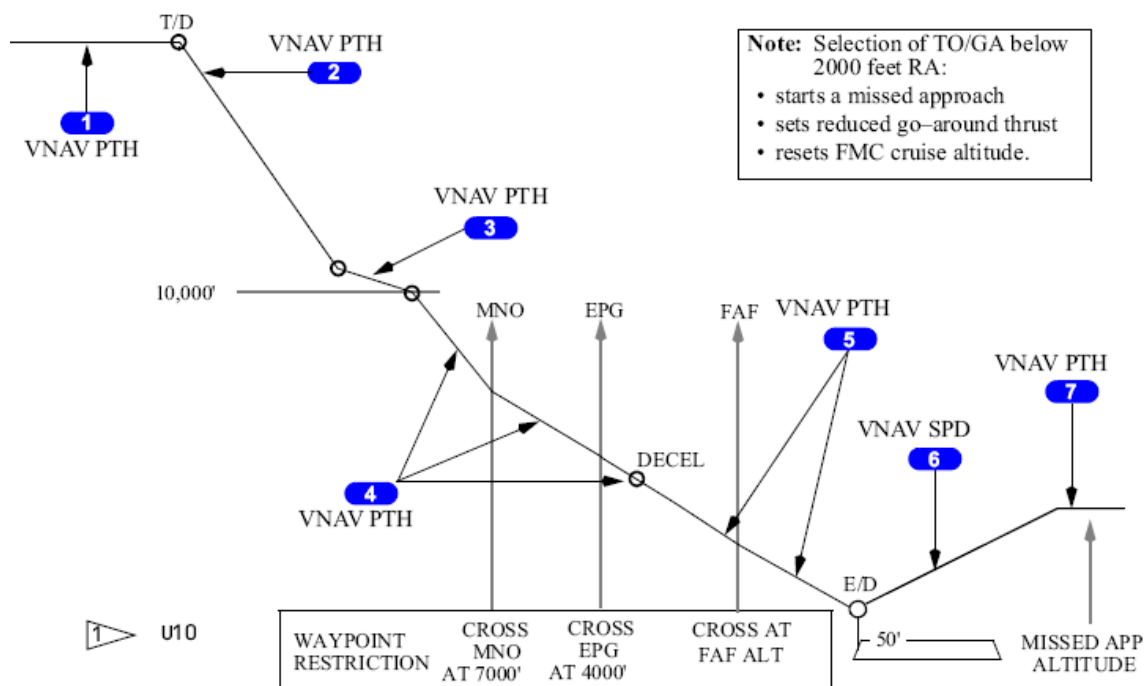
VNAV dokáže řídit klesání letounu ve dvou módech; “path descent” profilové klesání, kdy FMC využívá volnoběh motoru a vyvážení k udržení zadaného vertikálního profilu, podobně jako třeba při udržování glideslopu u ILS, nebo “speed descent” rychlostní klesání, kdy ovládání motoru a vyvážení vede letoun při klesání na zadané rychlosti, jako třeba při traťové změně hladiny.

Path descent – klesání podle profilu tratě

K zahájení klesání musí být ve FMC definován bod konce klesání (E / D) buď manuálně, nebo zvolením příslušných postupů STAR, kde jsou tyto body v databázi již předdefinovány.

Profilové klesání je před klesáním podle rychlosti považováno za přednostní. Primárně se tedy lítá právě toto klesání, a to i z důvodů plánování trasy. Primární bude klesání podle rychlosti jedině tehdy, když z jakéhokoliv důvodu není zadán konec klesání.

V několika případech může VNAV „path“ klesání být automaticky přerušeno. Letadlo je v takové situaci převedeno do horizontálního letu. Mezi tyto případy patří silné turbulence, nebo silné nárazy větru, které by překročily násobek zatížení G.



