

Eksperimentalno određivanje točnosti sustava VOR

Majstorović, Dominik

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:119:637501>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-01**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Dominik Majstorović

EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE TOČNOSTI SUSTAVA VOR

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2020.

Zagreb, 9. travnja 2020.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Zrakoplovna navigacija II**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 5652

Pristupnik: **Dominik Majstorović (0035212583)**
Studij: **Aeronautika**
Smjer: **Pilot**
Usmjerenje: **Civilni pilot**

Zadatak: **Eksperimentalno određivanje točnosti sustava VOR**

Opis zadatka:

- Opisati razvoj zrakoplovne navigacije
- Opisati uporabu i značajke sustava VOR
- Objasniti navigacijsku opremu zrakoplova
- Odrediti eksperiment određivanja točnosti sustava VOR
- Analizirati rezultate mjerenja

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

Petar Andrašić, mag. ing. aeronaut.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE TOČNOSTI SUSTAVA VOR

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE ACCURACY OF THE VOR
SYSTEM**

Mentor: Petar Andraši, mag. ing. aeronaut.

Student: Dominik Majstorović

JMBAG: 0035212583

Zagreb, rujan 2020.

SAŽETAK:

Sustav VOR relevantan je radionavigacijski sustav u zrakoplovnoj navigaciji. Opisane su karakteristike i princip rada toga sustava koji za funkcioniranje koristi elektromagnetske valove. Opisana je njegova teorijska točnost koja je provjerena eksperimentalnim putem. Izvedeni su eksperimentalni letovi tijekom kojih su bilježeni podaci odstupanja odnosno netočnosti sustava VOR u odnosu na indikacije GNSS sustava. Prikupljeni podaci statistički su obrađeni, a rezultati su analizirani i opisani te su uspoređeni s očekivanom teorijskom točnošću.

KLJUČNE RIJEČI: radionavigacija; elektromagnetski valovi; GNSS; sustav VOR; točnost;

SUMMARY:

The VOR system is a relevant radionavigation system in air navigation. This work describes the characteristics and principle of operation of this system, which uses electromagnetic waves to function as well as its theoretical accuracy. In this work theoretical accuracy was verified experimentally. Experimental flights were performed during which data on deviations or inaccuracies of the VOR system in relation to the indications of the GNSS system were recorded. The collected data were statistically processed, and the results were analyzed and compared with the expected theoretical accuracy.

KEYWORDS: radionavigation; electromagnetic waves; GNSS; VOR system; accuracy;

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Razvoj i pojam Zrakoplovne navigacije	2
3. Radionavigacija	4
3.1. Elektromagnetski valovi	4
3.1. Radiovalovi	9
4. GNSS.....	11
5. Sustav VOR.....	14
5.1. Definiranje sustava VOR.....	14
5.2. Princip rada sustava VOR	17
5.3. VOR prikaznik u zrakoplovu	20
5.4. Uporaba sustava VOR.....	22
6. Navigacijska oprema zrakoplova 9A-DMB i 9A-DAD	24
6.1. Navigacijska oprema 9A DMB	24
6.2. Navigacijska oprema 9A DAD	25
7. Eksperiment određivanja točnosti sustava VOR.....	27
7.1. Opis izvođenja eksperimenta	27
7.2. Mjerenja na 9A-DMB.....	28
7.2.1. VOR LAK	28
7.2.2. VOR ZDA.....	29
7.3. Mjerenje na 9A-DAD	31
7.4. Analiza i usporedba rezultata mjerenja	34
8. Zaključak.....	37
Literatura.....	38
Popis kratica.....	40
Popis slika.....	42
Popis tablica	43
Popis grafikona.....	44

1. Uvod

Sustav VOR je radionavigacijski sustav s brojnim primjenama u zrakoplovstvu. Princip rada sustava temelji se na prijenosu informacija pomoću signala elektromagnetskog vala između odašiljača na zemlji i prijemničke opreme u zrakoplovu. Postoji više faktora koji utječu na točnost sustava VOR poput greške zemaljske odašiljačke postaje, prepreka, efekata pri širenju elektromagnetskih valova i deterioracije točnosti dijelova prijemničke i indikatorske opreme sustava VOR u zrakoplovu.

