

Navigacija zrakoplova s obzirom na zemaljske postaje

Jelinčić, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:080423>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

Ana Jelinčić

**NAVIGACIJA ZRAKOPLOVA S OBZIROM NA ZEMALJSKE
POSTAJE**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2017.

Zagreb, 15. ožujka 2017.

Zavod: **Zavod za zračni promet**
Predmet: **Komunikacijski, navigacijski i nadzorni sustavi**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 3850

Pristupnik: **Ana Jelinčić (0135228759)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Zračni promet**

Zadatak: **Navigacija zrakoplova s obzirom na zemaljske postaje**

Opis zadatka:

Opisati povijeni razvoj zrakoplovne navigacije. Analizirati postupak određivanja smjera postupkom goniometriranja odašiljača uz procjenu pogreške i čimbenike koji utječu na povećanje pogreške. Objasniti navigaciju pomoću neusmjerenog radiofara i zrakoplovnog sustava ADF. Usporediti princip lociranja pomoću neusmjerenih radiofarove i sustava VOR te izvedenica sustava VOR. Opisati sustav nadzora zračnog prometa u Republici Hrvatskoj s naglaskom na prikupljanje podataka i uporabu radara čiji signali se koriste pri nadzoru zračnog prostora.

Zadatak uručen pristupniku: 18. travnja 2017.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

doc. dr. sc. Mario Muštra

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**NAVIGACIJA ZRAKOPLOVA S OBZIROM NA ZEMALJSKE
POSTAJE**

AIRCRAFT NAVIGATION THROUGH GROUND-BASED STATIONS

Mentor: doc. dr. sc. Mario Muštra

Studentica: Ana Jelinčić

JMBAG: 0135228759

Zagreb, svibanj 2017.

NAVIGACIJA ZRAKOPLOVA S OBZIROM NA ZEMALJSKE POSTAJE

SAŽETAK

Zrakoplovna navigacija odnosi se na postupke i procese kojima se zrakoplov postavlja u pravilnu poziciju u odnosu na referentne točke na tlu, odnosno u odnosu na početnu, završnu i druge točke putanje odabrane za potrebe leta. Kao znanstvena disciplina, zrakoplovna navigacija proučava i primjenjuje metode pripreme leta, određivanja pozicija i vođenja zrakoplova tijekom leta od jedne poznate pozicije do druge na zemljinoj površini u prostorno-vremenskoj dimenziji. Osnovni zadatak zrakoplovne navigacije je osigurati da dolet zrakoplova bude optimalan i definiranom rutom na određenu točku, na određenoj visini i u određeno vrijeme. Zrakoplovna navigacija razvila se iz pomorske navigacije, a s obzirom na svoju specifičnu zahtjevnost, njen daljnji razvoj i način implementacije temelje se prije svega na razvoju novih instrumenata i metoda navigacije. U radu je izvršena analiza zrakoplovne navigacije u odnosu na zemaljske postaje, odnosno princip određivanja smjera goniometriranjem odašiljača, rad neusmjerenog radiofara NDB i sustava ADF u zrakoplovu, princip rada sustava VOR i njegovih izvedenica te sustav nadzora zračnog prometa u Republici Hrvatskoj.

KLJUČNE RIJEČI: zrakoplovna navigacija, zemaljske postaje, zračni promet

SUMMARY

Aircraft navigation relates to methods and processes of placing the aircraft in the proper position related to reference points on the ground, ie to the initial, second and final path point selected for flight purposes. As a scientific discipline, airline navigation studies and applies the methods of preparation of the flight, determining the position and guiding the aircraft during a flight from a known position to another one on the Earth's surface in the space-time dimension. The main task of air navigation is to ensure that the range of the aircraft is optimized and predefined by a route at a certain point at a certain distance in a certain time. Aircraft navigation has evolved from navigation at sea, and with regard to its specific demands, its further development and implementation methods are based primarily on development of new instruments and methods of navigation. This paper analyzes the air navigation in relation to the ground stations, the principle of determining the direction by goniometer of transmitters, NDB and ADF systems on the aircraft, the principle of operation of the VOR system and its derivatives and the control system of air traffic in the Republic of Croatia.

KEY WORDS: aircraft navigation, ground stations, air traffic

SADRŽAJ

1. UVOD	2
2. POVIJESNI RAZVOJ ZRAKOPLOVNE NAVIGACIJE	3
2. 1. Pojam i definicija zrakoplovne navigacije.....	3
2. 2. Temeljne zadaće zrakoplovne navigacije	5
2. 3. Vrste zrakoplovne navigacije	7
2. 4. Razvoj koncepta navigacije	10
3. PRINCIP ODREĐIVANJA SMJERA GONIOMETRIRANJEM ODAŠILJAČA	12
4. NEUSMJERENI RADIOFAR NDB I SUSTAV ADF U ZRAKOPLOVU	17
5. PRINCIP RADA SUSTAVA VOR I NJEGOVIH IZVEDENICA	24
6. SUSTAV NADZORA ZRAČNOG PROMETA U RH.....	36
7. ZAKLJUČAK	39
Literatura	40
Popis kratica	41
Popis slika	42

1. UVOD

Zrakoplovna navigacija nastaje iz pomorske navigacije kroz višestoljetna iskustva. Razvoj instrumenata i metoda doprinosi navigaciji općenito, a zrakoplovna navigacija u tome nalazi još veću preciznost neophodnu za siguran let.

Ovaj rad analizira zrakoplovnu navigaciju iz segmenta zemaljskih postaja, odnosno, analizira navigaciju zrakoplova u odnosu na zemaljske postaje. Za razumijevanje navedenog, neophodno je upoznati se sa samom povijesti zrakoplovne navigacije, i razumjeti instrumente i metode koje se koriste. Ovaj rad upravo u tome nalazi svoju svrhu i cilj.

Ovaj rad sastoji se od sedam dijelova. Prvi dio, ujedno i uvodni, donosi svrhu i cilj ovog rada, kratki uvod u temu i pregled sadržaja. Drugi dio donosi povijesni razvoj zrakoplovne navigacije kroz analiziranje pojma i definicije zrakoplovne navigacije, njene temeljne zadaće, vrste i sam razvoj koncepta navigacije. Treći dio analizira princip određivanja smjera goniometriranjem odašiljača. Četvrto poglavlje analizira rad neusmjerenog radiofara NDB i sustava ADF u zrakoplovu. Peti dio donosi analizu principa rada sustava VOR i njegovih izvedenica. Šesti dio donosi analizu sustava nadzora zračnog prometa u Republici Hrvatskoj. Sedmi dio, ujedno i posljednji, donosi zaključak promišljanja na temu.

2. POVIJESNI RAZVOJ ZRAKOPLOVNE NAVIGACIJE

Zrakoplovna navigacija temelji se na višestoljetnim iskustvima pomorske navigacije koja svoje korijene ima još od starih naroda: Feničana, Grka, Skandinavaca, a posebice europskih moreplovaca srednjeg vijeka koji su plovili daleko od obale noću i u drugim nepogodnim uvjetima. Zrakoplovna navigacija je disciplina koju treba proučavati i doživjeti kao umjetnost, kojoj suvremena znanost daje široki zamah razvojem instrumenata i metoda, pa zrakoplovnu navigaciju nerijetko nazivaju i „znanstvenom umjetnošću“ [3]. Zrakoplovna navigacija proučava sve probleme koji se pojavljuju u pripremi za let i tijekom leta, a povezani su s vođenjem i upravljanjem zrakoplovom, proučava pokazatelje i instrumente koji mjere i predočuju navigacijske elemente leta u procesu vođenja zrakoplova kao i njihovu uzajamnu povezanost u rješavanju navigacijskih zadataka.

U ovom poglavlju bit će objašnjeni pojmovi vezani uz zrakoplovnu navigaciju za uvod u razumijevanje tematike ovog rada.

2. 1. Pojam i definicija zrakoplovne navigacije

Zrakoplovna navigacija je skup postupaka kojima se zrakoplov postavlja u pravilnu poziciju u odnosu na referentne točke na Zemlju. Te referentne točke su početna i završna točka putanje kao i druge točke koje se može odabrati za potrebe leta bilo da su relativno blizu putanji bilo da su daleko od nje (npr. geografski ili magnetski polovi Zemlje). Ako zrakoplovi lete u vizualnom režimu leta (engl. *Visual Flight Rules* ili VFR) navigacija uključuje jednostavnije postupke i popratne instrumente nego kad zrakoplovi lete u instrumentalnom režimu leta (engl. *Instrumental Flight Rules* ili IFR) [6].

Zrakoplovna navigacija je znanstvena disciplina koja s teorijskog i praktičnog stajališta proučava i primjenjuje metode pripreme leta, određivanja pozicija te vođenja zrakoplova tijekom leta od jedne poznate pozicije do druge poznate pozicije na zemljinoj površini u prostorno-vremenskoj dimenziji. Temeljna zadaća zrakoplovne navigacije je osiguranje doleta zrakoplova optimalnom i definiranom rutom na određenu točku, na određenoj visini u određeno vrijeme [4].

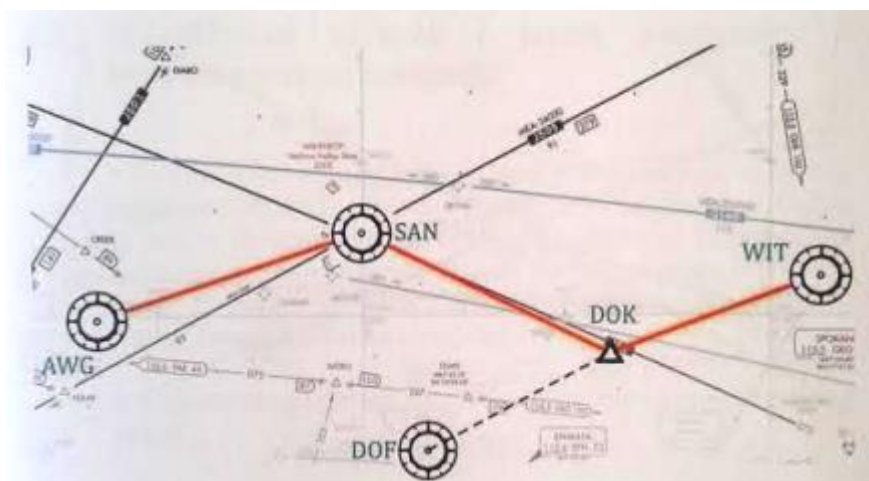
Pod pojmom vođenje zrakoplova razumijeva se mjerenje i korištenje parametara u tijeku leta koji označuju kretanje središta mase zrakoplova u odnosu na zemljinu površinu, a pojam upravljanje zrakoplovom podrazumijeva mjerenje i korištenje parametara u tijeku leta koji određuju kretanje zrakoplova oko središta svoje mase [3].

Navigacijska sredstva i uređaji dio su opreme zrakoplova, a čine ih navigacijski instrumenti, navigacijski sustavi i ostala sredstva i uređaji koji služe za određivanje elemenata trajektorije (putanje) leta u zraku i trajektorije zrakoplova u odnosu na zemljinu površinu, a objašnjeni su u nastavku ovog poglavlja ovog rada. Suvremeni zrakoplovi opremljeni su mnogobrojnim navigacijskim sredstvima i uređajima, koji su najčešće kompjuterizirani, i koji osiguravaju navigacijske podatke potrebite tijekom leta, autonomno ili u suglasnosti s navigacijskim sredstvima na Zemlji [3].

Također, radionavigacijskim sredstvima koja se nalaze na zemlji moguće je definirati putanju zrakoplova i izvan zračnih putova. Pritom se misli na putanje u dolasku na slijetanje, odlasku nakon polijetanja i prilazne putanje leta. Tako definirane putanje zauzimaju velik dio zračnog prostora zbog svih ograničenja koja su, u prvom redu, vezana uz način definiranja signala kojim se određuje putanja i točnosti vođenja zrakoplova prema tom signalu. Zbog toga, procedure prilaznja na slijetanje koje se temelje na radionavigacijskim sredstvima spadaju u neprecizna prilaznja jer zbog navedenih ograničenja nije moguće u uvjetima bez vanjske vidljivosti i primjenom metode instrumentalne navigacije usmjeriti i voditi zrakoplov precizno prema uzletno sletnoj stazi (stvarna putanja leta tijekom prilaznja ne poklapa se s produženom uzdužnom osi staze) [4].

Radionavigacijske rute i druge navigacijske procedure zavise od razmještaja radionavigacijskih sredstava na zemlji. U instrumentalnoj navigaciji, kad se primjenjuje metoda radionavigacije, zrakoplov treba preletjeti iznad definiranog radionavigacijskog sredstva na ruti kako bi posada mogla pozitivno identificirati to sredstvo pomoću instrumenata. Pozitivnom identifikacijom preleta radionavigacijskog sredstva završava jedan segment rute ili procedure i započinje sljedeći. To je zato što se rad navigacijskih sustava zrakoplova zasniva na informacijama dobivenim od radionavigacijskih postaja koje se nalaze na zemlji. Takav način vođenja navigacije i kontrole zrakoplova u prostoru u odnosu na zemaljske radionavigacijske postaje rezultira povećanom duljinom ruta jer je optimalno

postavljanje radionavigacijskih sredstava na određene lokacije na zemlji ili nemoguće (npr. na rutama koje prolaze iznad oceana) ili nepraktično (gradovi, planine i dr.) (slika 1) [5].