obr. 4.3 – Vertikální profil VNAV „path“ profilového klesání

1. Let po trati – Před začátkem klesání, FMC používá mód VNAV a letoun je na ekonomické traťové rychlosti (ECON).
2. Klesání – Za počátečním bodem klesání se FMC přepne do módu VNAV PTH a nastaví rychlost klesání na ekonomickou.
3. Zpomalení letadla před rychlostním omezením – FMC odbrzdí klesající letoun na přijatelnou rychlost před výškou, na které se rychlost omezuje. Většinou tedy v hladině FL100.
4. Výškové omezení – VNAV profil počítá se všemi výškovými omezeními, na trati klesání. V tomto módu je možno letět také schodovité přiblížení. Letoun v takovém případě klesá vysokou vertikální rychlostí na povolenou výškovou mez, poté přechází do vodorovného letu až do přeletu daného omezujícího bodu.
5. Přiblížení – VNAV PTH přejde na nastavenou rychlost a na ní dále klesá. Již se jedná o fázi přiblížení.
6. Nezdařené přiblížení (Missed Approach) – Po přeletu bodu nezdařeného přiblížení, nebo po stisku TOGA se VNAV odpojuje, nastaví se vzletový výkon a pilot pokračuje podle předepsaných postupů. Když se v této situaci zapne VNAV, přejde do módu VNAV SPD.

7. vyrovnání v průběhu nezdařeného přiblížení – Po dostupání předepsané výšky podle postupů nezdařeného přiblížení se letoun vyrovná do vodorovného letu a VNAV se přepne do módu VNAV PTH

Speed Descent – Klesání dle rychlosti

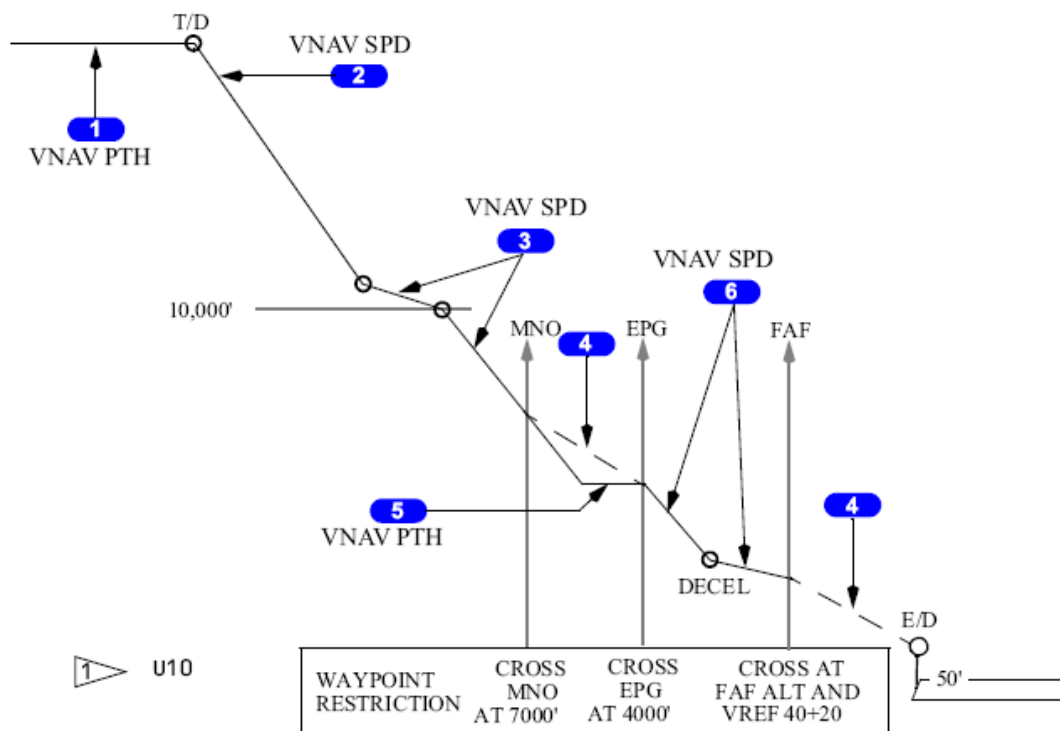
Klesání dle rychlosti je možno zadat na obrazovce CDU manuálně na straně PATH DES jako možnost SPEED pomocí postranních tlačítek. Když do systému není zadán konec klesání (E / D) je zvoleno právě toto klesání.

Klesání dle rychlosti udržuje zvolenou rychlost klesání. V normálních podmínkách je volena ekonomická klesací rychlost do omezující výšky (FL100) a po prolétnutí touto výškou se zadává rychlost 240kt. Před nalétnutím samotného přiblížení je nutné letoun odbrzdit na přibližovací rychlost (approach speed). Když je VNAV zapnut, nedovolí prolétnutí hladinou FL100 s vyšší rychlostí než je povolený limit.

Ve vypočteném bodě počátku klesání (T / D) se zahájí klesání, FMC zde řídí náklon, aby letoun udržoval zvolenou rychlost. Na klesání dle rychlosti není potřeba mít zapnutý LNAV.

