

Jan-Erik Syri

ALUESUUNNISTUS (RNAV)

Opinnäytetyö

KESKI-POHJANMAAN AMMATTIKORKEAKOULU

Tietojenkäsittelyn koulutusohjelma

Lokakuu 2009



TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Yksikkö Tekniikka ja liiketalous, Kokkola	Aika 21.10.2009	Tekijä/tekijät Jan-Erik Syri
Koulutusohjelma Tietojenkäsittely		
Työn nimi Aluesuunnistus (RNAV)		
Työn ohjaaja Kauko Kolehmainen		Sivumäärä 25
Työelämäohjaaja Kauko Kolehmainen		
<p>Opinnäytetyön tavoitteena on antaa lukijalle selkeä kuva siitä mitä tarkoitetaan aluesuunnistamisella lentokoneen suunnistuksen ja sijaintitiedon määrittämisen yhteydessä. Aluesuunnistus koostuu monesta eri laitteesta ja järjestelmästä. Tämän opinnäytetyön tavoite on antaa kattava kokonaiskuva näistä eri tekijöistä sekä siitä, kuinka ne toimivat yhdessä kokonaisuutena.</p> <p>Opinnäytetyön aineistona on käytetty liikennelentäjien koulutukseen käytettävää materiaalia sekä viranomaisten julkaisemia ohjeita ja määräyksiä. Näistä julkaisuista on pyritty tekemään kattava kokonaisuus aiheesta.</p> <p>Opinnäytetyöni aihe muodostui kiinnostuksesta lentokoneiden suunnistus-laitteita ja –järjestelmiä kohtaan. En löytänyt kattavaa aineistoa RNAV-aiheesta, joten päätin tehdä sen itse tämän opinnäytetyön muodossa.</p>		
Asiasanat aluesuunnistus, EHSI, FMS, suunnistusjärjestelmät		

ABSTRACT

Department Technology and Business, Kokkola	Date 21.10.2009	Author Jan-Erik Syri
Degree programme Degree Programme in Business Information Technology		
Name of thesis Area Navigation (RNAV)		
Instructor Kauko Kolehmainen		Pages 25
Supervisor Kauko Kolehmainen		
<p>The aim of this thesis is to give the reader a clear image on the usage of Area Navigation in determining the location and navigation of an airplane. Area Navigation consists of many different equipment and systems, of which this thesis is to give a broad view. The thesis also discusses how they work together as one system.</p> <p>Data collected into the thesis is from materials used in training of Air Transportation Pilots and instructions and regulations published by authorities. The aim was to incorporate information from different sources into one clear presentation.</p>		

Key words Area navigation, EHSI, FMS, navigation systems

LYHENTEET

ADF	Automatic Direction Finder
AWR	Airborne Weather Radar
ATS	Air Traffic Services
B-RNAV	Basic RNAV
DME	Distance Measuring Equipment
ECAC	European Civil Aviation Conference
EFIS	Electronic Flight Instrument System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HF	High Frequency
HIS	Horizontal Situation Indicator
IFR	Instrument Flying Rules
IGS	Inertial Quidance System
ILS	Instrument Landing System
INS	Intertial Navigation System
IRS	Intertial Reference System
MLS	Microwave Landing System
NDB	Nondirectional Beacon
NM	Nautical Mile
PRN	Pseudo-random noise
RNAV	Area Navigation

SG	Symbol Generator
TACAN	Tactical Air Navigational Aid
TCAS	Traffic Collision Avoidance System
UHF	Ultra-high Frequency
UTC	Universal Coordinated Time
VDF	VHF Direction Finder
VOR	VHF omni-directional range
VORTAC	co-located VOR and TACAN

TIIVISTELMÄ	
ABSTRACT	
LYHENTEET	
SISÄLLYS	
1 JOHDANTO	1
2 SUUNNISTUKSEN HISTORIA ILMAILUSSA	3
3 RNAV:N PERUSTEET	6
4 RNAV-TYYPIT JA -TASOT	8
4.1 Basic RNAV	8
4.2 Precision RNAV	8
4.3 RNAV tasot	8
5 RNAV:SSA KÄYTETTÄVÄT SUUNNISTUSLAITTEET	10
5.1 VOR/DME RNAV	10
5.1.1 VOR/DME RNAV:n komponentit	11
5.1.2 VOR/DME:n funktiot RNAV:n toiminnassa	12
5.1.3 VOR/DME:n virheet	12
5.2 LORAN C	12
5.2.1 LORAN C:n komponentit ja laitteen funktio	13
5.2.2 LORAN:in virheet	13
5.3 GNSS	14
5.4 INS JA IRS	15
5.5 ILS JA MLS	16
6 FMS	18
7 CDU	20
8 EHSI	21
9 RNAVIN EDUT JA HAITAT	22
10 YHTEENVETO	24
LÄHTEET	25

1 JOHDANTO

Vuonna 1903 Wrightin veljeksistä Orville suoritti ensimmäisen lennon, veljekset eivät varmasti uskoneet, millaisen mullistuksen alullepanijoina ja innoittajina he toimivat ilmailun saralla. Niistä päivistä lähtien ilmailualan kehittyminen on ollut nopeaa ja tehokasta alan lukuisilla eri osa-alueilla. Yksi oleellinen asia ilmailualan kehittymisessä on suunnistaminen. Ilmailun suunnistuksen varhaisista vaiheista, kuten tähtien avulla suunnistuksesta, on tultu tilanteeseen, jossa lentokoneen sijainti pystytään määrittelemään kolmiulotteisesti jopa muutamien senttimetrien tarkkuudella käyttämällä tietoa eri suunnistuslaitteista. Tähän tarkkuuteen ja luotettavuuteen on päästy vain kovan työn, nerokkaiden keksintöjen ja rohkeiden päätösten avulla. Lentokoneen tarkka sijaintitieto ei ole oleellinen asia vain perille löytämisen kannalta, vaan se myös tarjoaa mm. turvallisuutta tehokkaampien porrastuksien avulla lentokoneiden välillä, säästöjä yrityksille ja luonnolle pienempien polttoainekulujen ansiosta sekä säännöllisyyttä ja nopeutta tarkempien lentoreitien valinnassa ja suunnittelussa. Lisäksi se vähentää lentäjien työkuormaa.

Lentämisen alkuvaiheessa suunnistaminen tapahtui pelkästään maastoa silmällä pitäen ja paikallistuntemusta hyväksi käyttäen. Nykyaikaisissa lentokoneissa saattaa olla jopa yli kymmenen erillistä järjestelmää suunnistamista varten. Kaikkein tarkimpaan tulokseen päästään kokoamalla näistä eri lähteistä luotettava keskiarvo paikan määrittämiseksi. Area Navigation (RNAV) mahdollistaa suunnistamisen tarvittavalla tarkkuudella: tarvitsematta lentää maassa sijaitsevien suunnistuslaitteiden ylitse, suoraan laitetta kohti tai poispäin suoraan laitteesta.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, kuinka RNAV-järjestelmä toimii ja kuinka lentokoneet hyödyntävät sitä sijainnin määrittämiseen ja suunnistamiseen. Opinnäytetyössä paneudutaan järjestelmien toimintaperiaatteisiin eikä niinkään huomioida ilmailulakien taikka -määräysten asettamia rajoituksia eikä opasteta siinä kuinka RNAV-järjestelmää käytetään. Tarkoituksena oli tehdä kattava selvitys siitä, mitä tarkoittaa termi RNAV ja mistä eri kokonaisuuksista se koostuu.