Slika 1. Radionavigacijske rute u zračnom prometu

Izvor: Novak, D.: *Zrakoplovna prostorna navigacija*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2012., str. 13

Uz to, propisane zaštitne površine koje pružaju zrakoplovu dodatno razdvajanje od ostalih zrakoplova ili prepreka u smislu sigurne visine nadvisivanja i dopuštene bočne udaljenosti od prepreka (engl. *Obstacle Protection Areas* ili OPA), zauzimaju razmjerno velik dio zračnog prostora. Također, pogreška navigacijskih sustava u točnosti prikazivanja informacije koja daje položaj u prostoru povećava se s povećanjem udaljenosti zrakoplova od radionavigacijskog sredstva [5].

2. 2. Temeljne zadaće zrakoplovne navigacije

Temeljna zadaća zrakoplovne navigacije je: osiguranje doleta zrakoplova na određeno mjesto, definiranom stazom (rutom), na određenoj visini i u predviđeno vrijeme. Sukladno tomu, rješavaju se i sljedeći problemi: [3]

- određivanje kursa leta i smjera do zadane točke,
- određivanje vremena leta na ruti,
- kompenzacija mogućih grešaka pokazatelja i instrumenata nastalih zbog metoda mjerenja, njihovo otklanjanje i primjena u tijeku leta,
- određivanje položaja zrakoplova (pozicije) iznad zemljine površine.

Temeljne navigacijske zadaće rješavaju se tijekom navigacijske pripreme za let, na zemlji, i u procesu vođenja zrakoplova tijekom leta. Prije leta određuju se: optimalna ruta i potrebni elementi za vođenje zrakoplova, uvažavajući stalne i promjenjive čimbenike koji utječu na preciznost proračuna za uspješno vođenje zrakoplova od jedne do druge točke na površini Zemlje, u predviđeno vrijeme, na određenoj visini. Tako određeni, ruta i navigacijski elementi predstavljaju program leta pripremljen na zemlji, koji tijekom leta osiguravaju uspješno, točno i sigurno realiziranje postavljene zadaće.

Za rješavanje navigacijskih zadaća koriste se različita navigacijska sredstva (instrumenti i uređaji) ugrađeni na zrakoplovu, postavljeni na određenim točkama na zemlji ili u svemiru. Navigacijska sredstva omogućuju rješavanje navigacijskih zadaća ili služe za određivanje navigacijskih parametara leta. Navigacijska tehnička sredstva dijelimo prema različitim kriterijima: [3]

1. Prema mjestu gdje se nalaze:
 - zemaljska navigacijska sredstva (ZNS)
 - zrakoplovna navigacijska sredstva
2. Prema prirodi i načinu korištenja:¹
 - autonomna (neovisna navigacijska sredstva)
 - neautonomna (ovisna navigacijska sredstva)
3. Prema načelu rada:
 - geotehnička
 - radijska, radarska i elektronička
 - astrotehnička i
 - svjetlosna sredstva.

Osim navedenih tehničkih navigacijskih sredstava, u navigacijskoj pripremi za let (na zemlji) i tijekom vođenja zrakoplova u letu, za rješavanje navigacijskih zadaća koriste se različita pomagala za mjerenje, crtanje, proračunavanje, izračunavanje i određivanje navigacijskih parametara (elemenata) koja se zajednički nazivaju *navigacijskim priborom*. To su: [3]

- karte različitih namjena, projekcija i razmjere
- razmjerni transporter (ploter)
- navigacijsko računalo (mehaničko ili elektroničko)

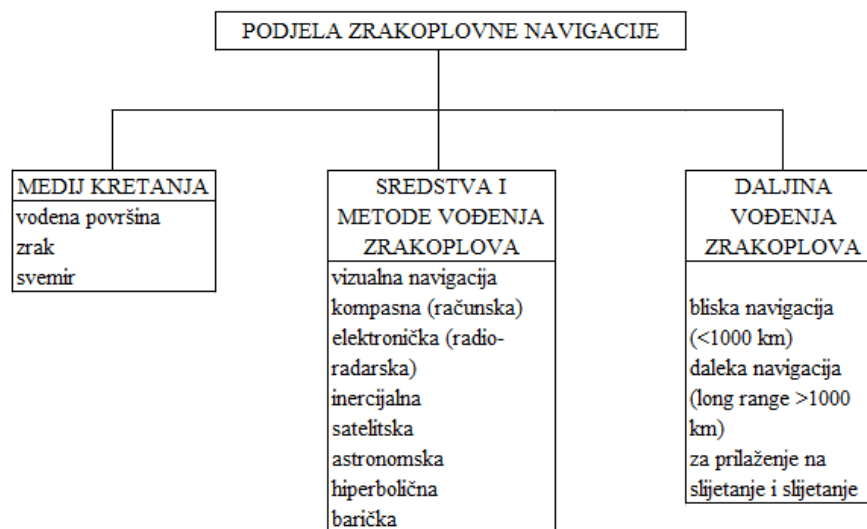
¹ Autonomna navigacijska sredstva za svoj rad ne koriste podatke dobivene od zemaljskih navigacijskih sredstava, a neautonomna (ovisna) navigacijska sredstva za svoj rad i određivanje navigacijskih parametara koriste uzajamnost rada zemaljskih i zrakoplovnih navigacijskih uređaja.

- pribor za crtanje
- različite tablice, grafikoni, nomogrami i sl.

Na zrakoplovnim kartama osim topografskih znakova korišteni su i zrakoplovni simboli. Njihovo objašnjenje je obično dano na poledini karte ili sa strane pored okvira. Za rješavanje navigacijskih zadaća primjenjuju se različiti postupci i metode koje su određene podjelom zrakoplovne navigacije, čime se bavi iduće poglavlje ovog rada.

2.3. Vrste zrakoplovne navigacije

U literaturi, navigacija se najčešće dijeli prema nekoliko kriterija: mediju kretanja, sredstvima i metodi vođenja i daljini, kako je prikazano na slici 2.

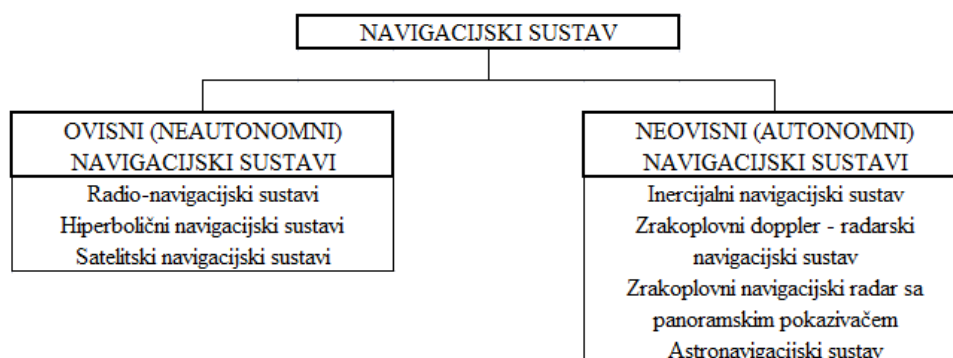


Slika 2. Podjela zrakoplovne navigacije

Izvor: Grozdanić, B., Hegeduš, M.: Zrakoplovna navigacija I. Kompasna navigacija, Fakultet prometnih znanosti i Ministarstvo obrane RH – HRZ i PZO, Zagreb, 1995., str. 13

Predložena podjela prema kriteriju sredstva vođenja zrakoplova ujedno označuje i metode navigacije. Pod metodom navigacije razumijeva se skupina svih postupaka koji se primjenjuju u tijeku leta, rješavajući navigacijske zadaće kao i načini korištenja navigacijskih sredstava i opreme zrakoplova u tijeku leta. Metoda navigacije u prvom je redu određena načinom kojim se određuje položaj zrakoplova u tijeku leta i svaka od njih mora omogućiti samostalno rješavanje navedenih navigacijskih zadaća. U teoriji se metode navigacije razmatraju odvojeno, a u praksi se, u tijeku vođenja zrakoplova, najčešće koriste kombinirano [3]. Ovaj rad bavi se navigacijom zrakoplova obzirom na zemaljske postaje, koje su analizirane u nastavku ovog rada.

Navigacijska oprema zrakoplova i navigacijski uređaji koji rade uzajamno, povezani su tijekom mjerenja i predočivanja navigacijske informacije. Navigacijski sustavi mogu se podijeliti na ovisne i neovisne, odnosno neautonomne i autonomne, kako prikazuje slika 3.



Slika 3. Podjela navigacijskih sustava

Izvor: Grozdanić, B., Hegeduš, M.: Zrakoplovna navigacija I. Kompasna navigacija, Fakultet prometnih znanosti i Ministarstvo obrane RH – HRZ i PZO, Zagreb, 1995., str. 14

Ovisni (neautonomni) navigacijski sustavi određuju navigacijske parametre uzajamnim radom navigacijskih uređaja na zemlji (u svemiru) i uređaja u zrakoplovu. Neovisni (autonomni) navigacijski sustavi određuju navigacijske parametre isključivo s pomoću uređaja u zrakoplovu. [3]

Zrakoplovna navigacija može se podijeliti na dvije općenite vrste vođenja navigacije odnosno primjene navigacijskih metoda, ako se u razmatranje uzme način prikupljanja informacija izvan zrakoplova radi određivanja točne pozicije, a to su: [4]

1. Vizualna navigacija i
2. Instrumentalna navigacija.

Načelo određivanja pozicije zrakoplova u vizualnoj navigaciji temelji se na vizualizaciji okolnog reljefa, tako da se identificiraju orijentiri u prostoru i na navigacijskoj karti. U instrumentalnoj navigaciji, određivanje pozicije provodi se prikupljanjem i obradom informacija iz navigacijskih sustava na zrakoplovu (inercijski navigacijski sustavi), odnosno prijemom informacija elektromagnetskim valovima iz vanjskog okruženja. Ti elektromagnetski valovi mogu biti emitirani sa zemlje ili iz svemira (sateliti), a tako prikupljene i obrađene informacije prikazuju se na odgovarajućim instrumentima i indikatorima u pilotskoj kabini. Pilot pritom ne treba imati vizualni kontakt s površinom

zemlje, pri čemu ne postoji potreba za određivanjem pozicije zrakoplova pomoću orijentira. U tom slučaju, letenje se odvija prema pravilima instrumentalnog letenja. [4]

Pravila vizualnog letenja propisuju meteorološke minimume pri kojima je moguće primjenjivati vizualnu navigaciju. Ti minimumi, kao i njihova primjena, definirani su prema klasama zračnog prostora i vrsti zadaće ili letjelice. Premda oblaci ograničavaju vidljivost, moguća je provedba letova prema VFR pravilima i iznad slojeva oblaka pod posebno definiranim uvjetima. Provedba noćnih VFR letova zabranjena je, bez obzira na ispunjenje kriterija vizualnih meteoroloških uvjeta (engl. *Visual Meteorological Conditions* ili VMC). Pravila instrumentalnog letenja – IFR, definirana su minimalnim visinama i razinama leta kojima je utvrđeno sigurno nadvisivanje prepreka. Bez obzira na to koji meteorološki uvjeti vladaju u atmosferi, moguće su operacije zrakoplova prema IFR pravilima. Također, tijekom leta moguća je promjena pravila letenja, ovisno o meteorološkim uvjetima. [4]

Međutim, ako dođe do kvara instrumenata i indikatora ili radionavigacijskih uređaja na zemlji, pilot poznavanjem zadnje poznate (referentne) pozicije treba odrediti svoju trenutnu, stvarnu poziciju. Prema podacima o smjeru i brzini leta, koji se očitavaju na instrumentima, treba odrediti vremensko trajanje leta. Piloti su dužni na unaprijed definiranim točkama upisivati stvarna vremena preleta. Tako zadnja točka s upisanim vremenom preleta postaje referentna točka u slučaju otkaza ili kvara navigacijskih instrumenata. [5]

Instrumentalna navigacija sastoji se u određivanju stvarne pozicije zrakoplova u odnosu na radionavigacijska sredstva koja se nalaze na zemlji. Informacije o razmjernom ili apsolutnom odnosu zrakoplova u prostoru i vremenu prikazuju se kvantitativno ili kvalitativno na zrakoplovnim instrumentima u pilotskoj kabini. Pomoću VOR uređaja (engl. *VHF Omnidirectional Radio Range*) koji se nalaze na zemlji određuju se radijali (radiosmjerovi) od stanice koji prema službeno objavljenim navigacijskim kartama za instrumentalno letenje definiraju zračne putove, a NDB uređaji (engl. *Non-Directional Beacon*) daju radijale u odnosu na vlastitu poziciju, što je detaljnije objašnjeno u nastavku ovog rada. [5]

2. 4. Razvoj koncepta navigacije

Riječ navigacija dolazi od latinskih riječi *navis* (brod) i *agare* (ploviti), što govori da početak navigacije kakvu danas poznajemo datira iz pomorstva i pomorske tradicije. Da je tome tako, potvrđuju uobičajeni termini koji se danas koriste u zrakoplovstvu, kao što su: zračna luka, zračna plovidba, zrakoplov, lijeva strana (engl. *port side*), desna strana (engl. *starboard side*) i dr. Za uspješno kretanje od jednoga mjesta do drugoga, ljudima su bile potrebne karte. Pomoću karata mogao se odabrati put kretanja (navigacijski plan u širem smislu te riječi), a time i početni smjer. Udaljenost između polazišta i odredišta na karti predstavljena u stvarnom svijetu, neizravno bi predstavljala trajanje putovanja. Dakle, karta ili zemljovid, predstavljala je smanjeni prikaz Zemljine površine ili njenih pojedinih dijelova na ravnini ili plohi [5]. Opći navigacijski proces sastoji se od planiranja leta, određivanja trenutačne pozicije zrakoplova te vođenja zrakoplova (usmjeravanja kretanja) od početne pozicije do krajnjeg odredišta. [4]

Navigacija se razvijala kao znanost i umijeće kretanja kroz prostor, a izraziti i snažni razvoj zrakoplovne navigacije otpočinje u razdoblju od 1919. do 1930. godine, dok se za vrijeme drugog svjetskog rata i jačeg zamaha znanstveno-tehničke revolucije očituje sve veća primjena automatizacije u vođenju i upravljanju zrakoplovima. [3]