Přechod zpět na „path“ klesání dle profilu je automaticky zapnut v té chvíli, kdy to vyžadují postupy STAR, nebo manuálně příkazem do CDU.

VNAV v tomto módu klesání neporuší žádné z výškových omezení, které jsou dané příslušnými traťovými body WPT. Není ale garantováno, že letoun dosáhne výškových omezení v požadovaných místech.



obr. 4.4 – vertikální profil klesání dle rychlosti, „speed descent“

1. Let po trati – před zahájením klesání je FMC v používaném módu VNAV PATH a ECON, ekonomická traťová rychlost. Automatické ovládání tahu motoru (A / T) používá rychlost z FMC (FMC SPD).
2. Klesání – po přeletu bodu začátku klesání (T / D) přejde FMC do módu klesání a VNAV upraví klesací rychlost na VNAV SPD, na které dále letadlo klesá.
3. Rychlostní omezení – před výškou, od které platí rychlostní omezení, to znamená obvykle hladinu FL100, zpomalí VNAV na požadovanou omezenou rychlost. Dále letoun klesá na této rychlosti do chvíle následující změny.
4. VNAV profil letěné trati – VNAV klesání dle rychlosti nemusí nutně dodržovat profil letěné trati dle FMC, který vede letoun po trati.
5. Výškové omezení – FMC vede letoun po trati, která splňuje všechny výškové limitace na trati klesání. Tyto omezení se chovají jako omezující faktory WPT.
6. Klesání a přiblížení – Po přeletu bodu EPG VNAV dále pokračuje ve vedení letounu na malých otáčkách a na rychlosti pro klesání VNAV SPD. Před nalétnutím na přiblížení VNAV letadlo zpomalí na approach speed – přibližovací rychlost. FMC vyzve letovou posádku k manuálnímu nastavení vztlakových klapek.

4.3 DATABÁZE FMC

Databáze FMC se rozděluje na dvě databáze podle povahy informací na výkonovou a navigační databázi. Výkonová databáze zahrnuje odpor letadla a motorové charakteristiky, maximální i optimální výšky letu a rozsah rychlostí. Všechny tyto údaje jsou nastavitelné, to znamená aktualizovatelné.

Navigační databáze obsahuje informace normálně dohledatelné na navigačních mapách. Tyto informace mohou být zobrazeny na CDU displeji, nebo na navigačním displeji. Navigační databáze obsahuje:

- Umístění jednotlivých VHF navigačních zařízení
- Traťové body (WPT)
- Letiště
- RWY
- SID, STAR, přiblížení a letové cesty

Když stálá navigační databáze neobsahuje všechny data ohledně operačního letového plánu, mohou být definovány jiné, dodatečné, body posádkou přes CDU a skladovány buď v dočasné, nebo dodatečné paměti FMC. V dodatečné paměti se uchovávají veškerá data zadaná posádkou, kdežto dočasná paměť se po ukončení letu maže.

FMC obsahuje dva kompletní sady navigačních dat, každé platné 28 dní, jednu aktuální a druhou záložní, která je měsíc prošla. Databáze je každý měsíc aktualizována před datem expirace.

5. TYPY PROSTOROVÉ NAVIGACE

Prostorová navigace se dále dělí na několik skupin podle přesnosti, respektive podle tolerované chyby. Ta se definuje pomocí RNP.

Required Navigation Performance (RNP) - Požadovaná navigační výkonnost vyjadřuje maximální dovolenou horizontální chybu v určení polohy letadla v námořních mílích. Navigační systémy letadla monitorují výkonnost a přesnost navigačních zařízení. Pokud naměřená přesnost (ANP) není v mezích, letová posádka je varována indikací na CDU nápisem: UNABLE REQD NAV PERF-RNP

Actual navigation performance (ANP) – aktuální navigační výkonnost, je důležitý sledovaný faktor, který udává odhad pozice FMC. Číslo je rovno poloměru kružnice, ve které se letadlo s přesností 95% nachází. Čím je číslo ANP menší, tím je FMC jistější o své poloze.

5.1 B-RNAV

Základní typ systému RNAV, Basic area navigation, s požadovanou přesností nepřetržitě určení polohy lepší než 5 NM v 95% případů měření okamžité polohy. V současné době je tato přesnost požadována v evropském vzdušném prostoru pro všechny letadla nad 30 a více cestujících nad FL 95. Takto situace je už od 23. 4. 1998, kdy se B-RNAV stal povinným ve vzdušném prostoru ECAC. V rámci standardizace RNAV využívá geodetický systém WGS-84, který využívá také GPS Navstar.