Opinnäytetyön esitetyt johtopäätelmät pohjautuvat hyvin pitkälle liikennelentäjien ammattikirjallisuuteen ja eri valtioiden ilmailuviranomaisten julkaisemiin oppaisiin ja ohjeisiin. Tässä opinnäytetyössä ei pureuduta yksityiskohtaisesti tiettyyn tekniikkaan, vaan tekniikka esitellään perustasolla, jotta lukija saisin kuvan siitä, mistä koko RNAV-järjestelmä muodostuu. Opinnäytetyön aineistona on hyvin pitkälle käytetty Oxfordin yliopiston liikennelentäjän koulutukseen tekemiä kirjasarjoja sekä eri ilmailuviranomaisten ja järjestöjen Internet-sivustoja ja tietopankkeja.

2 SUUNNISTUKSEN HISTORIA ILMAILUSSA

Ilmailun alkuaikoina lentäjät käyttivät sijainnin määrittämiseen ja suunnistamiseen apuna koneesta nähtäviä maamerkkejä, kuten teitä, rautateitä, kaupunkia, lentokenttiä ja kaikkia maamerkkejä, joista he pystyivät sijaintinsa määrittelemään. Lentäjät määrittivät näkyvän horisontin avulla koneen asennon maan pintaan nähden eli sen, oliko kone vaakalennossa vai muuttamassa korkeutta tai asentoa. 1920-luvun alkupuolella postilentäjät pystyivät lentämään yölentoja ja lentoja kaikissa sääolosuhteissa näkemättä maata koneen asennon näyttävien laitteiden avulla. Varhaisimmissa laitteissa ilmakupla nesteessä näytti siipien asennon ja laite, joka mittasi ilman painetta, näytti lentokorkeuden. Ensimmäiset magneettikompassit olivat joko lentäjällä kädessä tai kiinteästi lentokoneeseen asennettuja osoittamassa koneen lentosuuntaa magneettiseen pohjoisnapaan nähden. (Mola 2008.)

Vuonna 1929 Lawrence Sperry ja hänen yhtiönsä esittelivät uuden tärkeän tekniikan, keinohorisontin, joka toimii hyrrävoimien periaatteilla. 1930-luvulla kehitettiin mittari, jonka avulla koneen nopeutta ja korkeutta voitiin mitata. Koneen ulkopuolelle asennettiin putki, joka mittasi dynaamista painetta. Koneen nopeus ilmaan nähden oli suoraan verrannollinen putkeen menevän ilman kanssa. Putkessa oli myös poikittain ilmapirtaan nähden aukko, joka mittasi staattista painetta. Staattisen paineen avulla voitiin laskea lentokoneen lentokorkeus. Suunnistukseen tarvittavat tiedot saatiin useasta eri mittarista. Mittareiden sijainti toisiinsa nähden sijoitettiin tietyllä tavalla ns. "basic six". Basic six sisältää asentomittarin, pystynopeusmittarin, nopeusmittarin, kallistus- ja kaartomittarin, suuntamittarin ja korkeusmittarin, jotka kaikki ovat yhä käytössä. (Mola 2008.)

Inertial Navigation System (INS) ja Inertial Guidance System (IGS) ovat paranneltuja versioita Sperryn keksinnöistä. Nämä laitteet mittaavat lentokoneen sijainnin muutosta koneen alkuperäiseen sijaintiin nähden, joka on maassa asetettu koneen järjestelmään. INS-laite mittaa koneen kiihtyvyyksiä ja muutoksia asennon ja nopeuden suhteen kiihtyvyyksimittareiden avulla. Määrittelemällä koneen leveys- ja pituuspiirit paikasta, josta kone lähtee liikkeelle, laite laskee kiihtyvyyksiä, joita in

tegroimalla tiedetään nopeus ja uudelleen integroimalla kuljettu matka. Näiden tietojen avulla voidaan laskea lentokoneen sijainti horisontaalisessa tasossa maapalloon nähden. (Mola 2008.)

Radiosuunnistuslaitteet kehitettiin samoihin aikoihin kuin mekaaniset laitteet. Vuonna 1926 saavutettiin toimiva kaksisuuntainen radioyhteys maa-aseman ja lentokoneen välillä. Ensimmäinen radiolaitteiden massatuotanto alkoi vuonna 1928. Ensimmäinen radiosuunnistustaite lähetti morsekoodia neljästä eri lähettimestä, jotka muodostivat neliön muotoisen sijainnin toisiinsa nähden. Morsekoodien tunnusta ja vahvuutta avuksi käyttäen lentäjät pystyivät määrittelemään sijaintinsa. (Mola 2008.)

Toisen maailmansodan jälkeen kehitettiin HF-taajuudella toimivia radiolähtimiä, joita kutsuttiin nimellä VHF Omni-directional Range (VOR) ja niiden avulla lentäjät pystyivät lentämään kohti- tai uloslentoa majakkaan nähden tiettyä suuntaa, ns. radiaalia, pitkin. VOR perustuu lähtimen vaihte-erojen mittaamiseen. VOR:ia kutsutaan ei-tarkkuus-suunnistuslaitteeksi, koska sen avulla pystytään määrittelemään pelkästään horisontaalinen sijainti maa-asemaan nähden, ei vertikaalista. Toisen maailmansodan aikana kehitettiin myös tutka. Tutkan avulla lennonjohtajat pystyivät havaitsemaan koneen sijainnin ja määräämään lentäjiä pitämään koneiden väliset etäisyydet eli porrastukset turvallisina. (Mola 2008.)

Aikojen kuluessa on kehitetty useita eri suunnistuslaitteita, joista tärkeimpinä voi mainita mm seuraavat: Doppler, VDF, NDB, ADF, ILS, MLS, DME, GPS, VOR ja LORAN C. Nykyaikaiset lentokoneet käyttävät suunnistamiseen ja paikan määrittämiseen useista eri lähteistä saatavaa tietoa, joka käsitellään tietokoneella. Tarkkaa sijaintitietoa voidaan käyttää lentäjien näytöillä osoittamaan sijaintia ja helpottamaan suunnistamista sekä autopilotin ja muiden laitteiden tarpeisiin. Vaikka nykyään liikenneluokan lentokoneet luottavat hyvin pitkälle Global Positioning System (GPS) -järjestelmästä saatavaan tietoon, käyttävät ne yhä kymmeniä vuosia vanhoja, luotettaviksi todistettuja keksintöjä niistä saatavan tarkemman sijaintitiedon ansiosta ja myös varajärjestelmänä jonkin järjestelmän vikaantumisen varalle. Suurin yksittäinen tekijä ilmailussa käytettävien suunnistuslaitteiden ja suunnistusjärjestelmien kehittämisessä on varmasti turvallisuuden parantaminen. Polttoaineen kulutuksen vähentäminen, ympäristöystävällisyys ja aikataulujen tehok