1930-ih godina došlo je do šire upotrebe radionavigacijskih uređaja, pomoću kojih je omogućeno pozicioniranje zrakoplova i njegovo vođenje u prostoru u uvjetima bez vanjske vidljivosti. U početku su to bili giromagnetski instrumenti uz pomoć kojih se mogao precizno održavati pravac leta jer su magnetski kompasi podložni vanjskim utjecajima pa imaju mnoga ograničenja. Prvi takvi navigacijski instrumenti na principu giroskopa bili su indikatori kursa – kursni giroskopi ili girodirekcionali (engl. *directional gyro/heading indicator*). Premda su takvi uređaji olakšavali posao pilota pri vođenju vizualne navigacije, uskoro su bile definirane navigacijske rute prema točno propisanim navigacijskim elementima (visina i kurs leta), koje su omogućavale dolazak na određeni aerodrom. [4]

Uz zemaljska radionavigacijska sredstva, 1940-ih godina pojavili su se zrakoplovni radionavigacijski sustavi koji su omogućavali vođenje navigacije na velikim udaljenostima za potrebe prekoceanskih letova. Rute su bile definirane nizom putnih točaka određenih geografskom širinom i duljinom (ortodroma), pri čemu se održavao stalni pravac leta između

dviju točaka (loksodroma). Ti sustavi temeljili su se na principu mjerenja razlike u vremenu širenja elektromagnetskih valova od parova odašiljača sa zemaljskih radionavigacijskih postaja ili mjerenja faznih razlika na mjestu prijma. Spajanjem točaka čija je razlika udaljenosti od odašiljača ista dobivaju se hiperbole u čijim se žarištima nalaze odašiljačke postaje, pa su takvi sustavi nazvani hiperbolnim navigacijskim sustavima, o kojima je više riječ u nastavku ovog rada. Pronalaženjem odgovarajućih hiperbola od više postaja koje tvore lance moguće je odrediti poziciju na mjestu njihovog sjecišta. Najpoznatiji takav sustav je LORAN (engl. *LOng RAnge Navigation*), koji se u modificiranom obliku upotrebljava i danas (e-LORAN) [4].

Povećanjem komercijalnog zračnog prometa povećao se i broj navigacijskih ruta, pa su te rute određivane pomoću radionavigacijskih uređaja na zemlji koji se nazivaju neusmjereni radiofarovi (engl. *Non-Directional Beacon* ili NDB). Neusmjereni radiofar zapravo je samo jedna polovica radionavigacijskog sustava, i to njegov zemaljski dio [4]. Drugi dio sustava nalazi se u zrakoplovu i naziva se radiokompas (engl. *Automatic Direction Finder* ili ADF), a u nastavku ovog rada objašnjeni su detaljnije.

3. PRINCIP ODREĐIVANJA SMJERA GONIOMETRIRANJEM ODAŠILJAČA

Radionavigacija je jedna od metoda vođenja zrakoplova korištenjem radiouređaja na zrakoplovu i na zemlji. Računska navigacija je osnovna metoda vođenja aviona. Međutim, vođenje zrakoplova u složenim meteorološkim uvjetima, noću, na velikim visinama, na moru i iznad predjela bez orijentira ne može se ni zamisliti bez upotrebe radionavigacijskih sredstava. U proteklim desetljećima razvoja, radionavigacija je dobila niz sustava i uređaja na osnovu kojih su se razvili različiti postupci navigacije. Ovo poglavlje analizira rad radiogoniometra.

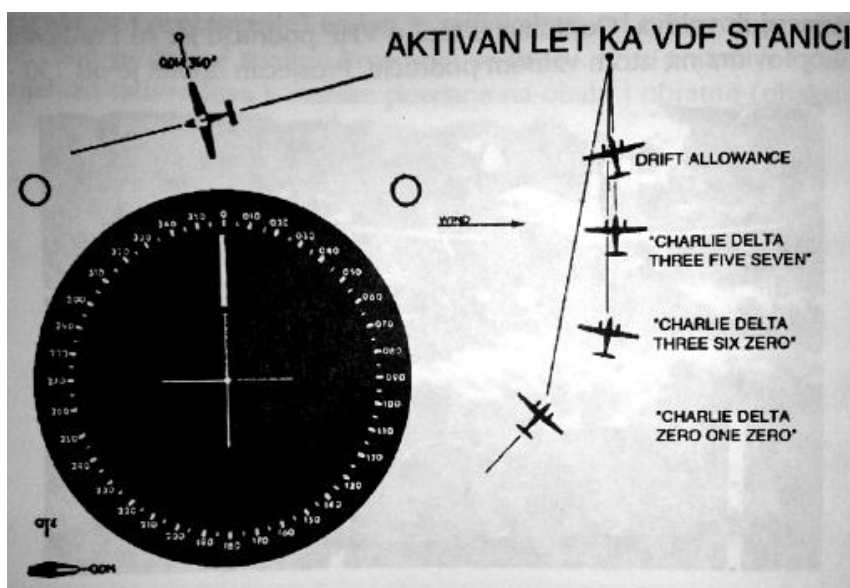
Radiogoniometar – VDF (engl. *VHF Direction Finding*) (RG) je radio uređaj na zemlji s usmjerenim prijemom. Pomoću radiogoniometra se određuje smjer dolaska elektromagnetskih valova. Radiogoniometar radi u VHF području jer su i radiostanice u zrakoplovima na istom valnom području. Prosječan domet je od 150 km – 300 km i ovisi o reljefu zemljišta.

Kako bi sustav funkcionirao, na zrakoplovu se mora nalaziti radiostanica koja radi na istoj frekvenciji kao i radiogoniometar. Princip rada svodi se na to da radiopredajnik na zrakoplovu emitira radiovalove koje goniometar na zemlji prima i automatski određuje smjer u kojem pravcu se zrakoplov nalazi ili iz kojeg pravca dolaze radiovalovi. Ti smjerovi mogu biti magnetni i pravi. Radiofarovi su odašiljačke radiostanice smještene na zemlji, emitiraju radiosignale određene karakteristike, koji se primaju radiogoniometrom ili, zavisno od tipa fara, običnim prijemnikom smještenim na zrakoplovu. Radiogoniometar omogućuje određivanje azimuta na radiofar, a time i stajnica. Uzastopnim određivanjem azimuta na dva ili više radiofara ili na jednog u razmaku vremena dobiva se pozicija zrakoplova [1].

Aktiviranjem radiopredajnika u zrakoplovu na radiogoniometru se dobiju sljedeći podaci, koje kontrolor letenja može priopćiti pilotu:

- magnetski smjer od stanice na zemlji prema zrakoplovu (QDR)
- pravi smjer od stanice na zemlji prema zrakoplovu (QTE)
- magnetski smjer od zrakoplova prema postaji na zemlji, odnosno kurs zrakoplova na postaju (QDM)
- pokazuje trenutak preleta zrakoplova preko stanice radiogoniometra (QFG).

Radiogoniometri koji su trenutno u upotrebi rade automatski. Imaju četiri antene postavljene u glavnim pravcima (N, E, S i W) ili antenski sustav (slika 4).



Slika 4. Antenski sustav radiogoniometra i aktivan let prema VDF stanici

Izvor: Klasnić, Z.: Osnove zrakoplovne navigacije. Znanstveno-stručna literatura za osoblje u zračnom prometu, Zračna luka Zagreb d.o.o., Zagreb, 1998., str. 42

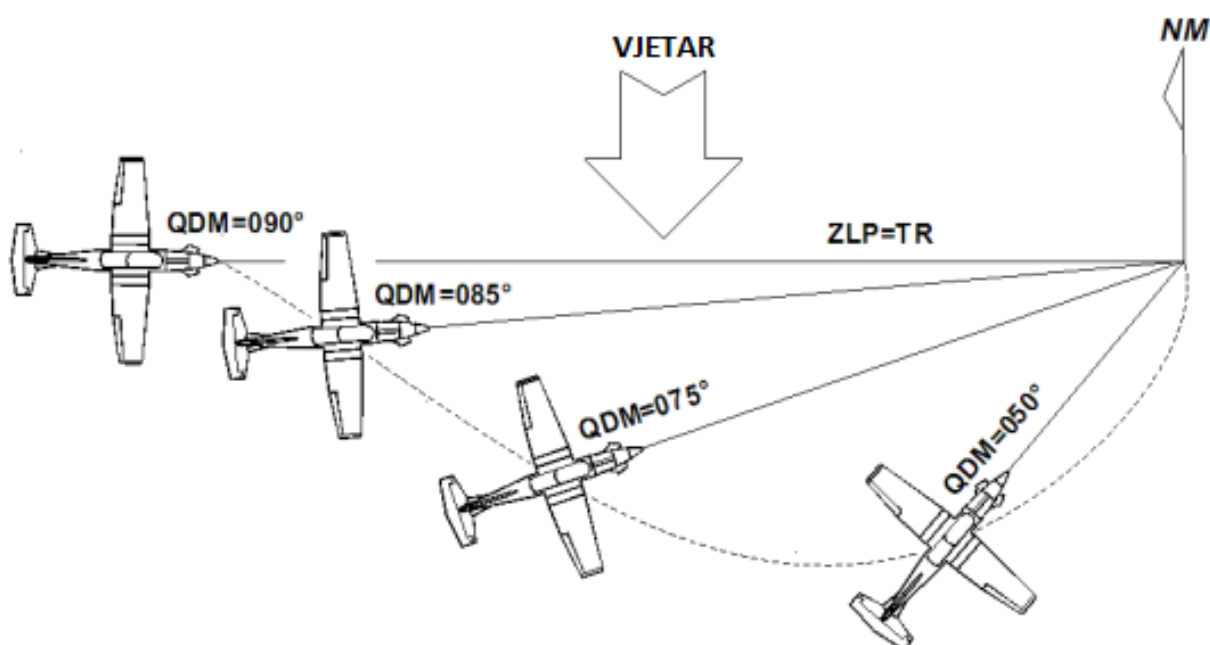
Prikazani sustav ima zadovoljavajuću točnost očitavanja podataka s dopuštenim greškama od $\pm 2^\circ$ do $\pm 5^\circ$, a za rad s radiogoniometrom potrebno je uspostaviti radiovezu između kontrolora letenja i pilota zrakoplova.

Radiogoniometar se danas koristi jedino kada na aerodromima ili u zrakoplovu nije osiguran neki bolji i suvremeniji sustav vođenja. Naime, radiogoniometri su bili prva radionavigacijska sredstva, još iz vremena kada je Marconi počeo eksperimentirati s usmjerenim antenama. Danas se manje koriste zato što su, i po procedurama za rad i po drugim sastavnicama, zastarjeli i zamijenjeni modernijim uređajima. Suvremeniji oblik radiogoniometra je DDF (engl. *Doppler Direction Finding*), koji pored očitovanja smjera može očitati i udaljenost do zrakoplova.

Pomoću goniometra može se letjeti putem dvije metode, odnosno pasivnim i aktivnim prilazom.

Pasivni let izvodi se tako da zrakoplov leti u $MK^2 = QDM$ sve do trenutka prelaska goniometra. Iz primjera (slika 5), vidljivo je da se zbog upliva vjetra QDM, a onda i MK, stalno mijenjaju, i da je let izvršen po krivulji, a ne po ravnoj liniji. Kurs se u takvim primjerima mijenja u ovisnosti od dobivenog QDM, pri čemu se koristi sljedeće pravilo:

- veći QDM od zahtijevanog, veći kurs
- manji QDM od zahtijevanog, manji kurs
- kakav QDM, takav kurs.

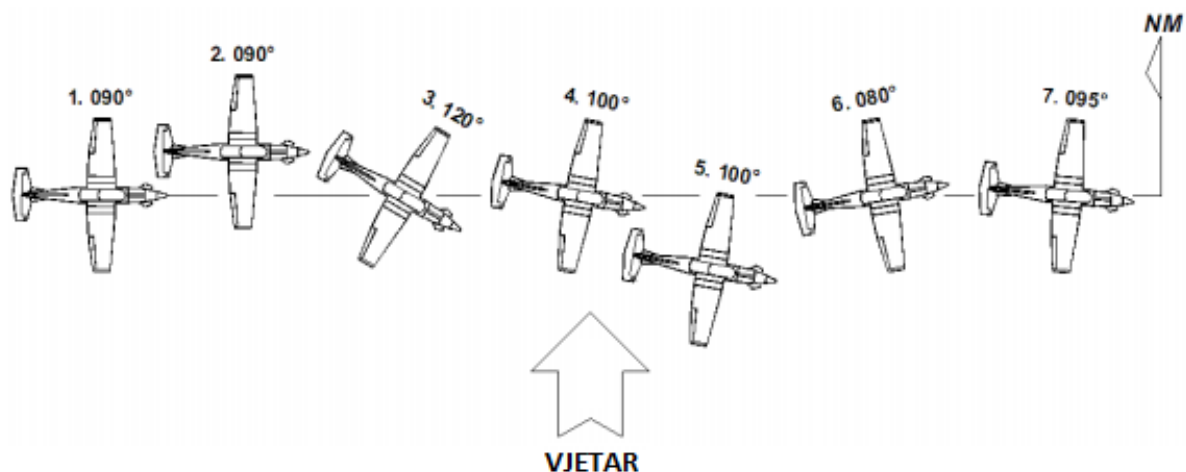


Slika 5. Pasivan dolet

Izvor: Smole, B.: Navigacija, radio navigacija in značilnosti nočnega letenja. Ministrstvo za obrambo, Slovenija, 2011., str. 66

Aktivni dolet na goniometar (slika 6) znači da se zrakoplov vodi po zahtijevanoj liniji tako da ima stalni QDM. Linija leta nije više krivulja nego ravna linija, što omogućava dolazak do cilja najkraćim putem. U ovoj metodi najteže je doći do kuta popravka, s kojim zrakoplov zadržavamo na zahtijevanoj liniji.