RNP 5 je předepsáno kvůli běžným přesnostem zaměřování podle VOR / DME do vzdálenosti 100 NM. Navigace podle B-RNAV je kvůli deklarovanému RNP vhodná především na traťovou navigaci. Při jiných fázích letu (SID, STAR, APP,...) se vyžaduje vyšší přesnosti, kvůli které bylo zavedeno P-RNAV.

5.2 P-RNAV

Vyšší typ přesnosti, který odpovídá přesnosti v rozmezí 1 NM v 95% případů měření okamžité polohy. Probíhá zavádění tohoto systému do provozu, dnes je požadován v některých TMA. Velký důraz se klade na technický pokrok používaných technologií. S tímto systémem se počítá v budoucnosti, že se stane nástrojem dalšího zvyšování kapacity vzdušného prostoru. Požadovaná navigační výkonnost (RNP) je ± 1 NM při 95% doby letu.

Pravděpodobně se i v Evropě začne využívat GPS, minimálně pro prostorovou navigaci v TMA. Ta by byla upřesňována informací z pozemních stanic GBAS umístěných poblíž daného letiště. Na fázi konečného přiblížení je RNP 1 stále moc velký rozptyl, proto se nebude využívat P-RNAV, ale vyvíjí se nový, ještě přesnější systém zvaný RNP-RNAV.

V nejméně využívaných vzdušných prostorech je vhodné implementovat P-RNAV i na let po trati, protože dále zvyšuje propustnost prostoru.

5.3 RNP-RNAV

Tento systém bude dále posouvat laťku prostorové navigace v oblastech s největším vytížením letového prostoru. Systém by měl najít největší uplatnění v koncových oblastech TMA, kde je hustota provozu nejvyšší. Používané RNP bude 0,3, ale podle operačních specifik jednotlivých provozovatelů se můžeme dostat až na RNP 0,1. Takováto přesnost sebou přináší celou řadu výhod.

Není vyloučeno, že se RNP-RNAV bude v budoucnu rozšiřovat na všechny fáze letu, při hledání stále větší kapacity vzdušného prostoru. Tento systém již ale počítá s využitím GNSS, doplněným o diferenční systém na zpřesnění polohy (SBAS, GBAS, ABAS). Až bude vše posvěceno všemi příslušnými úřady, může být zaváděn tento zatím nejvyspělejší navigační systém, který by znamenal významný pokrok v letecké navigaci. Optimalizace trasy a využití vzdušného prostoru ilustruje následující obrázek.

non-RNAV tratě

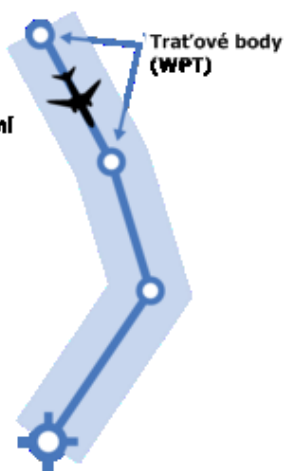
Dnešní letecké cesty založené na pozemních navigačních zařízeních



Omezená propustnost

RNAV

RNAV letové cesty definované danými WPT



Zvýšená propustnost

RNP-RNAV

Plánované RNP-RNAV tratě v koncových oblastech



Optimální využití

obr. 5.1 – Porovnání letových tratí

K docílení přesného vertikálního vedení by se mělo využít diferenčních zpřesňujících měření systémy GBAS, nebo Baro-VNAV, nejlépe však kombinací obou těchto metod.