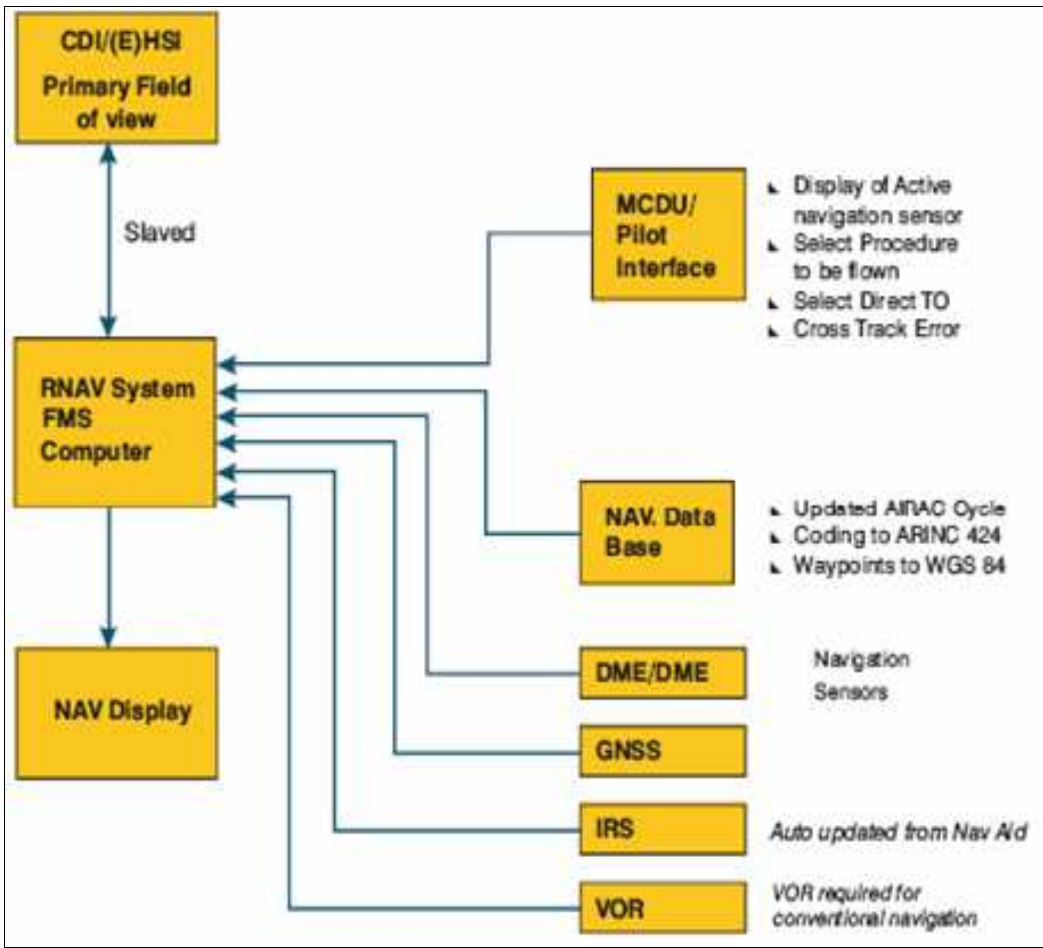
kaampi toteutus ja säännöstely asettavat myös omat vaatimuksensa tehokkaiden suunnistusjärjestelmien kehitykselle. (Mola 2008.)

3 RNAV:N PERUSTEET

Termi RNAV tarkoittaa mitä tahansa järjestelmää, joka mahdollistaa tarvittavalla tarkkuudella suunnistamisen horisontaalisessa suunnassa ilman, että täytyy lentää suoraan yli maassa sijaitsevan suunnistuslaitteen. RNAV ei itsessään ole mikään suunnistus laite, vaan se käyttää suunnistamiseen saatavia tietoja muista laitteista tai järjestelmistä. Näitä järjestelmiä ovat VOR/DME, ILS/MLS, LORAN, GNSS, INS/IRS ja ADC. Time (Radio Navigation 2007, 13.1)

Uusimmat RNAV-järjestelmät käyttävät pääosin Global Position System (GPS) laitetta sijainnin määrittämiseen. Vanhemmat laitteet käyttävät VOR:ia ja DME:ta, joista tietokone laskee koneen sijainnin koneen ollessa laitteiden katvealueilla. Flight Management System (FMS), sisältää tietokannat eri karttapohjista ja suunnistuslaitteista sekä tekee tarvittavat laskennat sijainnin määrittämiseen. (Advanced Avionic Handbook 2009.)

Käytettäessä RNAV/FMS-järjestelmiä suunnistamiseen on tärkeä ottaa huomioon, että suunnistuslaitteet toimivat niin sanotulla line of sight -periaatteella. Tällöin laitteeseen pitää olla teoreettinen näköyhteys. Mikäli lentää vuoristojen solissa, joissa korkeiden vuorensinämien takia ei ole katvetta suunnistuslaitteilla tai tarvittava määrä satelliitteja ei pysty kattamaan aluetta, järjestelmä ei pysty määrittelemään lentokoneen sijaintia katvealueen vuoksi. Tällaisissa tilanteissa toimivat vain ns. dead reckoning -järjestelmät, kuten INS, eli järjestelmät, jotka eivät tarvitse ulkopuolista tietoa sijainnin määrittämiseksi. (Advanced Avionic Handbook 2009.) Kuviossa 1 seuraavalla sivulla havainnollistetaan sitä, mistä eri lähteistä RNAV-järjestelmä koostuu.



KUVIO 1. RNAV-järjestelmän laitteet (GateV. Aircraft Maintenance 2009.)

4 RNAV-TYYPIT JA -TASOT

4.1 Basic RNAV

Basic RNAV (B-RNAV) on RNAV:n kehityksen ensimmäinen vaihe, joka tarkoittaa RNAV -suunnistulaitetta, jonka tarkkuus on ± 5 Nm:n sisällä vähintään 95 % lentoajasta. B-RNAV voi käyttää sijainnin laskemiseen seuraavia laitteita: VOR/DME:tä, DME/DME:tä tai GPS:ää. INS:ää voidaan käyttää, mikäli sijainnin päivityksestä maassa tai radiolaitteen avulla tapahtuneesta päivityksestä ilmassa on kulunut maksimissaan kaksi tuntia. LORAN C:tä voidaan käyttää alueella, jossa on tarvittava peittoalue. B-RNAV-vaatimus tuli pakolliseksi Euroopan ilmatilassa ATS -reiteillä lentopinnan 95 yläpuolella 23. huhtikuuta 1998. Lentokoneissa, joissa on yli 30 matkustajapaikkaa, on myös B-RNAV-vaatimus. B-RNAV voi olla vaatimuksena myös muissa ilmatiloissa valtioiden määräyksen mukaan. (Eurocontrol. B-RNAV.)

4.2 Precision RNAV

Järjestelmällä Precision RNAV (P-RNAV), tarkoitetaan RNAV-järjestelmää, joka pystyy ± 1 Nm:n tarkkuuteen vähintään 95 % lentoajasta. P-RNAV voi käyttää sijainnin laskemiseen seuraavia laitteita: VOR/DME, DME/DME tai GPS. INS:ää voidaan myös käyttää lyhyitä aikoja. Aika viimeisestä päivityksestä maassa riippuu laitteen sertifiointista. (Eurocontrol. P-RNAV.)