² MK - Magnetni kurs.



Slika 6. Aktivni dolet

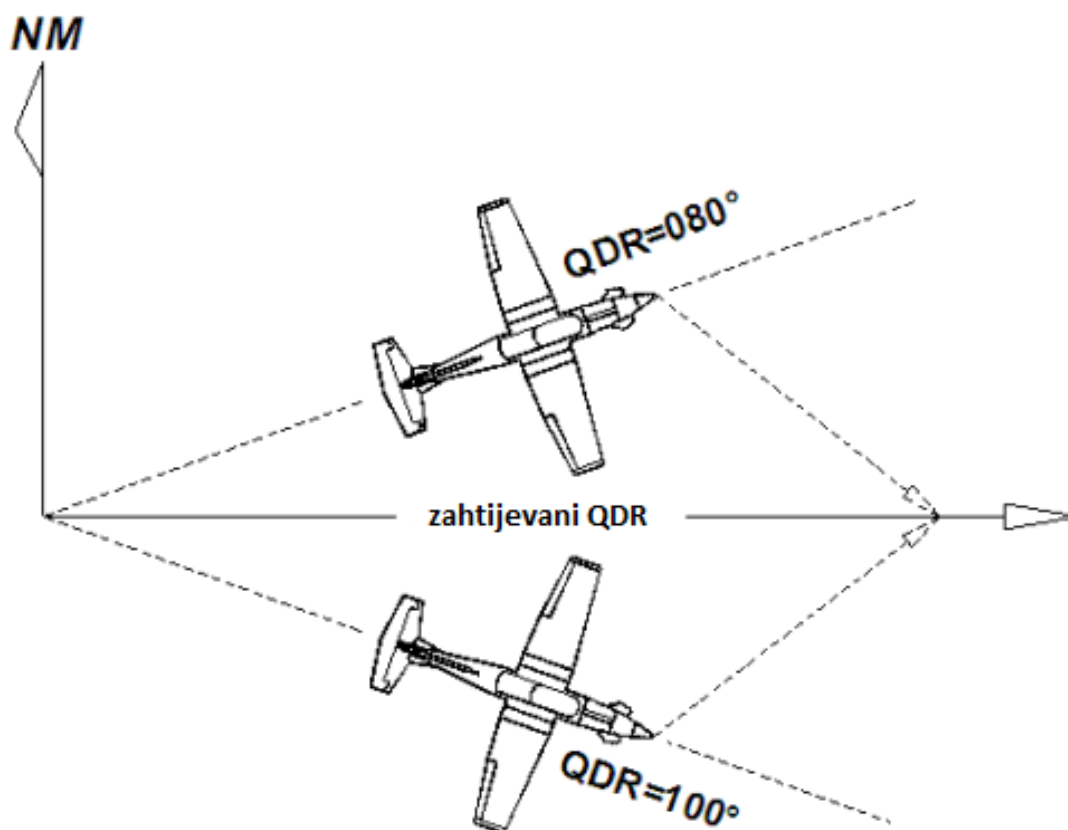
Izvor: Smole, B.: Navigacija, radio navigacija in značilnosti nočnega letenja. Ministrstvo za obrambo, Slovenija, 2011., str. 67

Aktivan dolet, prikazan na gornji sliki, podrazumijeva sljedeće:

1. Zrakoplov leti u kursu 90° , što je istoznačno kao i zahtijevani QDM.
2. Vjetar, koji puše s desne strane, zanosi zrakoplov na lijevo od zahtijevanog QDM.
3. Po pravilu veći QDM, veći kurs pilot vraća zrakoplov na zahtijevani QDM tako da poveća kurs za 030° . Novi MK je 120° .
4. Na zahtijevanom QDM pilot smanjuje MK, koji je 100° .
5. Popravak od 010° je prevelik uz jakost vjetra, zato se zrakoplov nalazi na desnoj strani zahtijevanog QDM.
6. Da pilot ulovi zahtijevani QDM, izabere prethodni kurs, koji je 080° . U njemu inzistira do zahtijevanoga QDM. Novi MK je 095° .

Traženje kuta zanosa, koji omogućuje pilotu letenje po zahtijevanom QDM, traje dok pilot ne odluči točan kut popravka.

Let od goniometra s pomoću QDR smjera lako se izvodi samo aktivnom metodom. U primjeru, na slici 7, ako u trenutku preleta goniometra zrakoplov zauzme MK, koji je jednak QDR, letenje se odvija po zadanom radijalu.



Slika 7. Let od goniometra

Izvor: Smole, B.: Navigacija, radio navigacija in značilnosti nočnega letenja. Ministrstvo za obrambo, Slovenija, 2011., str. 68

U meteorološkim uvjetima bez vjetra, smjer QDR je još uvijek isti s MK. Vjetar zanosi desno od QDR smjera i obratno. Za lakše razumijevanje, postupak se može zapisati u sljedećem obliku:

- QDR veći, kurs manji
- QDR manji, kurs veći.

4. NEUSMJERENI RADIOFAR NDB I SUSTAV ADF U ZRAKOPLOVU

Zrakoplov koji leti pokraj neusmjerenih predajnika u pravilu koristi automatski radiogoniometar za dobivanje povremenog i preciznog očitavanja položaja ili smjera leta, koristeći podatke na navigacijskim kartama. Dobivenim podacima poništava se, ili bar smanjuje, akumulirana pogreška određivanja položaja i smjera leta primjenom inercijske navigacije. Komplementarnost je u tome što je radionavigacija NDB/ADF lokalna, a inercijalna navigacija globalna. U blizini jednog NDB predajnika moguće je precizno određivanje smjera leta, dok je u blizini dva ili više NDB predajnika moguće i određivanje pozicije. Zbog slabljenja signala predajnika u odnosu na šumove u radionavigaciji, te podatke nije moguće koristiti na većim udaljenostima od predajnika [6].

U NDB/ADF kombinaciji, pol je svesmjerni radioodašiljač ili radiofar. Pripadni zrakoplovni prijemnik je automatski radio goniometar. Preciznost određivanja smjera pomoću navigacije NDB/ADF u idealnom je slučaju 4° , a u cjelokupnom predviđenom doseg 10° .

NDB je najjednostavniji odašiljač korišten za zrakoplovnu navigaciju. Neusmjerenost znači da emitira elektromagnetske valove jednakih svojstava u svim smjerovima. Emitirani valovi frekvencija su iz srednjevalnog ili dugovalnog područja, raspona od 190 kHz do 1750 kHz. Područje između 200 kHz i 400 kHz znatno je zastupljenije za rad uređaja NDB od ostatka intervala dostupnih frekvencija. Elektromagnetski valovi navedenih frekvencija reflektiraju se od ionosfere te u principu mogu biti detektirani na udaljenostima kad zbog zakrivljenosti Zemlje nema neprekinute zračne linije između zrakoplova i zemaljske postaje, ali zbog relativno malih snaga prigušenje elektromagnetskih valova u primjeni umanjuje tu mogućnost.

Svaki je NDB predajnik na svijetu jedinstven u smislu da elektromagnetskim valovima odašilje i jedinstvenu kombinaciju od dva ili tri Morseova znaka. NDB predajnici slični su po jedinstvenosti emisije svjetionicima za pomorsku navigaciju. Podaci o pojedinom NDB predajniku dokumentirani su i dostupni pilotima, a sadrže podatke o vremenu emitiranja, operateru, geografskoj dužini i širini, preciznom smjeru kojim se od pozicije iznad predajnike dolazi do aerodroma uz koji je vezan, doseg i drugim podacima.

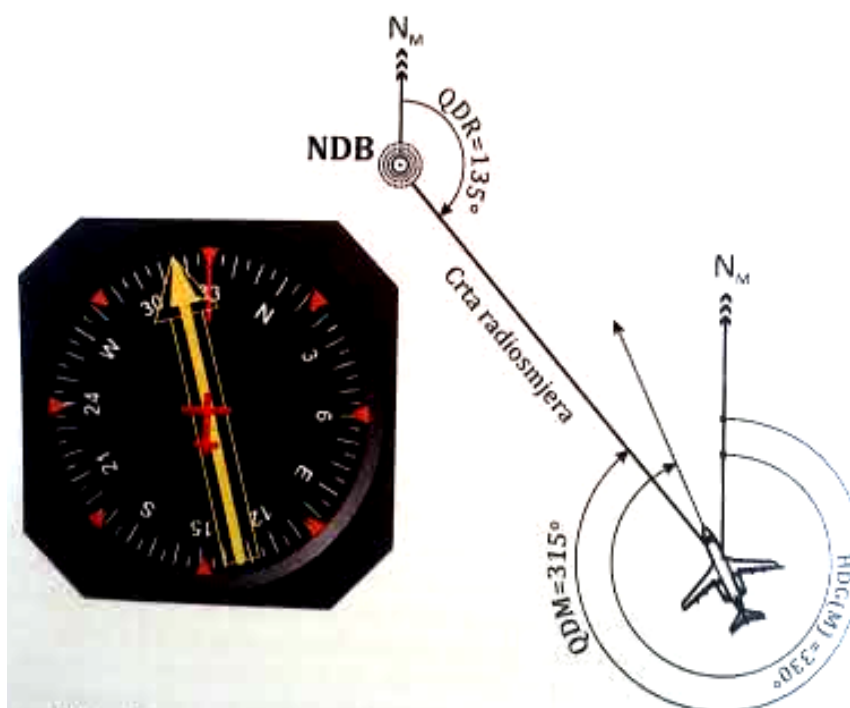
Doseg NDB predajnika usklađen je sa zahtijevanom točnošću navigacije u određenom području. Ako je manji broj odašiljača dostupan u određenom području onda su njihove snage i popratni dosezi signala veći. Na primjer, NDB odašiljači koji se koriste za navigaciju u priobalnom dijelu oceana dometa su oko 150 km ili više. NDB odašiljači postavljeni na područjima kroz koja prolazi više letnih koridora i gdje je zračni promet općenito intenzivniji, imaju manji domet, recimo 65 km. NDB odašiljači manjih snaga koriste se relativno blizu aerodroma i uobičajeno se nazivaju lokatori. Snaga NDB odašiljača je u rasponu od 10 W do 2 000 W. Doseg je kombinacija snage, frekvencije i trenutnih atmosferskih uvjeta budući da o njima ovisi koeficijent prigušenja elektromagnetskih valova u atmosferi.

Elektromagnetski val koji nosi jedinstvenu kombinaciju Morseovih znakova je identifikacijski val, kraće ident. Ident je potrebno pratiti, periodički provjeravati, a zrakoplovni ga prijemnik (ADF) uobičajeno emitira kao zvuk. Osim identifikacijskog niza, NDB odašiljač može emitirati i glasovne poruke, najčešće kodirane za automatski informacijski sustav završne faze leta (engl. *Automatic Terminal Information System – ATIS*), kao i poruke drugih zrakoplovnih informacijskih sustava.

Signal kojeg emitira NDB odašiljač, u zrakoplovu bilježi automatski radiogoniometar. To je instrument kojemu je osjetnik – antenski kompleks, prijenosni i vezni elementi – vodiči kojima se naponski impuls prenosi iz antenskog kompleksa do indikatora na instrumentalnoj ploči. Indikator omogućava podešavanje frekvencije kako bi se bilježio signal samo iz određenog NDB odašiljača (u skladu s podacima iz dokumentacije) i dodatno provjerio slušanjem signala ident. Antenski kompleks čine dvije antene u istom kućištu. Jedna antena djeluje kao antena oblika petlje, a druga je osjetna antena. Antena oblika petlje služi za određivanje smjera na kojemu se nalazi NDB odašiljač. No, ne može se odrediti približava li se zrakoplov NDB odašiljaču ili se udaljava od njega. Osjetna antena omogućuje razlučivanje između te dvije situacije. U suvremenim uređajima antena oblika petlje je stacionarna u odnosu na zrakoplov i direkcijski osjetljiva. U ranijim izvedbama ta je antena stvarno zakretana, ručno ili elektromehanički.

Indikator automatskog radiogoniometra sastoji se od kazaljke i ruže smjerova. Kazaljka pokazuje smjer iz kojega dolazi signal kojeg emitira NDB odašiljač. Ruža smjerova može biti nepomična, ili pomična. Nepomična ruža smjerova omogućuje očitavanje kuta između smjera leta zrakoplova i smjera prema NDB odašiljaču. Takvi ADF instrumenti uobičajeno se

nazivaju indikatorima relativnog smjera (engl. *Radio Bearing Indicator* ili RBI). Pomična ruža smjerova predstavlja ružu kompasa i pokazuje smjer magnetskog sjevera, a omogućuje određivanje kutova između smjera prema NDB odašiljaču, smjeru magnetskog sjevera ili pravca leta. Pritom se ruža kompasa može pomicati ručno ili automatski. ADF instrumentu, potrebno je ručno pomicati ružu prilikom svake promjene smjera leta, npr. usklađivanjem orijentacije ruže s orijentacijom pokazivača smjera (kojeg se također treba usklađivati s pokazivanjem npr. magnetskog kompasa svakih 10-15 min). Naposljetku, ADF instrumenti kod kojih se ruža automatski zakreće nazivaju se radiomagnetski indikatori (engl. *Radio Magnetic Indicator* ili RMI) (slika 8). Automatski zakretana ruža stalno se postavlja tako da joj referentni smjer odgovara pravcu prema sjeveru. Referentni instrument pri automatski zakretanoj ruži je pokazivač smjera. ADF Instrumenti mogu sadržavati iglu trokutastog oblika, pokraj indikatora (tzv. *anunciator*), koja oscilira dok traje automatsko usklađivanje ruže ADF instrumenta i referentnog instrumenta. Pri redovitom radu, dakle, igla redovito oscilira.