6. NAVIGAČNÍ HARDWARE – BOEING 737

6.1 CDU

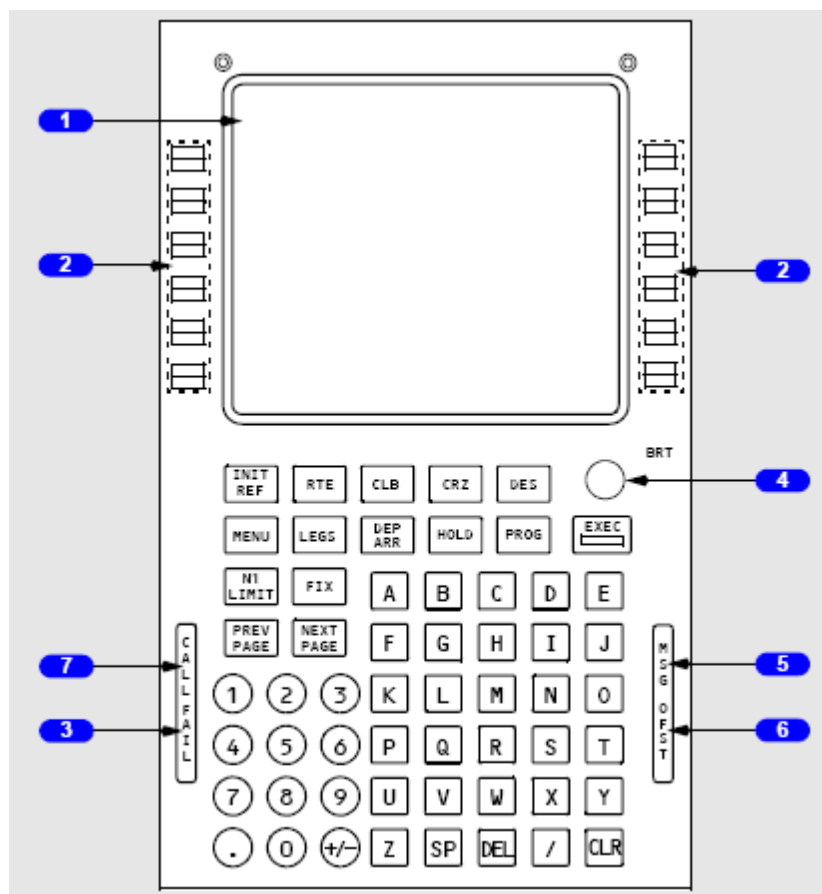
Před pojížděním mohou vstupy do CDU dělat kapitán i první důstojník, druhý pilot musí zkontrolovat zadané údaje.

Vkládání dat do CDU je nejlepší provádět před pojížděním, nebo při zastavení. Když je potřeba zadávat informace do CDU během pojíždění, zadává je vždy pilot neletící a pilot letící je povinen údaje zkontrolovat před jejich potvrzením.

Za letu vkládá data do CDU povětšinou pilot neletící. Pilot letící může zadat data do CDU také, když to dovolí jeho pracovní vytížení. Ve všech případech platí, že druhý pilot kontroluje údaje zadané pilotem prvním.

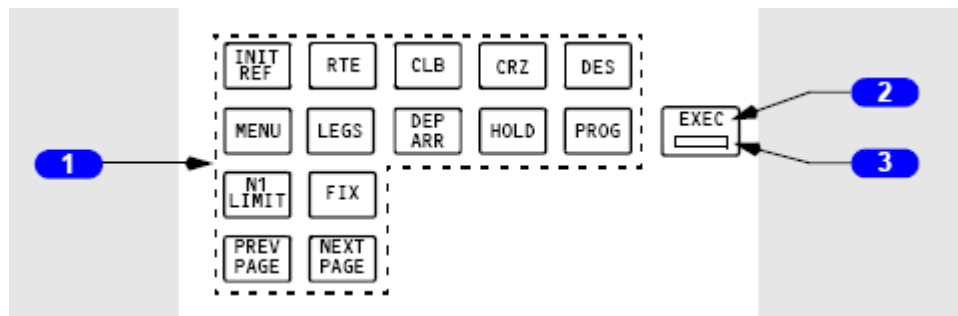
Během zvýšené pracovní vytíženosti je vhodnější používat MCP, pro snadnější vložení základních dat než do CDU.

Jednotka CDU je hlavním vstupním prostředkem, který letová posádka využívá k zadávání a ovládání dat do FMS.