4.3 RNAV tasot

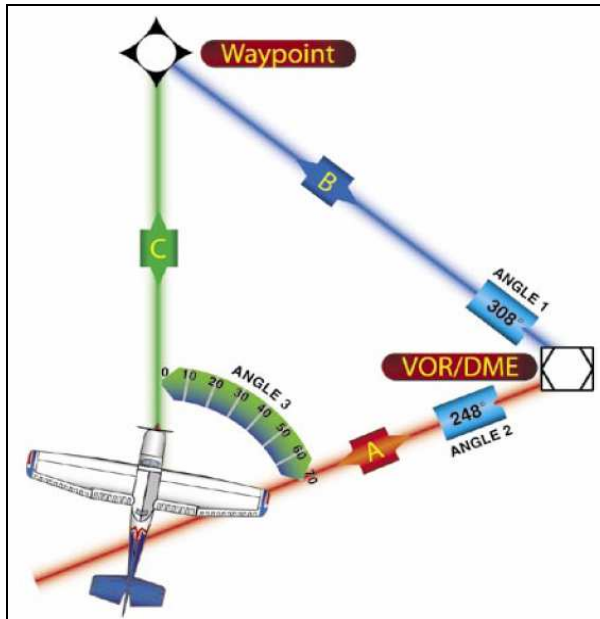
2D RNAV:lla tarkoitetaan pelkästään horisontaaliseen sijaintiin ja suunnistamiseen kykenevää RNAV järjestelmää. 3D RNAV pystyy sekä horisontaaliseen, että vertikaaliseen sijainnin määrittämiseen ja suunnistamiseen. 4D RNAV:ssa on 3D RNAV:n lisäksi myös ajan funktio mukana. (Radio Navigation 2007, 13.2)

5 RNAV:SSA KÄYTETTÄVÄT SUUNNISTUSLAITTEET

Kuten aikaisemmin on jo mainittu, RNAV-järjestelmän sijaintitieto koostuu yhdestä tai useammasta eri suunnistuslaitteesta saadusta tiedosta laskemalla. Oletetun sijainnin ja suunnistuksen tarkkuus riippuu käytetyistä laitteista eli siitä, minkä suunnistuslaitteen tietoja on saatavilla ja kuinka luotettavia ne ovat. (Instrument Flying Handbook 2009.)

5.1 VOR/DME RNAV

VOR RNAV perustuu ns. haamupisteeseen (phantom point), joka lasketaan tietokoneella VORTAC:sta tai VOR/DME:sta saatavien tietojen avulla. Kuten kuvio 2 seuraavalla sivulla osoittaa, sivulta a saadaan mitattua DME -välimatka VOR/DME:lle, sivulta b VOR/DME:lta haamupisteelle ja kulma 1 astelukuna. VOR -radiaali ja suunta VOR/DME:lta reittipisteelle ovat arvoja, jotka on syötetty järjestelmään ohjaamon laitteista. Suunta VOR/DME:lta lentokoneelle, kulma 2, on mitattu VOR-vastaaanottimella. Tietokone jatkuvasti vertailee näitä kahta kulmaa 1 ja 2 ja laskee ja määrittelee niiden avulla kulman 3 ja sivun C, joka on välimatka Nm:nä ja magneettisena kurssina lentokoneesta reittipisteelle. (Instrument Flying Handbook 2009.)



KUVIO 2 VOR/DME:n toiminta (Instrument Flying Handbook 2009.)

5.1.1 VOR/DME RNAV:n komponentit

Vaikkakin RNAV:n ohjaamon mittarien näytöt vaihteleva jonkin verran valmistajan mukaan, suurin osa on liitetty lentokoneen Control and Display Unit (CDI):iin. Näyttö sisältää tiedot reittipisteestä, taajuudesta, käytössä olevan laitteen tilasta, reittipisteen radiaalista ja välimatkasta, DME -välimatkasta, maanopeudesta ja asemalle kuluva ajasta. VOR/DME:n käytöllä maanopeus on tarkka vain lennetäessä joko asemaa kohti tai asemasta poispäin. RNAV:n valinnalla maanopeus on tarkka koko ajan. (Instrument Flying Handbook 2009.)

5.1.2 VOR/DME:n funktiot RNAV:n toiminnassa

VOR/DME:ta käyttämällä RNAV pystyy toimimaan perinteisiä suunnistuslaitteita apuna käyttäen, kunhan laitteet sijaitseva maa-asemien kantomatkan alueella. Sarja reittipisteitä muodostaa RNAV-reitin ja reittejä voidaan lentää IFR:ssä, kunhan ne ovat hyväksytyjä. VOR/DME RNAV:lla voidaan lentää myös vertikaali-RNAV:ia. Lasketuminen tai nousu alkaa joltain reittipisteeltä tietyllä korkeudella ja loppuu toiselle reittipisteelle tiettyyn julkaistuun korkeuteen. Lentotoiminnassa täytyy kuitenkin muistaa, että tämä ei silti tarkoita tarkkuuslähestymistä. Annettuja korkeuksia täytyy noudattaa, ellei ATC toisin määrää. (Instrument Flying Handbook 2009.)

5.1.3 VOR/DME:n virheet

Suurimman ongelman VOR/DME:n käytölle asettaa maalaitteiden kantomatka. Julkaistuissa menetelmissä tämä ei kuitenkaan tule ongelmaksi. Täytyy muistaa, että näiden maa-asemien peittoalue määräytyy hyvin pitkälle lentokoneen korkeuden mukaan. (Instrument Flying Handbook 2009.)

5.2 LORAN C

Long Range Navigationin (LORAN C:n) toiminta perustuu pitkän kantaman lähettimiin, jotka antavat tarkan sijainnin. Laite toimii pulssitekniikalla mittaamalla maalaitteen ja lentokoneen lähettimen välillä kulkevan pulssin aikaa. Laite lähettää pulssien sarjoja masterlähettimeltä ja sarjoja orja- ja toissijaisilta lähettimiltä. LORAN C:n on suunniteltu poistuvan käytöstä vuonna 2008, mutta on todennäköistä, että sen toiminta jatkuu yhä usella vuodella eteenpäin, ainakin se toimii vielä syk

syllä 2009. LORAN C:n kantama vaihtelee noin 900:sta Nm:stä noin 2500 Nm:iin. Tarkkuus vaihtelee noin 0,2:sta Nm:sta 20 Nm:iin. (Radio Navigation 2007, 16.1–16.18.)

LORAN C:n leveys-/pituuspiirien jatkuvalla laskemisella saadaan tiedot lentoreitistä maahan nähden, maanopeus, matka kohteeseen, aika milloin saavutaan kohteeseen ja reitin risteyspisteistä. (Instrument Flying Handbook 2009.)

5.2.1 LORAN C:n komponentit ja laitteen funktio

LORAN C -vastaanotin sisältää radiovastaanottimen, signaalin prosessorin, navigaatiotietokoneen, näyttöyhdistelmän ja antennin. LORAN C -laitteet vaihtelevat paljon käyttäjän ohjelmoinnin ja tietojen näytön osalta. Jo edellä esitettyjen toimintojen lisäksi LORAN C näyttää lähimpiä lentokenttiä hätätilanteita varten, sekä usein löytyy myös vertikaalinavigaation mahdollisuus. (Instrument Flying Handbook 2009.)

5.2.2 LORAN:in virheet

LORAN on herkkä kaikille virheille, jotka aiheutuvat häiriöstä radiosignaalien liikkeeseen, kuten lentokoneen omat sähkölaitteet ja luonnon ilmiöistä johtuvat häiriöt. Antennin oikealla asentamisella ja staattisen sähköön purkajien avulla saadaan laitteen tarkkuutta parannettua ja häiriöitä minimoitua huomattavasti. (Instrument Flying Handbook 2009.)

LORAN on tarkimmillaan avoveden päällä päivällä ja vähiten tarkka, kun signaali tulee maan päälle yöllä. (Instrument Flying Handbook 2009.)

5.3 GNSS

Global Navigation Satellite System (GNSS) on satelliittipohjainen suunnistusjärjestelmä. GNSS tarkoittaa yleisnimitystä sellaisille järjestelmille kuten GPS. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan vain GPS:ää, koska eurooppalaisten Galileo Project ei ole vielä toiminnassa. Venäläisten GLONASS -projektikin on vielä kesken, kuten muutkin vielä tekeillä olevat GNSS-projektit ainakin julkisesti ja koskien siviilien käyttöön tarkoitettuja palveluita. Eli lentokoneet käyttävät GPS-järjestelmää. GPS:n kehitystyö alkoi jo 1950-luvulla alun perin sotilaskäyttöön tarkoitettuna ja siihen myös kehitettynä. Tavoitteena on, että GNSS korvaa kaikki muut suunnistuslaitteet tulevaisuudessa. (Radio Navigation 2007, 15.1–15.21.)