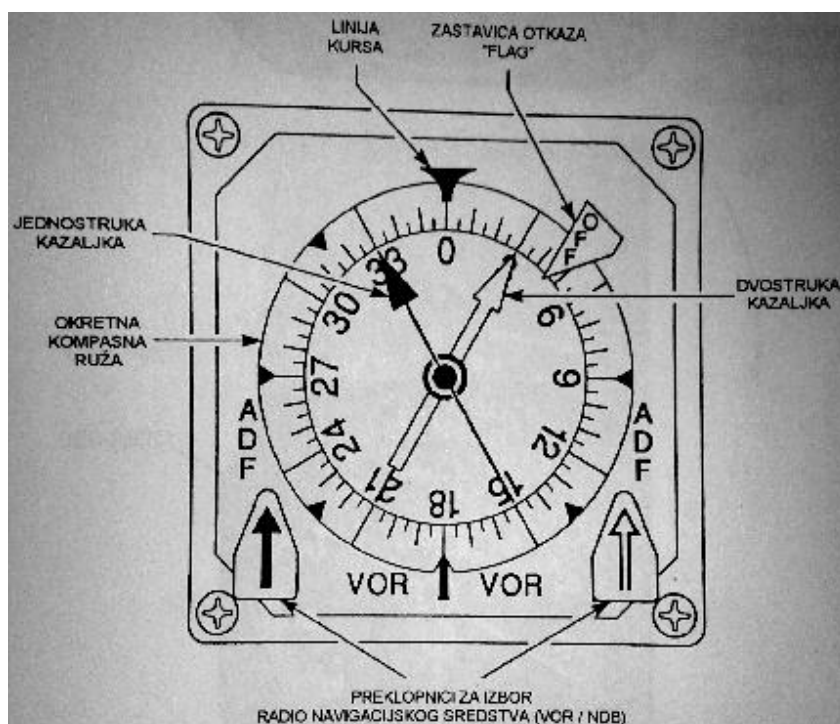
Slika 8. Radio magnetski indikator (RMI) i pozicija zrakoplova u odnosu na NDB

Izvor: Novak, D.: *Zrakoplovna prostorna navigacija*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015., str. 6

Na sljedećoj slici (slici 9) prikazani su dijelovi radio magnetskog indikatora (RMI), a njegove karakteristike su: [2]

- predstavlja kombinaciju indikatora giromagnetskoga kompasa i indikatora radiokompasa (ADF)

- prema oznaci (indeksu) linije kursa zrakoplova pokazuje magnetski smjer, a prema vrhu kazaljke magnetski radiosmjer radionavigacijskog sredstva
- rep kazaljke služi za prikazivanje obrnutoga radiosmjera
- oduzimanjem (odbrojavanjem stupnjeva) magnetskoga kursa od magnetskoga radiokursa dobiva se bočni kut
- ljestvica instrumenta je vertikalna kompasna ruža s podjelom 2° ili 5° po manjem podjeljku, 10° po većem podjeljku, brojčanim oznakama svakih 30° , te uobičajeno slovnim oznakama glavnih strana svijeta
- indikator je izveden s dvije kazaljke:
 - kazaljka 1 je tanja (jednostruka) i najčešće se koristi za indiciranje radiosmjera sredstva VOR
 - kazaljka 2 deblja (dvostruka) i najčešće se koristi za indiciranje radiosmjera sredstva NDB.



Slika 9. Dijelovi radio magnetskog indikatora (RMI)

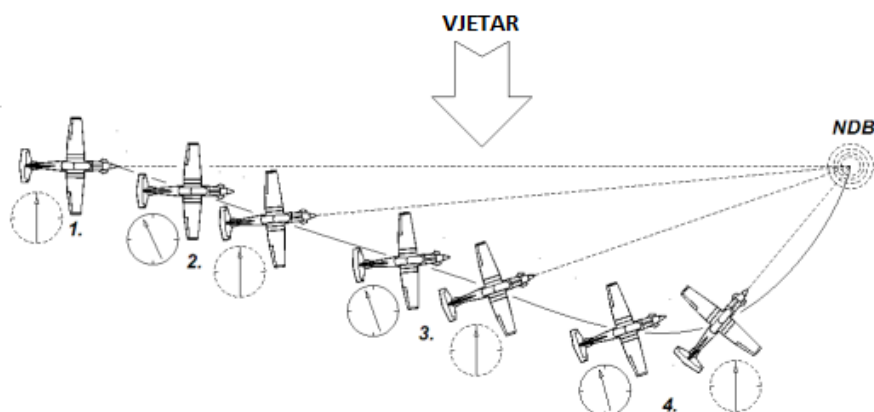
Izvor: Bucak, T.: Zrakoplovni instrumenti 2. Priručnik, prvo izdanje, Zagreb. 1988., str. 45

Prilikom prelaska iznad NDB odašiljača, kazaljka ADF instrumenta zakreće se naglo za 180° . Neovisno o tome je li ruža smjerova pomična ili nepomična u odnosu na kućište instrumenta, gornji rub instrumenta odgovara nosu zrakoplova, a donji rub repu zrakoplova.

Nekoliko je općih napomena ovdje primjereno. Promjena načina korištenja antene oblika petlje primjer je opće smjernice razvoja zrakoplovnih instrumenata – smjernice o uklanjanju pomičnih dijelova zrakoplovnih instrumenata. Dodatno, to omogućuje minijaturizaciju, u skladu sa smjernicom o smanjivanju utroška mase i energije. Zatim, s mjeriteljskog stajališta izrazito je pogodno traženi smjer vezati na signal „nule“.

Radiokompas ADF je najstariji radionavigacijski uređaj koji se koristi na zrakoplovima. To je prijemnik s antenskim sustavom koji se automatski postavlja u položaj za usmjereni prijem, odnosno automatski određuje pravac dolazećih elektromagnetskih valova. Osnovna razlika između radiokompasa i običnog kompasa je u tome što se igla magnetskog kompasa uvijek okreće prema zemaljskom magnetskom polu, a igla radiokompasa prema izvoru radiosignala. Kako je već prethodno rečeno, izvori radiosignala mogu biti radiofarovi (NDB) ili radiodifuzne stanice [7]. Na današnjim, suvremenim, zrakoplovima s težnjom da se više radionavigacijskih uređaja uklopi u jedan, obično je radiokompas ugrađen zajedno s uređajima VOR, DME i ILS, o čemu je više riječ u sljedećem poglavlju ovog rada.

Kazaljka radiokompasa, koji je podešen prema određenom radionavigacijskom sredstvu NDB, pokazuje u kojem pravcu se nalazi to sredstvo, bez obzira na kurs i položaj zrakoplova u zraku. Slika 10 prikazuje pasivni let zrakoplova prema NDB odašiljaču.

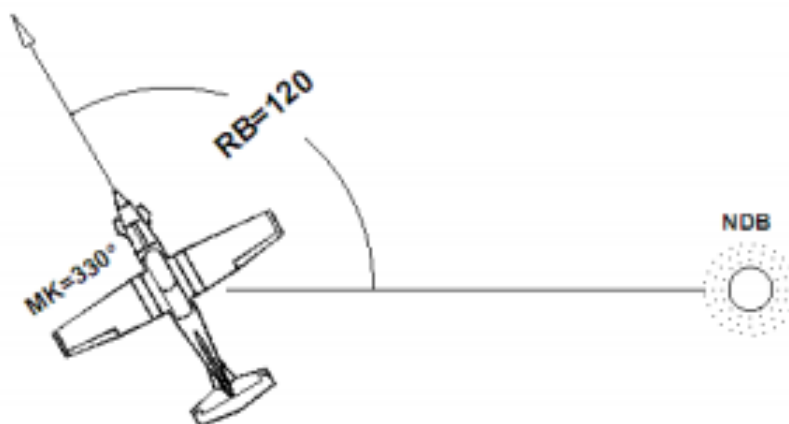


Slika 10. Pasivan dolet prema NDB odašiljaču

Izvor: Smole, B.: Navigacija, radio navigacija in značilnosti nočnega letenja. Ministrstvo za obrambo, Slovenija, 2011., str. 72

Kako prikazuje slika, za let do NDB odašiljača najprije je potrebno na radiokompasu namjestiti frekvenciju željenog odašiljača i na kontroloru namjestiti vrstu rada instrumenta ADF. Indikator radiokompasa pokazat će bočni kut NDB odašiljača (slika 11). Pilot tada usmjerava zrakoplov u smjeru prema indikatoru, prateći smjer u kojem se kazaljka otklonila.

To traje toliko dugo dok se kazaljka ne poravna s uzdužnom osi letenja i onda se zadržava u tom položaju. Zbog komponente bočnog vjeta dolazi do zanosa zbog čega pilot mora mijenjati kurs, kako bi lako održao ADF kazaljku uzdužnu sa smjerom zrakoplova. U ovakvom primjeru do NDB odašiljača se dolazi po krivulji, a ne ravnoj liniji, koja se naziva i pasja linija, čija se zakrivljenost povećava s približavanjem postaji [8].

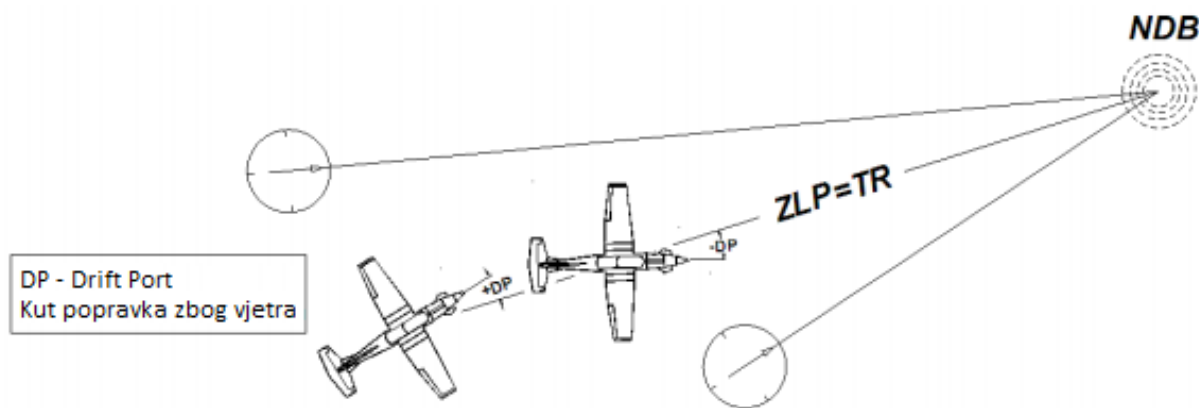


Slika 11. Bočni kut

Izvor: Smole, B.: Navigacija, radio navigacija in značilnosti nočnega letenja. Ministrstvo za obrambo, Slovenija, 2011., str. 71

Indikator radiokompasa, koji ima set određenih frekvencija NDB odašiljača, pokazuje smjer u kojem se nalazi NDB odašiljač, bez obzira u kojem kursu leti zrakoplov. Između uzdužnih osi zrakoplova u suprotnom smjeru od NDB odašiljača, dobije se bočni kut koji se u literaturi najčešće označava kao RB. Mjeri se od 000° do 360° u smjeru kazaljke na satu. U osnovi, podatak o bočnom kutu govori samo u kojem smjeru se nalazi NDB odašiljač, a ne gdje se nalazi zrakoplov u odnosu na NDB odašiljač [8].

U slučaju kada je komponenta vjeta koja djeluje na zrakoplov veća, posljedično dolazi do većeg zanosa, što znači da će se zrakoplov udaljavati od svoje zadane linije leta. Kako bi se to spriječilo, koristi se aktivan dolet na NDB odašiljač (slika 12). To se radi tako da se zauzme kurs u kojem je uzet u obzir popravak zbog vjeta, što se može učiniti i na početku leta, ako je poznat smjer i brzina vjeta. U slučaju da je popravak kursa dobar, kazaljka na instrumentu ADF prilikom leta do NDB odašiljača stalno pokazuje jednak bočni kut (RB), odnosno, kazaljka je otklonjena od nule za jednak kut, ali u suprotnu stranu od popravka [8].



Slika 12. Prikaz popravka za aktivni dolet na NDB

Izvor: Smole, B.: Navigacija, radio navigacija in značilnosti nočnega letenja. Ministrstvo za obrambo, Slovenija, 2011., str. 73

Slično se događa i u letu od NDB odašiljača. U slučaju da se kurs popravi u desno, ADF kazaljka se otkloni u lijevo prema NDB odašiljaču i obratno. Većinom ne postoje podaci o vjetru i u tom slučaju se na zadanu liniju leta vraća tako da se zauzme MK, koji je jednak zadanom magnetnom putnom kursu (ZMPK).

Pomoću ADF radiokompasa mogu se rješavati sljedeći navigacijski problemi: [7]

- pasivan let prema radiostanici (engl. *Homing*)
- aktivan let prema i od radiostanice (engl. *Tracking inbound* i *Tracking outbound*)
- izlazak na zadani QDM (engl. *Interception inbound*) i QDR (engl. *Interception outbound*)
- mjerenje udaljenosti i vremena leta do radiostanice
- određivanje položaja
- letenje u krugu čekanja (engl. *Holding*).

5. PRINCIP RADA SUSTAVA VOR I NJEGOVIH IZVEDENICA

Radionavigacijske rute u komercijalnom zrakoplovstvu danas su poznate kao zračni putovi (engl. *airways*). Točke koje definiraju zračne putove jesu visokofrekvencijski (VHF) svesmjerni radiofarovi (engl. VHF *Omnidirectional Radio Range* ili VOR). Isto kao i kod NDB/ADF-a, sustav VOR sastoji se od odašiljačke postaje na zemlji i prijemnika s indikatorom u zrakoplovu.