U ovom radu opisane su karakteristike i princip rada sustava VOR. Teorijski su opisane moguće netočnosti sustava. Svrha rada prikazati je prisutnost netočnosti koje se mogu dogoditi pri uporabi uporabom raširenog i pouzdanog radionavigacijskog sustava u zrakoplovstvu. Cilj završnog rada je eksperimentalno utvrditi točnost sustava VOR. Proveden je eksperiment određivanja točnosti sustava VOR, a podatci su prikupljeni tijekom više eksperimentalnih letova izvedenih na dva zrakoplova tipa Cessna 172, registracijskih oznaka 9A-DMB i 9A-DAD. Mjerenja su napravljena u 3 različita leta, koristeći 3 različite VOR odašiljačke postaje, bilježenjem odstupanja prikazivanja VOR sustava u odnosu na GNSS sustav. Izmjereni rezultati eksperimentalnih letova uspoređeni su s predviđenom teorijskom točnosti sustava te su sukladno tome doneseni zaključci i različiti prikazi rezultata eksperimenta.

Završni rad podijeljen je u 8 poglavlja. U drugom poglavlju definiran je pojam i razvoj zrakoplovne navigacije. U trećem poglavlju opisani su elektromagnetski radiovalovi i osnovni princip kojim nalaze primjenu u zrakoplovnoj radionavigaciji. U četvrtom poglavlju opisan je način funkcioniranja i točnost GNSS sustava pošto je isti korišten za određivanje točnosti sustava VOR. Peto poglavlje obuhvaća karakteristike i uporabu sustava VOR u zrakoplovstvu. Također je objašnjen princip rada sustava VOR, a vrlo bitno je i da su opisane moguće teorijske netočnosti pri uporabi sustava. U sedmom poglavlju opisan je eksperimentalni dio završnog rada koji uključuje način izvođenja eksperimenta, mjerenja, analizu dobivenih rezultata i usporedbu točnosti sustava VOR na različitim zrakoplovima uzeći u obzir teorijski predviđena odstupanja.

2. Razvoj i pojam Zrakoplovne navigacije

Riječ navigacija ima latinsko podrijetlo i sastoji se od riječi navis (brod) i agare (ploviti), stoga se može zaključiti da zrakoplovna navigacija kakvu danas poznajemo ima korijene u pomorskoj tradiciji [1].

„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 [2].“

Glavna zadaća zrakoplovne navigacije je osiguranje doleta zrakoplova od jedne točke do druge. Kada se definicija proširi, može se reći da je potrebno osigurati precizno vođenje definiranom rutom na određenoj visini u predviđenom vremenu. Opći navigacijski proces sastoji se od planiranja leta, određivanja trenutne pozicije zrakoplova te usmjeravanja zrakoplova od početnog do krajnjeg odredišta [2].

Prve su metode zrakoplovne navigacije bile jednostavne. Pilot je uspoređivao vidljive objekte na tlu s onima koje je imao označene na karti, a praćenjem kompasa približno je određivao i smjer leta. Tehnološkim razvojem zrakoplova, letovi su postizali sve veće udaljenosti i to često preko područja bez uočljivih obilježja poput oceana, u uvjetima slabe vidljivosti te noću pa je u 1930-ima zrakoplovna navigacija postala osobito važna. Uz kompas su uvedeni visinomjer i brzinomjer kao osnovni navigacijski uređaji [3].

U dvadesetom stoljeću su se počele uvoditi preciznije metode radionavigacije koje su i danas u uporabi. Njihova su osnova zemaljske stanice koje odašilju signale koje primaju posebni uređaji u zrakoplovima kako bi odredili svoj položaj. Primjeri takvih sustava su: neusmjereni radiofar (engl. *Non Directional Beacon* - NDB), visokofrekvencijski svesmjerni radiofarovi (engl. *Very High Frequency Omnidirectional Radio Range* - VOR) i oprema za mjerenje udaljenosti (engl. *Distance measuring equipment* - DME), sustav za precizno prilaženje prema instrumentima (engl. *Instrument Landing System* - ILS) [3].

Za letove iznad morske površine od 1950-ih koristi se inercijski navigacijski sustav koji neprekidnim praćenjem promjena brzine letjelice pomoću akcelerometra proračunava podatke o preavljenome putu što omogućava određivanje trenutne pozicije, a danas je u zrakoplovnoj navigaciji u sve većoj uporabi globalni navigacijski satelitski sustav [3].

Postoji više načina vođenja zrakoplovne navigacije, a razvojem tehnologije preciznost navigacije sve je veća. Unatoč naprednim računalima, sustavima i instrumentima u zrakoplovu, primarni načini vođenja zrakoplovne navigacije vizualizacijom okolnog reljefa i dalje su prisutni u zrakoplovstvu [2].

S obzirom na način prikupljanja informacija izvan zrakoplova u svrhu određivanja točne pozicije zrakoplova, zrakoplovna navigacija može se podijeliti na dvije vrste vođenja navigacije, a to su: vizualna navigacija i instrumentalna navigacija [1].