Satelliitit pyörivät ellipsoidin muotoista rataa avaruudessa noin 20 180 km:n korkeudessa muodostaen 6 rataa, joiden yhteen kierrokseen satelliitilla menee aikaa 12 tuntia. GPS-järjestelmä käsittää 24 satelliittia, joista 21 on käytössä ja loput 3 varalla. GPS:n antama sijaintitieto pohjautuu The World Geodetic Survey of 1984 (WGS 84) -karttapohjalle. Järjestelmä koostuu kolmesta eri segmentistä, joita ovat käyttäjä-, kontrolli- ja avaruussegmentti. GPS-aika mitataan viikkoina ja tunteita alkaen 6. tammikuuta 1980 kello 00:00:00 UTC. GPS-aika on referoitu UTC-aikaan, mutta ei ole aivan sama. Heinäkuussa vuonna 2000 aikojen ero oli 13 sekuntia. Aika korjataan tarvittaessa satelliittien lähetyksissä. Yhden sekunnin heitto välimatkaa laskettaessa heittää 300 000 000 m sijainnissa. Satelliiteissa on 4 erillistä atomikelloa, 2 cesium- ja 2 rubidium -kelloa. (Radio Navigation 2007, 15.1–15.21.)

GPS-satelliitti lähettää pseudo-random noise (PRN) -koodia kahdella eri UHF-taajuudella, ja jokaisella satelliitilla on oma uniikki koodinsa. L1 -taajuus on 1575,42 MHz ja se on käytössä siviileille. 1227,6 MHz:n taajuudella lähetettävä L2 -koodi on pelkästään sotilaskäyttöön. Lisäksi on saatavana lisämaksullisia ja tarkempia palveluita, joiden avulla lähetysten sijaintitarkkuutta saadaan parannettua. PRN-koodit sisältävät seuraavat tiedot: satelliitin sijainnin, kellonajan, kellon vir

heen, tietoja ionisfääristä sekä joitain täydentäviä tietoja. (Radio Navigation 2007, 15.1–15.21.)

GPS:n perustoiminta perustuu satelliiteista lähetettäviin lähetyksiin, joiden ajankulua vastaanottimeen mitataan. Lähetykset kulkevat valon nopeudella. Vastaanotin määrittelee oman sijaintinsa neljästä satelliitista saamansa 3D fixin avulla. Tarkkuuden suurin yksittäinen tekijä on satelliittien sijainti vastaanottimeen nähden. GPS:n tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat satelliittien sijainti, satelliittien kellojen virheet, ionisfääristä johtuvat virheet, troposfääristä johtuvat virheet, vastaanottimesta aiheutuvat virheet, lähetyksen heijastumiset ja satelliittien huono sijainti toisiin satelliitteihin ja vastaanottimeen nähden. (Radio Navigation 2007, 15.1–15.21)

5.4 INS JA IRS

Inertial Navigation System (INS) on täysin itsenäinen järjestelmä, jota pystytään käyttämään ilman ulkopuolista referenssiä. Lennon aluksi lentäjät määrittelevät laitteeseen koneen tarkan sijainnin leveys- ja pituuspiireinä. Laite mittaa lentokoneen kiihtyvyyksiä kiihtyvyyksimittareiden avulla, kiihtyvyyksistä kerran integroimalla saadaan nopeus ja toisen kerran integroimalla on tuloksena kuljettu matka. Hyrrät mittaavat kiihtyvyyksien suuntia. Kehittyneempi järjestelmä Inertial Reference System (IRS) sisältää laserhyrrät ja tehokkaamman tietokoneen, jotka parantavat laitteen tarkkuutta. (Instrument Flying Handbook 2009.)

Inertioiden virheet kasvavat ajan kuluessa. Laitteen tarkkuus on paras juuri, kun oikea sijainti on asetettu koneeseen, ja se huononee ajan kuluessa. Tarkimmat laitteen pystyvät jopa 0,1Nm–04Nm tarkkuuksiin jopa Atlantin ylittävien lentojen jälkeen eli 4–6 tunnin kuluttua. Pienemmät ja halvemmat laitteet pystyvät tarkkuuteen 1Nm–2Nm virhettä tuntia kohden. Synergialaitteet koostuvat INS/IRS-yksiköistä ja GPS-laitteesta. GPS:n tarkkuus ei niinkään muutu lentoajan mukaan, vaan riippuu muista tekijöistä. (Instrument Flying Handbook 2009.)

Useissa lentokoneissa on käytössä useampi erillinen IRS-laite, yleensä kaksi tai kolme, kuten muitakin koneen laitteita korvaamassa mahdollisesti vikaantunutta laitetta. Yleensä toinen FMC saa tietonsa toiselta IRS:lta ja päinvastoin. Jos laitteiden antamat tiedot poikkeavat toisistaan, on vaikea sanoa suoraan, kumpi laite on oikeassa, kahden laitteen järjestelmässä. Tällöin FMC vertaa jostain muusta ulkoisesta laitteesta saamaa sijaintitietoa IRS:sta saamaansa ja laskee, kumpi IRS on luotettavampi käyttämällä Kalman suodatin-menetelmää. (General Navigation 2007, 35.1–36.7)

5.5 ILS JA MLS

Instrument Landing Systemiä (ILS:ää) ja Microwave Landing Systemiä (MLS:ää) tarvitaan lähestymismenetelmissä, jotka antavat visuaalisen opastuksen lentäjille horisontaali- ja vertikaalisuunnassa. Näiden mittareiden avulla lentäjät tai autopilotti pystyvät lentämään lähestymisen oikeaa liukupolkua seuraten päätöskorkeuteen asti, josta he suorittavat ylösvedon proseduureja noudattaen tai laskun kiitotielle. (Radio Navigation 2007, 6.1–7.7)

ILS:n toiminta perustuu lähettimen modulaation syvyyksien mittaamiseen. Maalaite lähettää samalla VHF-taajuudella kahta eri modulaatiota, joiden perusteella vastaanotin määrittelee sijaintinsa. ILS:n localiser (horisontaalisen suunnan osoitin) kantaa noin 25Nm:n päähän $\pm 10^\circ$ keskilinjalta. Liukupolun osoitin näyttää vähintään 10Nm:n päähän 8° liukupolun keskilinjasta. Lisäksi ILS-järjestelmä saattaa sisältää markkereita, jotka antavat ääni- ja valoinformaation niiden ylitse lennettäessä. (Radio Navigation 2007, 6.1–7.7)