Uređaj VOR moderno je radionavigacijsko sredstvo s vrlo širokom primjenom u zrakoplovstvu. Razlog tomu je što navigacija pomoću sustava VOR ima višestruke prednosti u odnosu na ostala radionavigacijska sredstva koja se spominju u ovom radu: rukovanje uređajem u zrakoplovu je jednostavnije, podešavanje prijemnika i prepoznavanje stanica je brže i lakše, smetnje u prijemu elektromagnetskih valova su minimalne, a zbog prirode elektromagnetskih valova VHF područja navigacijski podaci su precizniji i potpuniji. Klasični VOR uređaj sastoji se od: [7]

- indeksa za očitavanje radijala
- indeksa VOR – kursa
- skale radijala koja se pokreće pomoću komande za izbor radijala
- kazaljke skretanja
- gumba za biranje radijala (CRS – Course selector)
- razmjera bočnog skretanja
- zastavice s natpisom OFF, TO ili FROM (crvena zastavica s natpisom OFF znači da je uređaj isključen, neispravan ili loše podešen, oznaka TO označava let prema VOR-u, a FROM od VOR uređaja).

Radiodaljinomjer vrlo visoke frekvencije je kratkodosežni terestrički, polarni, radionavigacijski sustav. Frekvencije elektromagnetskih valova koje koristi sustav VOR su od 108,00 MHz do 117,95 MHz, podijeljene u pojaseve širine 50 kHz. Pritom, raspon od 108,00 MHz do 111,95 MHz koristi i sustav za instrumentalno slijetanje tako da je svaki drugi dostupni frekvencijski pojas rezerviran za VOR. Terminalni VOR je izvedba sustava VOR koji se koristi pri slijetanju, a navedene frekvencije koje se izmjenjuju s frekvencijama sustava za instrumentalno slijetanje upravo pripadaju terminalnom sustavu VOR.

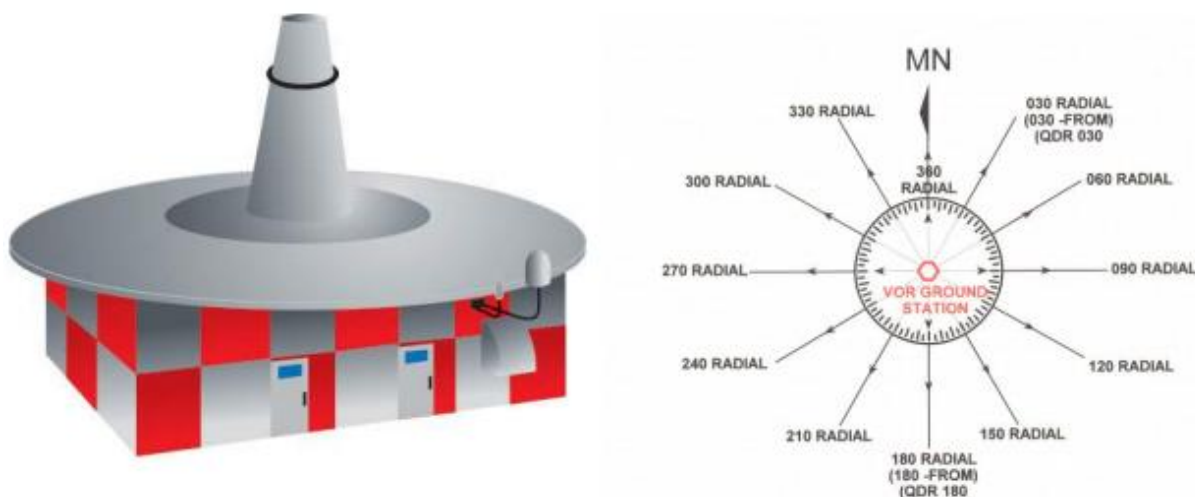
Visokofrekvencijsko područje odabrano za sustav VOR karakterizira relativna propusnost u atmosferi i otpornost na atmosferske utjecaje.

Sustav VOR i kombinacija NDB/ADF primjereno se nadopunjavaju zbog različitih radnih frekvencija. Sustav VOR koristi više frekvencije od kombinacije NDB/ADF. Zbog toga je otporniji na električne i atmosferski uzrokovane smetnje, a primjena je moguća pri neprekinutoj zračnoj liniji između zrakoplova i zemaljske postaje. Sa stajališta zrakoplova sustav je pasivni, dakle zrakoplovni instrument VOR samo prima signale zemaljske postaje. U primjeni, često se zajedno koriste sustav VOR i radiodaljinomjer.

VOR uređaj koristi se za: [7]

- orijentaciju u odnosu na stanicu VOR i određivanje radijala na kojem se zrakoplov nalazi
- let prema i od stanice VOR
- izlazak na zadani radijal
- određivanje položaja
- mjerenje udaljenosti, odnosno vremena leta do stanice VOR.

Zemaljska postaja VOR-a sastavljena je od odašiljača sa sustavom antena, od kojih je jedna antena fiksna, a druga rotirajuća, odnosno s rotirajućim dijagramom zračenja. Svaka antena odašilje signal s određenim faznim kašnjenjem, koje je za svaki smjer različito. Smjer od VOR odašiljača se naziva radijal (slika 13). VOR odašiljač istovremeno odašilje različite signale, koji pomažu pri identifikaciji izabranoga sredstva. Ime izabranog VOR odašiljača proslijeđeno je preko različitog signala u Morseovoj abecedi. [8]



Slika 13. Primjer zemaljske postaje VOR u radijalima

Izvor: Smole, B.: Navigacija, radio navigacija in značilnosti nočnega letenja. Ministrstvo za obrambo, Slovenija, 2011., str. 80

Domet VOR odašiljača ovisi o više faktora od kojih je jedan i izlazna snaga, pa s obzirom na to poznamo tri skupine: [8]

- high H: očekivana visina upotrebe do 45.000 FT u dometu do 130 NM, a iznad 45.000 FT domet se smanji do 100 NM
- low L: očekivana visina upotrebe do 18.000 FT u dometu do 40 NM
- terminal T: očekivana visina upotrebe do 12.000 FT u dometu do 25 NM.

Za razliku od frekvencije koja upravlja NDB-om, VHF frekvencije se ne prilagođavaju zemlji, što znači da pri radu na visokim frekvencijama signal ne smije naletjeti na barijeru, koja je između odašiljača i prijemnika. To znači da domet VOR odašiljača ovisi također i o visini leta, nadmorskoj visini VOR odašiljača i njegovog geografskog položaja. Svaki VOR ima i zaštićenu visinu u dometu u kojoj nije u interferenciji s drugim sredstvima. Iznad te visine je moguća interferencija s drugim VOR odašiljačima koji se nalaze u blizini [8].

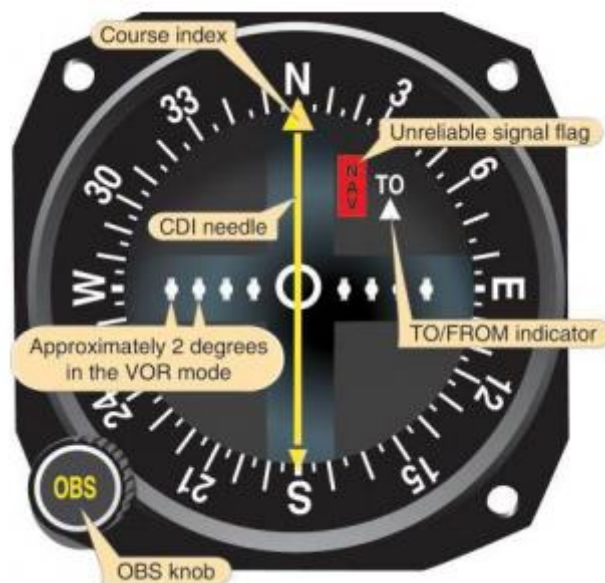
Naprava VOR-a koja je smještena u zrakoplovu sastoji se od četiri glavne sklopke: radijski spremnik, antena, kontrolni dio i indikator. Kontrolni dio i indikator su najvažniji pri samoj upotrebi sustava navigacije. Obzirom na to, postoje različite kontrolne ploče i indikatori, a danas se većinom koristi kontrolna ploča prikazana na slici 14 [8].



Slika 14. Prikaz kontrolne ploče u suvremenom zrakoplovu
 Izvor: Smole, B.: Navigacija, radio navigacija in značilnosti nočnega letenja. Ministrstvo za obrambo, Slovenija, 2011., str. 80

Značajni predstavnik VOR uređaja u zrakoplovu je CDI indikator (engl. *Course Deviation Indicator*) (slika 15), koji se sastoji od sljedećih elemenata: [8]

- indeks kursa pomoću kojeg se očitava radijal (QDR)
- indeks VOR kursa ili QDM (radijal $\pm 180^\circ$)
- okretna skala radijala koja se pokreće pomoću OBS tipke
- CDI igla, koja govori za koliko stupnjeva je odstupanje od zadanog radijala lijevo i desno
- OBS tipka s kojom se nastavlja željeni radijal
- skala bočnog odstupanja.



Slika 15. CDI indikator

Izvor: Smole, B.: *Navigacija, radio navigacija in značilnosti noćnega letenja*. Ministrstvo za obrambo, Slovenija, 2011., str. 82

U daljnjem opisu polazi se od tri cjeline: VOR odašiljač na tlu, emitirani elektromagnetski val i VOR prijemnik u zrakoplovu.

VOR odašiljač, zemaljska postaja sustava VOR, sastoji se od nekoliko napajanih antena, upravljačke jedinice te pomoćnih cjelina poput baterija kao izvora rezervnog napajanja. VOR odašiljač emitira tri vrste signala: identifikacijski signal, po potrebi glasovne poruke i navigacijski signal. Identifikacijski signal i glasovne poruke emitirani su omnidirekcijskim radiovalom (uobičajenog naziva engl. *master wave*).

Antene čine četiri usmjerene antene koje su izvedene kao Alfordove petlje. Njihovo napajanje osigurava emitiranje i omnidirekcijskog i usmjerenog signala. Ako su sve antene napajane izmjeničnim strujama iste faze emitiraju omnidirekcijski signal. Ako su antene napajane izmjeničnim strujama među kojima je stalna fazna razlika, dobiva se prostorno ovisna raspodjela amplitude. Fazna razlika određena je tako da se postigne predviđena prostorna raspodjela emitiranog elektromagnetnog vala. U današnje vrijeme sve su antene nepomične, ali određenim redoslijedom napajanja postignut je učinak kao da se usmjereni elektromagnetski val emitira iz jedne rotirajuće antene. Elektromagnetski valovi koje antene emitiraju miješaju se u prostoru kroz koji prolaze. Jednom kad su emitirani, omnidirekcijski i usmjereni elektromagnetski valovi se kroz prostor šire kao jedinstveni elektromagnetski val. Iako je nastao miješanjem dva vala, jedinstveni elektromagnetski val i dalje sadrži informaciju

o kutu koja se može dobiti pomoću dvije demodulacije u zrakoplovnom VOR prijemniku. Prostorna ovisnost amplitude vala u jednom trenutku opisana je krivuljom oblika puža (engl. *limacon*), a u posebnom slučaju krivuljom kardiodom. U polarnom dijagramu udaljenost točke na kardiodi od pola proporcionalna je amplitudi vala u toj točki. Budući da kardioda nigdje ne dolazi do pola, slijedi kako je amplituda u svakoj točki različita od nule, ali promjenjiva. U daljnjem tekstu bit će korištena samo osnovna svojstva prostorne i vremenske raspodjele zračenja antene u dalekom polju, bez navođenja potankosti geometrije i vremenske ovisnosti pobude antene.

Identifikacijski signal je niz Morseovih znakova koji na frekvenciji 1020 Hz moduliraju omnidirekcijski signal tehnikom moduliranog kontinuiranog vala (engl. *Modulated Continuous Wave* ili MCW). Svaki VOR odašiljač označen je jedinstvenom kombinacijom tri Morseova znaka koji se emitiraju svakih 6 sekundi. Identifikacija VOR odašiljača može biti emitirana kao glasovni niz koji se emitira svakih 15 sekundi. Neke zemaljske postaje emitiraju i poruke sustava ATIS. Ako zemaljska postaja emitira istovremeno i za sustav VOR i za radiodoljinomjer riječ je o kombinaciji VOR/DME, u kojoj je VOR/DME pozicija zrakoplova presjecište pravca prema postaji i kružnice s centrom u postaji, a na kojoj je zrakoplov.

Navigacijski signal je signal složene strukture, koja je postavljena tako da se s dostatnom pouzdanosti više zrakoplova istovremeno može služiti sustavom VOR. Navigacijski signal sastavljen je od tri komponente različitih frekvencija, faza i amplituda: referentni signal, signal podnosioc i signal nosioc. Referentni signal je nazivne frekvencije 30 Hz. Faza tog signala pri emitiranju linearno raste unutar jednog perioda rotiranja. Već bi emitiranje tog signala omogućilo polarnu navigaciju. Međutim, opisani signal se dodatno oblikuje zbog pouzdanijeg rada sustava VOR u svim atmosferskim uvjetima, uključujući i one koji su nepovoljni po prostiranje elektromagnetskih valova, za više istovremenih korisnika.