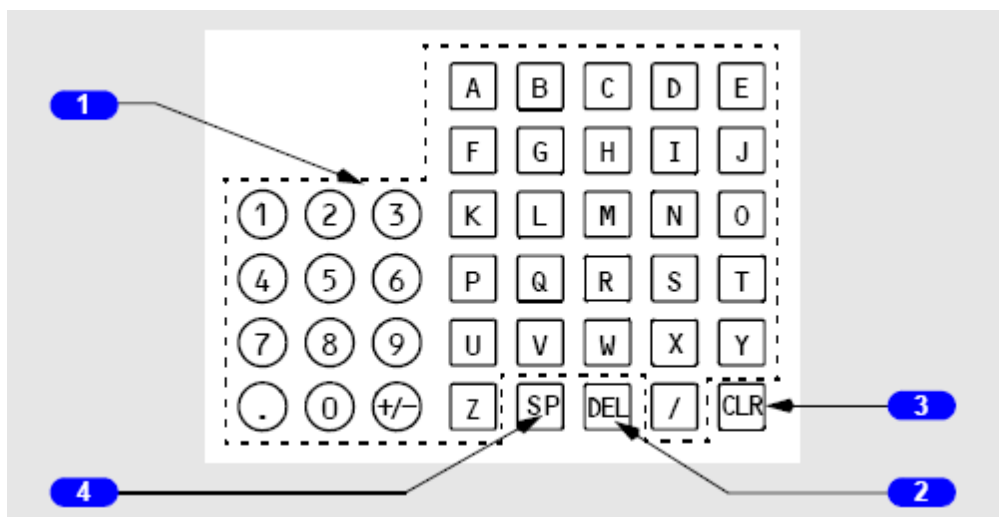
obr. 6.1 - CDU - přední pohled

1. Displej CDU – zobrazuje data ve FMS
2. Výběrová horizontální tlačítka - posunuje data ze zápisníku do vybrané řady
 - posunuje data z vybrané řady do zápisníku
 - vybírá stránky, postupy, nebo výkonové módy podle potřeby
 - vymazává data z vybrané řady, když je “DELETE” zobrazen v zápisníku
3. Indikace poruchy – self-test rozezná poruchu systému a rozsvítí indikaci jantarové barvy
4. Podsvícení displeje CDU – rotací upravuje jas podsvícení displeje CDU
5. Indikace zpráv (MSG) – upozorňuje posádku na zprávu v zápisníku, svítí bílým světlem
6. Indikace přehrazení – LNAV přehrazuje laterální vedení letadla, bílé světlo
7. CALL indikace – jiný systém než FMC vyžaduje kontrolu stavu



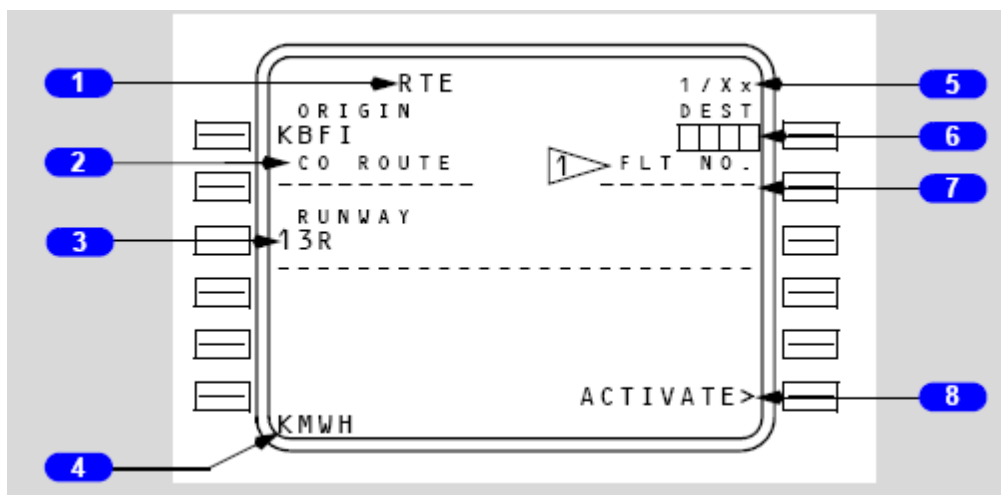
obr. 6.2 - CDU detail funkčních tlačítek