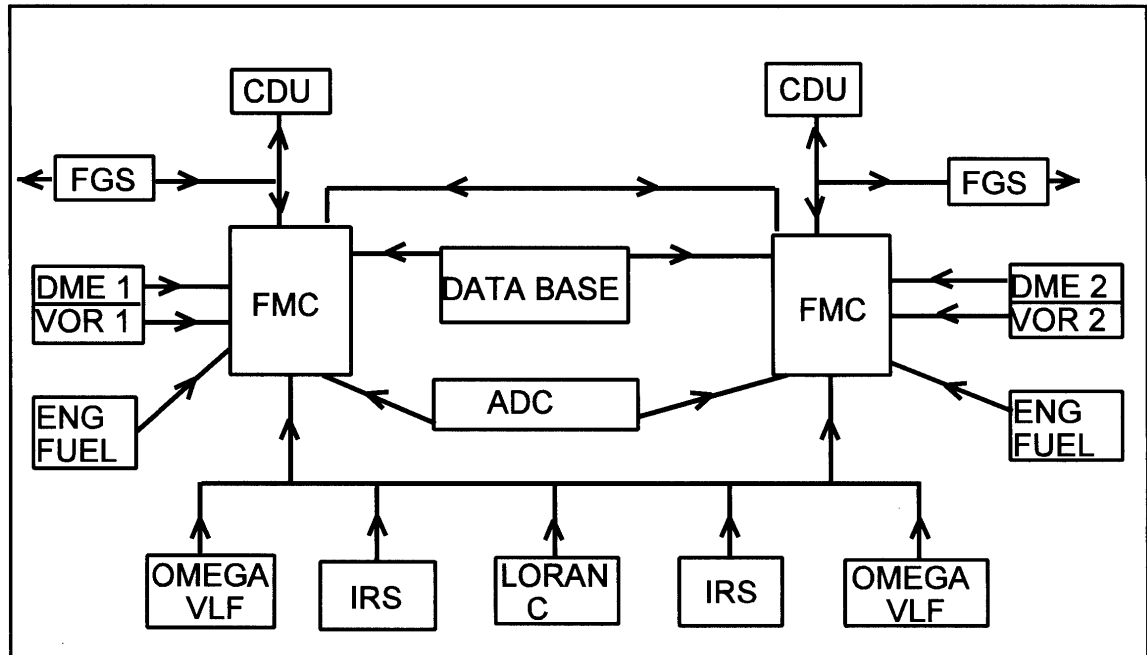
MLS-järjestelmä on suunniteltu korvaamaan ILS-järjestelmä jossain vaiheessa. MLS:n etuina on sen joustavuus käyttäjälle. MLS mahdollistaa kaartuvat lähestymiset, toisin kuin ILS:lla voidaan tehdä vain suoria lähestymisiä. MLS mahdollistaa myös 200 kanavan käytön ILS:n 40 sijasta. Horisontaalinen liukupolku on $\pm 40^\circ$:tta ja liukupolku on mahdollista säätää $0,9^\circ$:sta aina 20° :seen saakka. MLS

toimii SHF-taajuudella. MLS tarjoaa paljon joustoa lähestymisiin kattamalla isomman peittoalueen sekä mahdollistamalla lähestymisen useasta eri suunnasta ja korkeudesta. Tästä ominaisuudesta on hyötyä etenkin eri nopeusluokan koneiden porrastamisessa. Suomessa MLS ei ole käytössä, ja maailmalla se on suhteellisen harvinainen. (Radio Navigation 2007, 6.1–7.7)

6 FMS

1970-luvun puolivälin aikoihin Hubert Naimer ja Ed King Jr. alkoivat kehittää uutta teknologiaa palvelemaan ilmailun suunnistamista. Vuonna 1976 he saivat vision ”Master Navigation Systemista”, joka keräisi tietoa monesta eri lähteestä lentokoneen sensoreista ja joka antaisi tietoa ja opastusta kaikissa lennon vaiheissa. Siihen asti lentokoneet olivat suunnistaneet pääosin lyhyet matkat VOR:ia ja ADF:ää apuna käyttäen, ja pitkillä matkoilla turvauduttiin INS:iin, LORANiin, Omegaan ja Doppleriin. Ainostaan pitkän matkan suunnistusvälineillä voitiin lentää pisteestä pisteeseen, jotka oli käsin syötetty järjestelmään ja joiden sijainti oli määritelty koordinaatistossa. Alun perin kaikki reittipisteet täytyi syöttää erikseen kaikkiin erillisiin suunnistusjärjestelmiin, mikä lisäsi virheiden mahdollisuutta sekä kuormitti huomattavasti lentäjiä. (Instrument Flying Handbook 2009.)

Ratkaisuksi ongelmaan kehitettiin Control and Display Unit (CDU), joka toimi rajapintana päätietokoneen ja erillisten laitteiden välillä. Tämä teki mahdolliseksi yhden laitteen avulla hallinnoida monta erillistä laitetta ja vähensi laitteiden määrää ohjaamoissa. Koska mikään suunnistuslaite ei ole koskaan aivan tarkka ja luotettava, Naimer kehitti matemaattisen suodatinjärjestelmän, jonka avulla voitiin laskea mahdollisimman tarkka keskiarvo koneen sijainnista. Tätä kutsuttiinkin nimellä ”Best Computed Position” ja käyttämällä tietoa kaikkien suunnistulaitteiden sensoreista ja laskemalla nämä tiedot yhteen mahdollistettiin RNAV. Ratkaisuksi reittipisteiden syöttämiseen työläällä tavalla, toisin sanoen koordinaattien syöttämisellä jokaisesta reittipisteestä, kehitettiin tietokanta, jossa oli valmiiksi syötettyjä reittipisteitä. Tämä nopeutti lentäjien toimintaa ja vähensi myös virheellisten tietojen syöttämisen vahinkoja. Ensimmäinen laite tuli markkinoille vuonna 1982, nimeltään UNS-1. Flight management computer (FMC) oli käytössä. Kuviossa 3 havainnollistetaan eri laitteiden välistä suhdetta FMC:ssä. (Instrument Flying Handbook 2009.)



KUVIO 3. FMC:n kaaviokuva (Radio Navigation 2007)

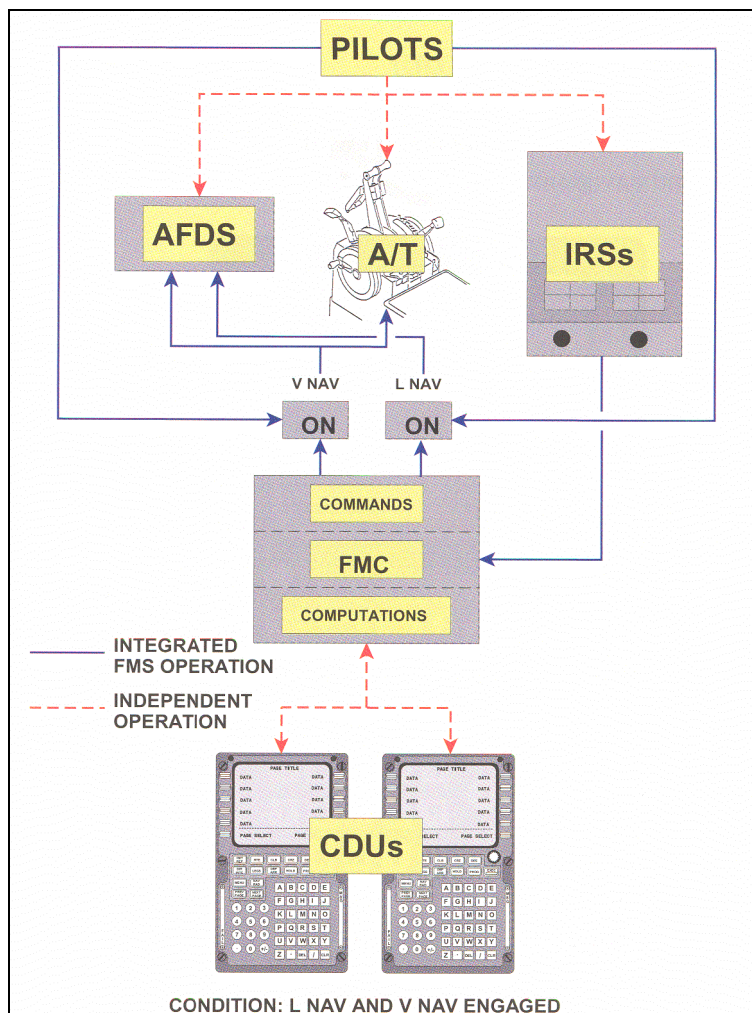
FMS:n käyttämät tietokannat sisältävät suuren määrän tietoa. Tietokannat tulee päivittää 28 päivän välein. Lentäjät eivät itse pysty lisäämään manuaalisesti tietoa tietokantaan, kuten reittipisteitä, virhemahdollisuuksien välttämiseksi. Päivittäminen laitteeseen tehdään valmistajan lähettämän päivityskortin avulla. FMS:n tietokanta sisältää suunnistuslaitteet (maa-asemat), lentoreitit, vakiolähtemisreitit, vakiosaaumisreitit, mittarilähestymisien proseduurit ja lentäjien CDU:n avulla tekemät reittisuunnitelmat. (Instrument Flying Handbook 2009.)