Referentni signal dodaje se signalu podnosioca i to tako da referentni signal frekvencijski modulira podnosioc. Podnosioc je stalne amplitude i nazivne frekvencije 9 960 Hz. Ako je iznos nemoduliranog podnosioca, y_m , u trenutku t dan izrazom:

$$y_m(t) = A_m \cos(2\pi f_n t), \quad (5.1)$$

uz $f_n = 9\,960$ Hz onda je iznos podnosioca moduliranog referentnim signalom, y_m , u trenutku t dan izrazom:

$$y_m(t) = A_m \cos[2\pi f(t)t], \quad (5.2)$$

pri čemu je $f(t)$ modulirana frekvencija za koju vrijedi:

$$f(t) = f_n + f_A \cos(2\pi f_r t), \quad (5.3)$$

gdje je $f_A = 480$ Hz amplituda moduliranja frekvencije, a $f_r = 30$ Hz frekvencija modulirajućeg, referentnog signala.

Kako bi se signali različitih VOR-predajnika razlikovali, podnosioc se pridodaje signalu nosiocu. Nemodulirani nosioc je signal stalne amplitude i stalne frekvencije u VHF području. Podnosioc amplitudno modulira nosioc. Signal moduliranog nosioca dan je izrazom:

$$y_c(t) = [A_c + y_m(t)] \cos(2\pi f_c t), \quad (5.4)$$

y_m	amplituda nemoduliranog podnosioca
A_m	stalna amplituda
f_n	nazivna frekvencija
f_A	amplituda moduliranja frekvencije
f_r	frekvencija referentnog signala
y_c	signal moduliranog nosioca.

Uočimo, signali nosioci različiti su za svaki VOR odašiljač, dok su signalni podnosioci jednaki za sve VOR odašiljače.

Zaključno, postoje tri ekvivalentna načina opisa prostiranja elektromagnetnog vala iz VOR odašiljača:

1. jedinstveni elektromagnetski val kojemu je prostorno-vremenska raspodjela amplituda opisana rotirajućom kardiodom
2. jedan omnidirekcijski val i jedan rotirajući val koji se istovremeno šire istim prostorom, te
3. tri vala od kojih je jedan nesmetani val nosioc, a druga dva predstavljaju komponente više odnosno niže frekvencije, a sva tri vala šire se istovremeno istim prostorom.

VOR prijemnik, nakon izdvajanja vala nosioca, preostali val demodulira kako amplitudno tako i frekvencijski. Usporedba demoduliranih komponenti obavlja se prema fazi, a rezultat je fazna razlika između njih koja se pretvara u kutnu veličinu, radijal.

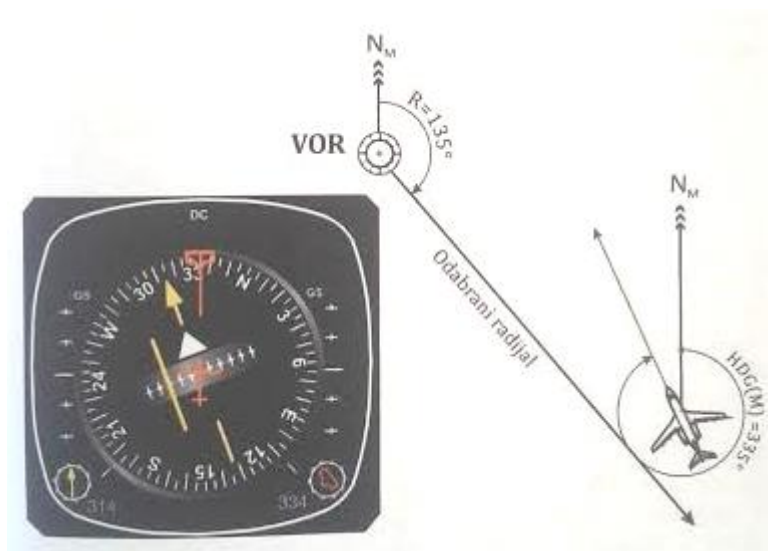
U prethodnom opisu spominju se samo signali koje emitira odašiljač. Generirani su u elektroničkom sklopu odašiljača te treba precizirati oblik emitiranog elektromagnetnog vala u prostoru. Emitirani elektromagnetski val je usmjereni i rotira frekvencijom 30 Hz. Prilikom analize signala koje prima zrakoplovni VOR prijemnik u pravilu se apstrahira utjecaj vala nosioca te se izdvaja i detaljno analizira signal podnosioca. Prilikom emitiranja, podnosioc je moduliran frekvencijski, a ne amplitudno. Međutim, zbog rotiranja antene VOR odašiljača, zrakoplovni VOR prijemnik registrira amplitudno modulirani signal.

Budući da su frekvencije rotiranja i emitiranja jednakog iznosa (30 Hz), dolazi do toga da, unutar jednog perioda, iznos faze u lučnoj mjeri (tj. stupnjevima) odgovara kutu što ga spojnica VOR odašiljača i zrakoplova zatvara sa smjerom magnetskog sjevera. U trenutku emitiranja referentnog signala prema sjeveru faza emitiranog signala je jednaka 0° , a 270° u trenutku emitiranja prema zapadu i sl. No, sa stajališta prijemnika dolazi do stalne fazne razlike između demodulacijom određenih komponenti registriranog signala, jedne koja je amplitudno i druge koja je frekvencijski modulirana. Fazna razlika se izjednačava za demodulirane komponente frekvencije 30 Hz. Demodulacije se provode u zrakoplovnom VOR prijemniku. Sustav VOR informaciju o kutu zrakoplova u odnosu na polarnu os veže za faznu razliku emitiranih elektromagnetskih valova, a ne za vremenski interval. To je zbog toga što je u počecima primjene 30 Hz ostavljalo prekratko vrijeme za precizno određivanje kuta na temelju mjerenja vremena.

Svi smjerovi određeni pomoću sustava VOR određuju se u pravilu u odnosu na magnetski sjever (pa je sjever u prethodnoj rečenici upravo magnetski sjever). Jedna od veličina koju zrakoplov dobiva pomoću sustava VOR je radijal. Radijal je kut s vrhom u zrakoplovu kojemu jedan krak leži na spojnici zrakoplov-sjever, a drugi na spojnici zrakoplov-VOR odašiljač. Radijal je neovisan o smjeru leta i smjeru uzdužne osi zrakoplova. Zato je za određivanje kuta, koji u odnosu na smjer leta zrakoplova zatvara spojnica prema VOR odašiljaču, potreban i podatak o smjeru leta zrakoplova.

Indikatore sustava VOR može se kombinirati i s drugim radionavigacijskim sustavima. Razvijene izvedbe takvog pristupa su indikator horizontalne situacije (engl. *Horizontal*

Situation Indicator ili HSI) ili elektronički sustav letnih instrumenata (engl. *Electronic Flight Instrument System* ili EFIS). Navigacijski instrument HSI dobiva se kad se na istoj podlozi objedine pokaznici zrakoplovnog sustava VOR i magnetomjernog kompasa. Indikator u zrakoplovu ima nekoliko različitih izvedbi, ali je najčešća HSI. Indikator HSI i njegovi elementi, kao i pozicija zrakoplova u odnosu na poziciju VOR postaje prikazani su na slici 16.



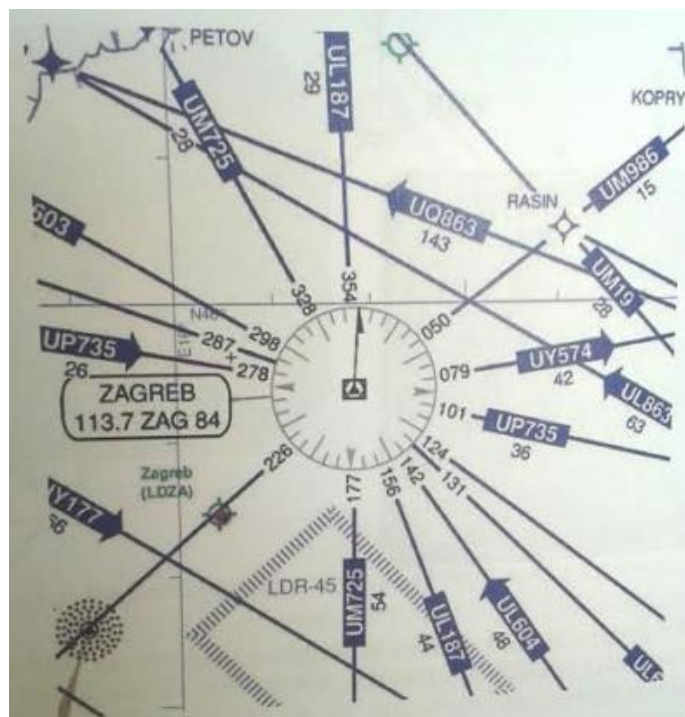
Slika 16. Indikator HSI i pozicija zrakoplova u odnosu na VOR postaju

Izvor: Novak, D.: *Zrakoplovna prostorna navigacija*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015., str. 7

Putanja leta je projekcija putanje leta zrakoplova na zemljinu površinu, čiji je smjer u bilo kojoj točki izražen stupnjevima u odnosu na sjever (pravi, magnetski ili na koordinatnoj mreži). Putanja leta prema VOR-u definirana je radijalima, kako je prikazano na gornjoj slici. Radijali su određeni kutom na poziciji VOR odašiljača, od magnetskog sjevera do crte radijala na kojoj se nalazi zrakoplov [4].

Indikator horizontalne situacije (HSI) je instrument koji je u zrakoplovu najčešće namješten pod umjetnim horizontom na mjestu girokompasa (engl. *Heading Indicator* ili HI). HSI ujedinjuje dva instrumenta, girokompas i indikator VOR/ILS situacije. Tijekom normalnog prilaza HSI je selektiran tako da pokazuje smjer do postaje. U prilazu iz suprotnog smjera, postoji selektiran radijal od postaje, i u takvoj situaciji HSI prikazuje logičnu sliku odstupanja lijevo ili desno, i u tom slučaju se očitava obrnuta slika na indikatoru [8].

Zračni put, u pravilu, počinje ili završava iznad VOR postaje, što ih čini mjestom u koje konvergira ili iz kojih divergira određeni broj zračnih putova (slika 17).



Slika 17. Zračni putovi koji počinju ili završavaju iznad VOR postaje

Izvor: Novak, D.: *Zrakoplovna prostorna navigacija*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015., str. 8

U mreži uređenoj kao što je prikazano na slici, moguće je da se iznad neke VOR postaje u isto vrijeme nađe velik broj zrakoplova koji lete različitim putovima i u različitim smjerovima. Takvu situaciju je potrebno spriječiti od strane kontrole zračnog prometa na način da ranije razdvoje zrakoplove po visini i/ili smjeru leta. Iznad čvorišta se često pojavljuju prometna zagušenja koja su posljedica propisanog postupka u kojem zrakoplov treba preletjeti točno iznad radionavigacijskog sredstva da bi pilot mogao registrirati izvršeni prelet i zadržati definiranu putanju leta [4].

Sustav VOR prate određene pogreške u određenom radijalu. Jedan izvor pogreški su karakteristike rada antena, drugi karakteristike prostiranja radiovala kroz prostor, a treći karakteristike VOR prijemnika. Pogreške do kojih dolazi prilikom prostiranja elektromagnetnog vala kroz prostor su pogreške zbog prostiranja elektromagnetnog vala kroz atmosferu i pogreške zbog pozicije VOR odašiljača. Pod pogreškama pozicije VOR odašiljača smatra se refleksija emitiranog elektromagnetnog vala na objektima koji se nalaze relativno blizu VOR odašiljača. Takve reflektirane komponente šire se istim prostorom, uz relativno malo kašnjenje u odnosu na polazni elektromagnetski val. Polazni val i reflektirane komponente miješaju se u VOR prijemniku, a objekti na kojima se reflektira elektromagnetski val s jedne strane su karakteristike reljefa, građevine ili prirodne prepreke u blizini VOR

odašiljača, zbog toga što antene VOR odašiljača emitiraju elektromagnetne valove u određenom kutnom rasponu u vertikalnoj ravnini.

Uočavanje izvora pogreški dovelo je do nekoliko modifikacija sustava VOR kako bi se povećala točnost određenog radijala. Jedna od modifikacija je korištenje antene visokog gradijenta kod kojih je potisnuta emisija elektromagnetskih valova ispod horizonta čime se znatno smanjuje utjecaj reflektiranih komponenti elektromagnetnog vala. Druga modifikacija je korištenje sustava Doppler-VOR (tzv. DVOR), a treća korištenje preciznog sustava VOR.