1. Funkční tlačítka CDU – INIT REF – zobrazuje stranu pro nastavení výchozích hodnot nebo referenční data
 - RTE – zobrazuje stranu pro zadání nebo změnu původu, destinace, nebo trasy
 - CLB – stránka k pohledu nebo úpravě dat stoupání
 - CRZ - stránka k pohledu nebo úpravě dat na trati
 - DES - stránka k pohledu nebo úpravě dat klesání
 - MENU – zobrazuje stranu výběru podsystémů kontrolovaných přes CDU
 - LEGS – strana pro potvrzení nebo změnu laterálních a vertikálních dat
 - DEP ARR – zobrazí stranu pro zadání nebo změnu odletových / příletových postupů
 - HOLD – zobrazí stranu pro zadání nebo změnu vyčkávacích postupů
 - PROG – zobrazuje dynamické letové a navigační údaje jako WPT, ETA, zbývající palivo a odhadovaný čas příletu
 - N1 LIMIT – zobrazuje stranu pro náhled nebo změnu dat tahu N1
 - FIX – zobrazí stranu pro vytvoření referenčních bodů na mapě
 - PREV PAGE – zobrazí předcházející stranu (v logice zadávání)
 - NEXT PAGE – zobrazí následující stranu (v logice zadávání)
2. EXEC – stisknutím tohoto tlačítka se projeví zadané změny, potvrzovací tlačítko
 - zhasíná Indikaci “EXEC light”
3. EXEC light – indikace dosud nepotvrzených změn, svítí bíle



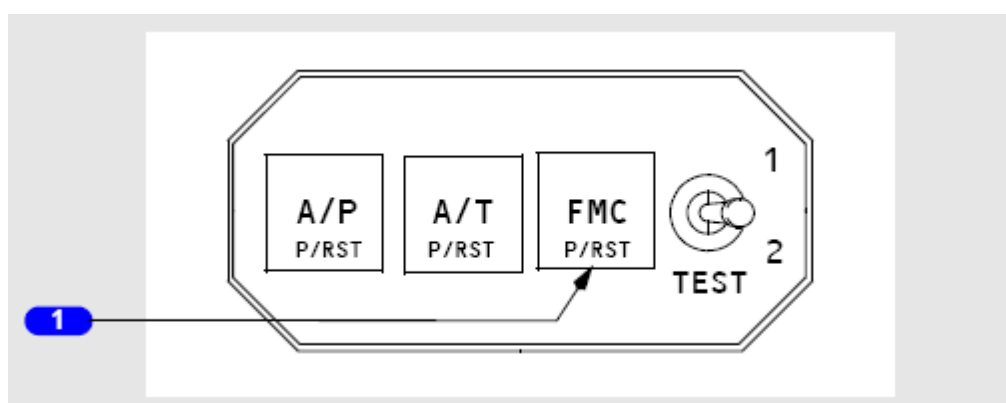
obr. 6.3 - Detail alfanumerické klávesnice CDU

1. písmenově číslíková klávesnice – vkládá znaky do CDU zápisníku
 - lomítko (/) – vkládá uvozovky (“) do CDU zápisníku
 - Plus / mínus (+ / -) – vkládá do CDU zápisníku znaménko mínus “-“, při dalších stisknutích mění znaménko na plus “+” a mínus “-“.
2. Vymazávací tlačítko “DEL” – vkládá možnost mazání nepotřebných dat ze CDU zápisníku
3. tlačítko CLR – při stisknutí maže poslední napsaný znak, nebo ruší zprávu na obrazovce CDU
 - při podržení tlačítka maže všechny data z CDU zápisníku
4. Mezera (Space) – vloží mezeru



obr 6.4 - CDU – detail obrazovky

1. Název strany – předmět nebo jméno zobrazovaných dat
 - zobrazuje ACT (active), nebo MOD (modified) když strana obsahuje aktivní, nebo měněná data
2. Název řádku – pro příslušný řádek
3. Řádek – zobrazuje výzvy, možnosti výběru, volby a ostatní data
4. Zápisový řádek CDU – zobrazuje MSG, psané znaky nebo data zvolená na řádku
5. Číslo strany – číslo strany a celkový počet logicky řazených stran
6. Rámeček – vložení dat do těchto rámečků je povinné
7. Pomlčky – vložení dat není povinné, ale jen možné
8. Výzvy – ukazuje strany, vybírá režimy a kontroluje CDU



obr. 6.5 - Výstražná indikace FMC

1. Výstraha nesprávného fungování FMC, svítí žlutě (jantarově / okrová), zmáčknutím výstražné tlačítko zhasne
 - “FAIL” výstraha je zobrazena na obou CDU obrazovkách, nebo

- Výstražná MSG je zobrazena na obou CDU obrazovkách, nebo
- přepínač 1 / 2 je na jedné z krajních pozic

6.2 AFDS POSTUPY

Letová posádka musí vždy sledovat:

- letěný kurz
- výšková trajektorie
- rychlost

Když se změní údaje na MCP, je nutno ověřit změnu daných letových parametrů na letových přístrojích.