FMS mahdollistaa tietoja useisiin eri järjestelmiin ja laitteisiin. Saatavia tietoja ovat esimerkiksi valittu lentorata maahan nähden, koneen ohjaussuunta, suunta ja matka reittipisteille, poikkeama valitusta lentoradasta ja vastaavia tietoja Horizontal Situation Displaylle (HSI). (Instrument Flying Handbook 2009.)

FMS pystyy myös vertikaalisuunnistukseen vertaamalla koneen lentokorkeutta, jonka tietokone pystyy laskemaan Air Data Computerilta (ADC) saamastaan ilmanpaineesta, ja esimerkiksi lentokentän korkeutta, jonka laite saa tietokannasta. (Instrument Flying Handbook 2009.)

7 CDU

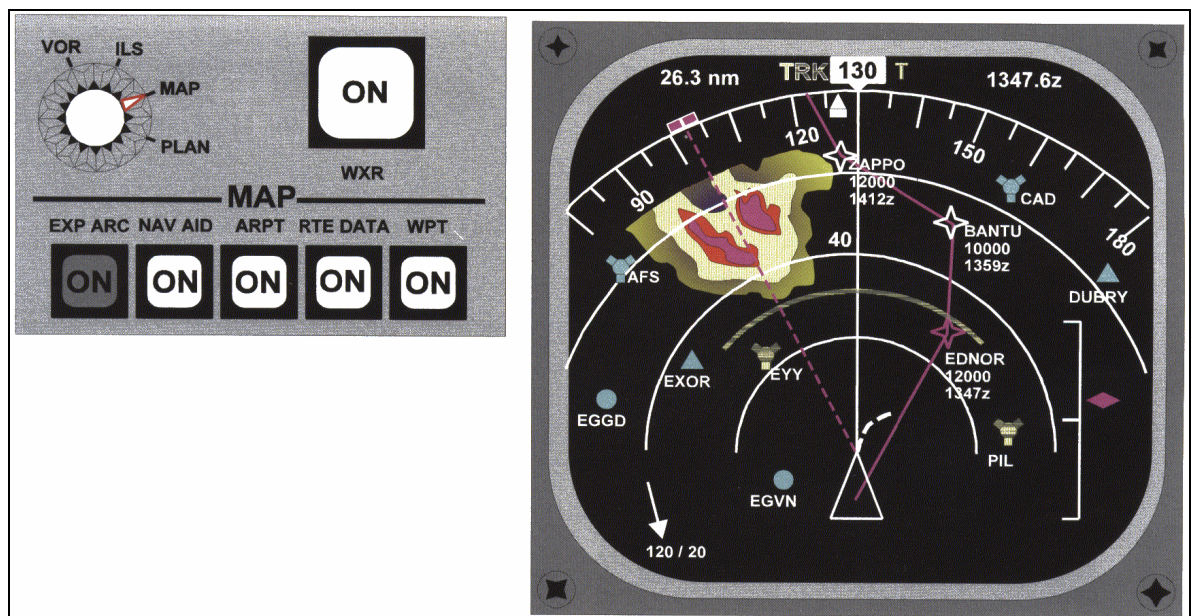
CDU on rajapinta ohjaajien ja FMC:n välillä. CDU mahdollistaa tietojen ja parametrien syöttämisen FMC:hin. CDU:n painikkeet koostuvat alfanumeerisesta näppäimistöstä, ja laitteessa on näyttö, josta voidaan seurata syötettyjä arvoja ja tarvittaessa lisätä, poistaa tai korjata. Yleensä koneessa on kaksi CDU:ta keskikonsolin kummallakin puolella, kummallekin lentäjälle oma. Kuviossa 4 havainnollistetaan CDU:n suhdetta muihin laitteisiin.



KUVIO 4. CDU:n kaavio (Radionavigation. 2007.)

8 EHSI

Electronic Horizontal Situation Indicator (EHSI), toimii näyttölaitteena IRS:lle, FMC:lle, VOR:lle, DME:lle, ILS:lle, Automatic Direction Findingille (ADF:lle), Traffic And Collision Avoidance Systemille (TCAS:lle) ja Airborne Weather Radarille (AWR:lle). Lentokoneissa on erikseen symbol generator (SG), joka toimii osana Electronic Flight Information System (EFIS) -järjestelmää. SG muodostaa kuvan näytölle ja toimii rajapintana analogisen tiedon muodostamisessa digitaaliseksi. Näytöt voivat olla joko CRT (Cathode Ray Type)- tai LCD (Liquid Crystal Type) -näyttöjä. LCD:n etuna on paitsi koko, myös vähäisempi jäähdytyksen tarve. Yleisimmin EHSI:ssa on valintana useampi vaihtoehto sille, mitä tietoja näytöllä näytetään. Vaihtoehtoja ovat Full Rose Navigation (FULL NAV), Full Rose VOR/ILS, Expanded Rose Navigation (EXP NAV), Expanded Rose VOR/ILS, MAP ja PLAN. TCAS on laite, joka näyttää muut lentokoneet ja antaa tarvittaessa varoituksen ja väistöohjeet. AWR voidaan liittää näyttämään tietoa seuraavissa moodeissa: EXP NAV, EXP VOR/ILS ja MAP. Kuviossa 5 on EHSI:n näyttö ja käyttölaite. (Instrumentation 2007.)



KUVIO 5. EHSI:n näyttö MAP-modessa ja käyttölaite (Instrumentation 2007.)