U konfiguracijama s minimalnim brojem smetnji iz okoline, radne karakteristike sustava VOR i DVOR su podjednake. Razlika u korist sustava DVOR dolazi do izražaja u situacijama s većim brojem smetnji iz okoline. Antenski kompleks odašiljača sustava DVOR sastoji se od jedne središnje neusmjerene i 52 usmjerene antene. Središnja neusmjerena antena emitira omnidirekcijski kontinuirani val koji je nazivne frekvencije vala nosioca, a amplitudno je moduliran signalom frekvencije 30 Hz, a to je referentni signal. Frekvencija električne struje napajanja usmjerenih antena je 9 960 Hz viša od frekvencije napajanja središnje antene. Napajanje usmjerenih antena odvija se odgovarajućim redoslijedom te se postiže ista raspodjela amplituda emitiranih valova kao da ih emitira jedna usmjerena antena koja jednoliko rotira frekvencijom 30 Hz. Dodatno, djelovanje tako emitiranih valova na prijemnik je isto kao da se jedna usmjerena antena giba u odnosu na prijemnik tako da joj je brzina u vremenu mijenja harmonijski frekvencijom 30 Hz. Pritom dolazi do Dopplerovog učinka te prijemnik bilježi frekvencije koje se veći dio perioda razlikuju od nazivne frekvencije. Antene se nalaze na promjeru kružnice od 13,3 m, a odabran je tako da razlika registrirane frekvencije u odnosu na nazivnu bude 480 Hz. Emitirani elektromagnetski val sadrži iste frekvencijske i amplitudne karakteristike kao i val emitiran sustavom VOR bez Dopplerovog učinka. Bez toga ne bi svaki zrakoplovni VOR prijemnik bio u mogućnosti primati signale DVOR odašiljača. Razlika između sustava VOR i DVOR je u zamjeni modulacija: kod sustava VOR amplitudna modulacija je posljedica „rotiranja“ elektromagnetskog vala, a referentni signal uklopljen je frekvencijskom modulacijom. Kod sustava DVOR, amplitudnom modulacijom uklopljen je referentni signal, a frekvencijska modulacija vezana je uz „rotiranje“ elektromagnetnog vala. U slučaju da se polazni elektromagnetski val pomiješa u prijemniku s elektromagnetskim valovima, koji su nastali refleksijom dijela polaznog vala na preprekama u okolini, nema značajne promjene u frekvenciji usmjerenog vala. Zbog toga refleksija elektromagnetskih valova na preprekama manje degradira kvalitetu navigacije sustavom

DVOR u odnosu na kvalitetu navigacije postignutu sustavom VOR. Korištene usmjerene antene efektivno djeluju kao jedna velika antena, a dimenzije antene, apertura, općenito su povezane s usmjerenošću signala. Što je veća apertura signal može biti usmjereniji, a onda je dodatno manji broj prepreka na kojima se elektromagnetski val može reflektirati. Budući da je valna duljina vala nosioca oko 3 m, apertura antenskog sklopa DVOR odašiljača je oko 5 valnih duljina emitiranih valova, za razliku od otprilike 0,5 valnih duljina dimenzije VOR odašiljača.

Na sustav DVOR nadovezuje se precizni VOR 52, u kojem su usmjerene antene grupirane u 13 jednakih grupa. Karakteristike napajanja antena su takve da usmjerene antene emitiraju elektromagnetski val sastavljen od 13 jednakih cjelina, tzv. latica. Ako prijemnik može razlučiti signal iz različitih cjelina postignuta je veća točnost u navigaciji.

6. SUSTAV NADZORA ZRAČNOG PROMETA U RH

Sustavi za nadzor zračnog prometa u RH bitna su karika u lancu koja omogućuje sigurno i djelotvorno pružanje operativne usluge u zračnom prometu (engl. *Air Traffic Services* ili ATS). Pouzdanu i točnu detekciju zrakoplova u prostoru RH omogućuju suvremeni radarski sustavi koji su u stanju pratiti zahtjeve koje postavlja važeća europska regulativa uz preporuke Eurocontrola, a sve u cilju uspostave Jedinstvenog europskog neba. Nekooperativnu i neovisnu detekciju zrakoplova (engl. *Non-Cooperative Independent Surveillance*) u RH omogućuju primarni radarski sustavi. Njihov je osnovni zadatak da osiguraju detekciju i u uvjetima kad zrakoplovni sustavi nehotično (zbog kvara) ili namjerno ne odgovore na upite zemaljskog sustava (npr. sekundarnog radara).

Kako bi jednoznačno identificirali zrakoplov, neophodno je da i sustavi u zrakoplovu sudjeluju u procesu detekcije. Kooperativna, ali i dalje neovisna detekcija (engl. *Cooperative Independent Surveillance*) omogućena je korištenjem sekundarnih nadzornih radara i transpondera u zrakoplovu. Uz principe sekundarne detekcije starijih dana, kad se uz poziciju zrakoplova dobivala još samo identifikacija i visina, današnji suvremeni mode S sekundarni radarski sustavi omogućuju selektivnu komunikaciju sa zrakoplovom.

Hrvatska Kontrola Zračne Plovidbe, HKZP, u svom sustavu ima tri suvremena mode S radarska sustava (Pleso, Kozjak i Psunj), čiji podaci zajedno s integriranim podacima od vojnih radara (Sljeme, Učka i Rota) osiguravaju višestruko pokrivanje područja odgovornosti kako *en-route* tako i terminalnih područja RH. Dodatnu sigurnost glede raspoloživosti sustava nadzora zračnog prometa svakako daje činjenica da su radarski sustavi redundantni te su disperzirani na različitim geografskim lokacijama [10].

Zrakoplovni navigacijski sustavi (engl. *NAVigational AIDS* ili NAVAIDS) su radionavigacijski sustavi koji zrakoplovima opremljenim odgovarajućom opremom pružaju sljedeće navigacijske informacije: [9]

- udaljenost od referentne točke
- azimut pozicije zrakoplova u odnosu na referentnu poziciju (engl. VOR – VHF)

- smjer kretanja zrakoplova u odnosu na smjer prema referentnoj poziciji (engl. NDB/L – *Non Directional Beacon/Locator*)
- određivanje pozicije zrakoplova u prostoru (VOR/DME sustav ili istovremeno korištenje više DME sustava).

Navedeni navigacijski sustavi instalirani su diljem zemlje kako bi osigurali sigurnu provedbu: [9]

- konvencionalne i RNAV (engl. *Area Navigation*) rutne navigacije (VOR/DME, DME-DME, NDB)
- prilaznih i odlaznih procedura (VOR/DME, NDB, L)
- nepreciznih instrumentalnih prilaznih i sletnih procedura (NDB/L)
- procedura neuspjelog prilaza (VOR/DME, NDB).

Za provedbu preciznog instrumentalnog prilaza i slijetanja u RH koristi se ILS. Sustavi ILS pripadajuće kategorije (CAT I/II/III) omogućuju provedbu operacija u zračnim lukama u uvjetima smanjene, pa čak i potpuno smanjene vidljivosti. Sve zračne luke primarne važnosti u Hrvatskoj opremljene su sustavima ILS, VOR, DME i NDB.

Odgovarajućim održavanjem i nadzorom sustava kojeg provode specijalisti Zrakoplovno-tehničke službe zajamčen je ispravan rad i visoka dostupnost te raspoloživost zrakoplovnih navigacijskih sustava. U sklopu preventivnog održavanja provode se periodičke zrakoplovne provjere i kalibracija navigacijskih sustava te se na propisan način (ICAO Annex 10, ICAO Doc. 8071) potvrđuje njihova ispravnost [9]. Tim kvalificiranih inženjera i tehničara kontinuirano nadzire sustav nadzora zračnog prometa te je spreman u svakom trenutku odgovoriti na sve izazove glede održavanja i prilagodbe sustava novim operativno-tehničkim zahtjevima [10].

S obzirom na ubrzani napredak tehnologije, planirano povećanje europskog zračnog prometa, te zbog stremljenja ka projektu Jedinog europskog neba (engl. *Single European Sky* ili SES), Sektor zrakoplovno-tehničkog sustava u RH ima zadaću stalnog uvođenja brojnih novih tehnologija i sustava o kojima ovisi povećanje sigurnosti i djelomična automatizacija kontrole zračnog prometa. Tehnički sustavi koji se koriste u HKZP-u kako bi se osiguralo sigurno odvijanje zračnog prometa su: [11]

- ATM računalni sustavi za obradu podataka
- govorni komunikacijski sustavi
- podatkovni komunikacijski sustavi
- navigacijski sustavi
- sustavi za nadzor zračnog prometa
- meteorološki sustavi.

U skladu sa svjetskim trendovima i napretkom tehnologije, u skorijoj budućnosti očekuje se i primjena navigacijskih procedura temeljenih na satelitskim sustavima (engl. *Space Based Augmentation System* ili SBAS, te *Ground Based Augmentation System* ili GBAS), što će dovesti do određenih promjena u navigacijskoj infrastrukturi [9]. Nove tehnologije, zasigurno će u skorije vrijeme naći svoje mjesto unutar sustava za nadzor zračnog prometa [10].

7. ZAKLJUČAK

U proteklim desetljećima razvoja, zrakoplovna radionavigacija dobila je niz sustava i uređaja na osnovi kojih su se razvili različiti postupci navigacije, a ovaj rad analizira sustav zrakoplovne navigacije u odnosu na zemaljske postaje.

Potrebna preciznost u određivanju putanje zrakoplova i praćenja primljenih i odaslanih signala zahtjeva više načina za postizanje sigurne zrakoplovne navigacije. Analiza rađena za potrebe pisanja ovog rada pokazala je da svaka od metoda zrakoplovne navigacije u odnosu na zemaljske postaje ima svoja ograničenja zbog karakterističnog područja. Napretkom tehnologije, razvijaju se precizniji instrumenti, uređaji i metode, ali za sada se dostignuta preciznost postiže kombiniranjem uređaja i instrumenata iz različitih metoda.

Kratkim osvrtom na zrakoplovnu navigaciju u odnosu na zemaljske postaje u RH ustanovilo se kako se praćenjem trendova zadržava standard i povećava kapacitet hrvatskog neba.

Literatura

Popis knjiga:

- [1] Benković, F. i dr.: *Terestrička i elektronska navigacija*, Hidrografski institut ratne mornarice, Split, 1986.
- [2] Bucak, T.: *Zrakoplovni instrumenti 2*. Priručnik, prvo izdanje, Zagreb. 1988.
- [3] Grozdanić, B., Hegeduš, M.: *Zrakoplovna navigacija I*. Kompasna navigacija, Fakultet prometnih znanosti i Ministarstvo obrane RH – HRZ i PZO, Zagreb, 1995.
- [4] Novak, D.: *Zrakoplovna prostorna navigacija*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015.
- [5] Novak, D.: *Zrakoplovna računska navigacija*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2012.
- [6] Stepanić, J.: *Zrakoplovni instrumenti za navigaciju*, Zagreb, 2015.

Popis ostalih izvora:

- [7] Klasnić, Z.: *Osnove zrakoplovne navigacije*. Znanstveno-stručna literatura za osoblje u zračnom prometu, Zračna luka Zagreb d.o.o., Zagreb, 1998.
- [8] Smole, B.: *Navigacija, radio navigacija in značilnosti nočnega letenja*. Ministrstvo za obrambo, Slovenija, 2011.

Popis Internet izvora:

- [9] HKZP, Navigacijska sredstva: <http://www.crocontrol.hr/> 4.5.16. u 14:16
- [10] HKZP, Sustavi za nadzor zračnog prometa: <http://www.crocontrol.hr/> 4.5.16. u 14:09
- [11] HKZP, Zrakoplovno-tehnički sustav: <http://www.crocontrol.hr/> 4.5.16. u 14:30

Popis kratica

VFR (Visual Flight Rules) vizualan režim leta
IFR (Instrumental Flight Rules) instrumentalni režim leta
OPA (Obstacle Protection Areas) područja zaštite prepreka
ZNS zemaljska navigacijska sredstva
VMC (Visual Meteorological Conditions) vizualni meteorološki uvjeti
LORAN (Long Range Navigation) navigacijski sustav dugog dometa
NDB (Non-Directional Beacons) neusmjereni radiofar
ADF (Automatic Direction Finder) radiokompas
RG radiogoniometar
RG VDF (VHF Direction Finding) isokofrekvencijski radiogoniometar
DDF (Doppler Direction Finding) Dopplerov radiogoniometar
MK magnetni kurs
ATIS (Automatic Terminal Information System) automatski informacijski sustav završne faze leta
RBI (Radio Bearing Indicator) indikator relativnog smjera
RMI (Radio Magnetic Indicator) radiomagnetski indikatori
RB bočni kut
ZMPK zadani magnetni putni kurs
VOR (VHF Omnidirectional Radio Range) visokofrekvencijski svesmjerni radiofar
CDI (Course Deviation Indicator) indikator odstupanja smjera
MCW (Modulated Continuous Wave) modulirani kontinuirani val
HSI (Horizontal Situation Indicator) indikator horizontalne situacije
EFIS (Electronic Flight Instrument System) elektronički sustav letnih instrumenata
ATS (Air Traffic Services) operativne usluge u zračnom prometu
NCIS (Non-Cooperative Independent Surveillance) nekooperativna i neovisna detekcija zrakoplova
CIS (Cooperative Independent Surveillance) kooperativna neovisna detekcija
NAVAIDS (NAVigational AIDS) zrakoplovni navigacijski sustavi
NDB/L (Non Directional Beacon/Locator) neusmjereni radiofar/lokator
ILS (Instrument Landing System) sustav instrumentalnog slijetanja
SES (Single European Sky) Jedinstveno europsko nebo
SBAS (Space Based Augmentation System) navigacijske procedure sa satelitskim sustavima

Popis slika

Slika 1. Radionavigacijske rute u zračnom prometu	5
Slika 2. Podjela zrakoplovne navigacije.....	7
Slika 3. Podjela navigacijskih sustava.....	8
Slika 4. Antenski sustav radiogoniometra i aktivan let prema VDF stanici.....	13
Slika 5. Pasivan dolet	14
Slika 6. Aktivni dolet.....	15
Slika 7. Let od goniometra	16
Slika 8. Radio magnetski indikator (RMI) i pozicija zrakoplova u odnosu na NDB	19
Slika 9. Dijelovi radio magnetskog indikatora (RMI).....	20
Slika 10. Pasivan dolet prema NDB odašiljaču.....	21
Slika 11. Stranski kut.....	22
Slika 12. Prikaz popravka za aktivni dolet na NDB.....	23
Slika 13. Primjer zemaljske postaje VOR u radijalima.....	26
Slika 14. Prikaz kontrolne ploče u suvremenom zrakoplovu	27
Slika 15. CDI indikator	28
Slika 16. Indikator HSI i pozicija zrakoplova u odnosu na VOR postaju.....	32
Slika 17. Zračni putovi koji počinju ili završavaju iznad VOR postaje	33



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj _____ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu _____ završnog rada
pod naslovom **Navigacija zrakoplova s obzirom na zemaljske postaje**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Studentica: Ana Jelinčić

U Zagrebu, 18.4.2017

(potpis)