Posádka musí potvrdit manuální nebo automatické změny módů AFDS u:

- Autopilota
- Flight director
- A / T

Během LNAV nebo VNAV provozu, posádka musí kontrolovat všechny změny:

- letěného kurzu
- výškové trajektorie
- tahu motorů
- rychlosti letounu

6.3 ADC POZNÁMKA

V letadle jsou instalovány dva nezávislé počítače letových parametrů. Každý z nich je napojen na sondy statického a dynamického tlaku. ADC převádí tlak do digitálních signálů, které jsou dalšími systémy využívány k výpočtu potřebných letových údajů. ADC jsou funkční tehdy, když jsou napájeny jejich sběrnice.

7. VYHODNOCENÍ CÍLŮ

Při řešení problematiky prostorové navigace jsem narážel na obsáhlost celého tématu, proto jsem se snažil držet práci v co nejužší koleji, snad co nejbližší letovým postupům a konkrétním vědomostem, které by měly být známé každému pilotovi. Postupy jsou popsány především v materiálech výrobců letecké techniky. Podle zdrojů lze snadno poznat, že k materiálům od jiných výrobců, než je Boeing, jsem se nedostal. Proto je celé téma RNAV systémů popsáno na základě pojetí Boeingu.

Vyjadřování popisovaných skutečností dělalo občas složitým ten fakt, že některé anglické výrazy již vstoupily do Českého jazyka. V práci je tedy někdy pro přesnost použitý i anglický výraz, i přes snahu používat české ekvivalenty. Snaha o zachování celé práce v češtině je patrná a možná lehce narušuje souvislost textu.

8. ZÁVĚR

Budoucnost letecké navigace je definována prostředky, kterými navigaci zajišťujeme. V tomto ohledu je evropský satelitní navigační systém Galileo přelomový, protože jako první bude komerčně využitelný a služby budou garantovány. Pokud se tomuto systému podaří překonat finanční a politické otřesy až do finální podoby, myslím, že to bude pro leteckou navigaci velký skok dopředu.

Primární roli bude hrát RNAV, založený na IRS, zpřesňovaný údaji z GNSS. Z pozemských navigačních zařízení při vysokém osekání celého systému zůstanou spolehlivé přibližovací systémy ILS, nebo lépe, rozšíří se MLS. Záloha celého systému je jednak v taktickém předplánování v Eurocontrolu, nebo jiné nadnárodní správě ŘLP, leteckým nehodám budou předcházet systémy ŘLP na základě sekundárních radarů SSR a palubní protisrážkové systémy TCAS.

Při tak nesmírné separaci sportovního a komerčního létání jako je v Evropě, nevidím zásadní problém pro postupné rušení navigačních prostředků NDB, LORAN, VOR, DME v tomto pořadí.

Myslím, že brána ke zvýšení kapacity vzdušného prostoru je otevřena, a že navigace nebude hlavní překážkou v dalším rozvoji letectví.

9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VOLNER, R. a kol. 2007. Flight Planning Management, CERM Brno, 2007, ISBN 978-80-7204-496-2
- [2] VOLNER, R. 2008. Radionavigace I, VŠB-TU Ostrava, ISBN 978-80-248-1917-4
- [3] JALOVECKÝ, M. březen 2002. ATPL (A) Navigace, Brno. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2002. 186 s. ISBN 80 – 7204 – 246 – 7.
- [4] Flight Crew Operations Manual CCA, datum revize: 30. Listopadu 2010, číslo dokumentu: D6 – 27370 – 31S – CCQ
- [5] VOSECKÝ, S. květen 2006. Radionavigace (062 00), Brno. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno 2006. 236 s. ISBN 80 – 7204 – 448 – 6.
- [6] JEPPESEN Sanderson Inc., Radionavigation, Atlantic Flight Training Ltd. 2004. ISBN 0 – 88487 – 353 – 6
- [7] JEPPESEN Sanderson Inc., General Navigation, Atlantic Flight training Ltd. 2004. ISBN 0 – 88487 – 352 – 8.
- [8] Operations Manual CCA, revize březen 2011
- [9] Global Air Navigation Plan, ICAO publishing, 2007. ISBN 92 – 9194 – 930 – 2.
- [10] www.eurocontrol.org
- [11] Computer based Training to Boeing 737-400
- [12] Computer based Training to Boeing 737-800 NG
- [13] www.nasa.gov
- [14] www.letiste-cr.cz/