9 RNAVIN EDUT JA HAITAT

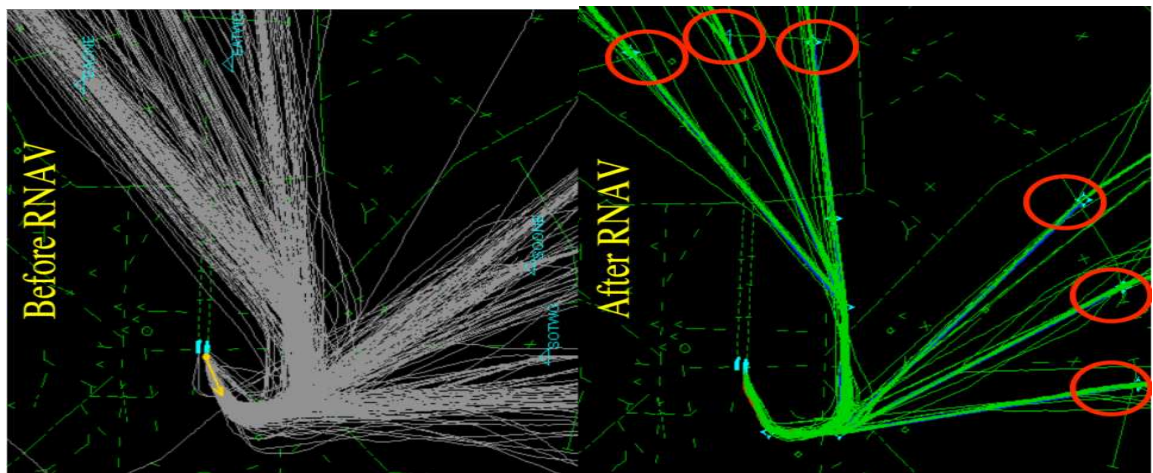
RNAV-järjestelmä mahdollistaa suuremmat lentoreitit. RNAV vähentää myös huomattavasti radioliikennettä, koska lentokoneet voivat lentää tiettyjä reittejä ilman lennonjohdolta saatavaa tutkavektorointipalvelua. Koska RNAV:n avulla suunnistamisessa ei tarvitse lentää suoraan majakkaa kohti tai sen yli, saavutetaan sillä seuraavia etuja:

- Pienemmät välimatkat, lyhyemmät lentoajat ja pienempi polttoaineen kulutus mahdollistavat lentäjille ja lentoyhtiöille tehokkaamman reitinsuunnittelun ja -valinnan.
- Tehokkaamman ilmatilan kapasiteetin käytön, koska ilmatilassa voidaan lentää suurempia reittejä, yhdensuuntaisesti, vastakkain taikka risteäviä lentoratoja.
- Pienemmät porrastusminimit niin korkeus- kuin leveys suunnassa mahdollistavat tehokkaamman ilmatilankäytön ja vähentävät tarpeettomia odotuksia varsinkin ruuhkaisilla lentoalueilla.
- Käytettäessä RNAV:ia tarvitaan vähemmän suunnistuslaitteita, koska voidaan lentää kulkematta suunnistuslaitteiden ylitse.
- Vähentää radioliikennettä, koska lennonjohtaja voi selvittää lentäjiä lentämään reittejä, joissa on kaartoja. Aikaisemmin kaarrot selvitettiin seuraamalla konetta tutkan näytöltä, ja käskemällä aloittamaan kaarto tiettyyn aikaan.
- Tehokkaamman melunvaimennuksen, koska koneiden lähtö- ja saapumisreitit voidaan suunnitella monimutkaisemmiksi.

RNAV:in haittapuolina voidaan pitää liian hyvää suunnistustarkkuutta. Mikäli lentokoneen radiolaitteet hajoavat ja lentokone seuraa tietyn aikaa proseduurien mukaista menetelmää, yhteentörmäyksen vaara kasvaa. Mikäli lentokoneiden suun

nistuslaitteiden tarkkuus olisi huonompi, voisi syntyä luonnollinen porrastus, koska lentokoneet poikkeaisivat vähän haluamaltaan lentoreitiltä. Suurin yksittäinen tekijä virheiden syntyyn käytettäessä elektronisia suunnistuslaitteita on lentäjän sormi eli näppäilyvirheet. Eli lentäjä vahingossa ja tietämättään valitsee esimerkiksi väärän reittipisteen, jota kohti lentokone lentää. (Radio Navigation 2007, 13–1)

Kuviossa 6 osoitetaan hyvin lentoratojen tarkentumiset RNAV-proseduurien käyttöönoton jälkeen. Kuviossa vasemmalla on Atlantan lentokentältä vuonna 2005 tutkalta tallennettuja lentoreittejä ennen RNAV:in käyttöönottoa ja kuvassa oikealla lentoreitit RNAV:in käyttöönoton jälkeen.



KUVIO 6. Atlantan lentokentän tutkakuva (Tarbert, B. 2006.)

10 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä kattava selvitys RNAV:sta. Aiheen valinta johdettiin hyvin pitkälle kiinnostuksesta saada tietoa enemmän RNAV-järjestelmästä. En löytänyt aiheesta kattavaa suomen- tai englanninkielistä opasta, joten päätin ottaa asiasta selvää ja tehdä sen itse tämän opinnäytetyön merkeissä. Aihepiirin rajaus oli melko haastavaa, sillä useimmissa lähteissä keskityttiin pikemminkin kertomaan, kuinka RNAV:ia käytetään käytännössä ohjekirjojen muodossa tai mitä laakien tuomia rajoituksia järjestelmän käyttämiseen ja tarkkuuteen on asetettu.

Kuten jo johdannossa mainitsin, tavoitteenani oli keskittyä pikemminkin RNAV-järjestelmään kokonaisuutena kuin tehdä siitä opas kuinka ja millä edellytyksillä RNAV-järjestelmää voidaan käyttää. Suurimpana haasteena opinnäytetyön tekemisessä pidin luotettavan lähdemateriaalin löytämistä. Kaikki materiaali, jota käytin opinnäytetyössäni, pohjautuu joko koulukirjoihin tai viranomaisten julkaisemiin tietoihin. Toinen haaste aiheen rajaamiseen liittyen oli, kuinka tarkasti käyn läpi RNAV:iin liittyviä laitteita. Pyrin antamaan lukijoille jonkinlaisen käsityksen ko. laitteista, mutta mikäli lukijoille jäi vaivaamaan jonkin tiedon puute laitteisiin liittyen, on tietoa helposti saatavilla esimerkiksi Internetin kautta. Toivon, että opinnäytetyöni lukijat saavat selkeän kuvan siitä, mitä RNAV tarkoittaa ja pystyvät havainnollistamaan siihen liittyvän kokonaisuuden.

LÄHTEET

Advanced Avionics Handbook. 2009. Federal Aviation Administration. Sähköinen kirja. Saatavissa: <http://www.faa.gov/library/manuals/aviation/media/FAA-H-8083-6.pdf>. Luettu 10.8.2009.

Bruce Tarbert. Area Navigation RNAV and Required Navigation Performance. 2006. PDF-tiedosto. Saatavissa: <http://www.lv-vacc.org/MATERIAL/RNAV.pdf>. Luettu 12.8.2009

Eurocontrol. B-RNAV. Internet-sivu. Saatavissa: http://www.ecacnav.com/Future_Applications/B-RNAV. Luettu 10.8.2009.

Eurocontrol. P-RNAV. Internet-sivu. Saatavissa: <http://www.ecacnav.com/content.asp?CatID=201>. Luettu 10.8.2009.

GateV. Aircraft Maintenance. 2009. PDF-tiedosto. Saatavissa: <http://www.gatev.at/Documents/NewsFlyer/PR-NAV.pdf>. Luettu 11.8.2009.

General Navigation. 2007. Theoretical Training Manuals. England. Transair (UK) Ltd.

Instrumentation. 2007. Theoretical Training Manuals. England. Transair (UK) Ltd.

Instrument Flying Handbook. 2009. Federal Aviation Administration. Sähköinen kirja. Saatavissa: <http://www.faa.gov/library/manuals/aviation/media/FAA-H-8083-15A.pdf>. Luettu 10.8.2009.

Mola Roger, Aircraft Navigation Technology. Www-dokumentti. Saatavissa: http://www.centennialofflight.gov/essay/Evolution_of_Technology/navigation_tech/Tech33.htm. Luettu 11.8.2009.

Radio Navigation. 2007. Theoretical Training Manuals. England. Transair (UK) Ltd.