Vizualna navigacija podrazumijeva određivanje pozicije zrakoplova temeljeno na uspoređivanju okolnog reljefa i orijentira u vidokrugu pilota s kartom. Pravila vizualnog letenja (engl. *Visual Flight Rules* - VFR) propisuju vizualne meteorološke uvjete (engl. *Visual Meteorological Conditions* - VMC) odnosno meteorološke minimume pri kojima je moguće primjenjivati vizualnu navigaciju [2].

Kod instrumentalne navigacije određivanje pozicije izvodi se prikupljanjem raspoloživih informacija iz samog zrakoplova koristeći radionavigacijske, inercijske navigacijske sustave i satelitske sustave. Prikupljene informacije se prikazuju na zrakoplovnim instrumentima i prikaznicima u pilotskoj kabini koje pilot tumači i određuje poziciju zrakoplova [2].

Pilot kod instrumentalne navigacije ne mora imati vizualni kontakt s površinom zemlje te se tada letenje odvija prema pravilima instrumentalnog letenja (engl. *Instrumental Flight Rules* - IFR). Meteorološki parametri u tom slučaju mogu biti manji od VMC odnosno let se može odvijati u instrumentalnim meteorološkim uvjetima (engl. *Instrumental Meteorological Conditions* - IMC) [2].

3. Radionavigacija

3.1. Elektromagnetski valovi

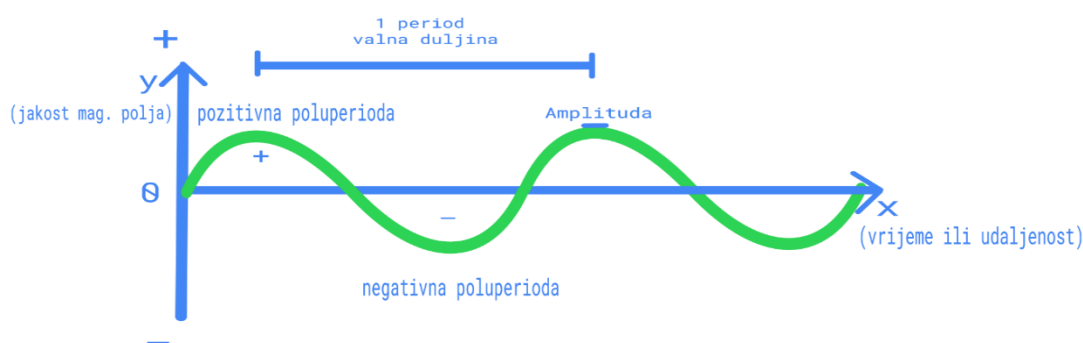
Radionavigacijski i radarski sustavi danas su sastavni dio zrakoplovstva bez kojeg bi trenutni intenzitet operacija zračnog prometa bio neodrživ. Neki od radionavigacijskih sustava u zrakoplovstvu su: NDB, VOR, ILS i drugi. Svi navedeni kao i globalni navigacijski satelitski sustav koji je korišten u ovom eksperimentu baziraju svoj rad na elektromagnetskim valovima stoga su oni definirani u poglavljima 2.1 i 2.2.

Općenito gledano, val je širenje poremećaja kojim se prenosi energija kroz medij. Na valu razlikujemo uzvisine i udubine koje zovemo brijeg i dol vala [4]. Matematički gledano, valovi se prema [4] mogu opisati pomoću jednadžbe (1).

$$a = A \sin(x - ft) \quad (1)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- a – elongacija [m]
- A – amplituda koja predstavlja udaljenost od ravnotežnog položaja do najviše točke ili najniže točke dola, a kod elektromagnetskih valova ovisi o jačini elektromagnetskog polja [m]
- x – udaljenost čestice od izvora vala [m]
- f – frekvencija vala [Hz]
- t – vrijeme širenja vala [s].



Slika 1. Sinusoidni val s pojašnjenjima

Izvor: [5]

Dalje je bitno definirati valnu duljinu, period i frekvenciju. Valna duljina predstavlja udaljenosti između susjednih čestica vala koje se nalaze na istoj udaljenosti od ravnotežnog položaja i gibaju se u istom smjeru. Period vala je vrijeme koje protekne dok se val pomakne za jednu valnu duljinu, a frekvencija je obrnuto proporcionalna periodu vala [6]. Na slici 1 ilustrirana je valna duljina i period na primjeru sinusoidnog vala opisanog prijašnjom jednažbom (1). Veza između ovih veličina prema [6] matematički je prikazana formulama (2) i (3) i (4).

$$\lambda = c \cdot \tau \quad (2)$$

$$f = \frac{1}{\tau} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4)$$

U formulama (2), (3) i (4) oznake imaju sljedeće značenje:

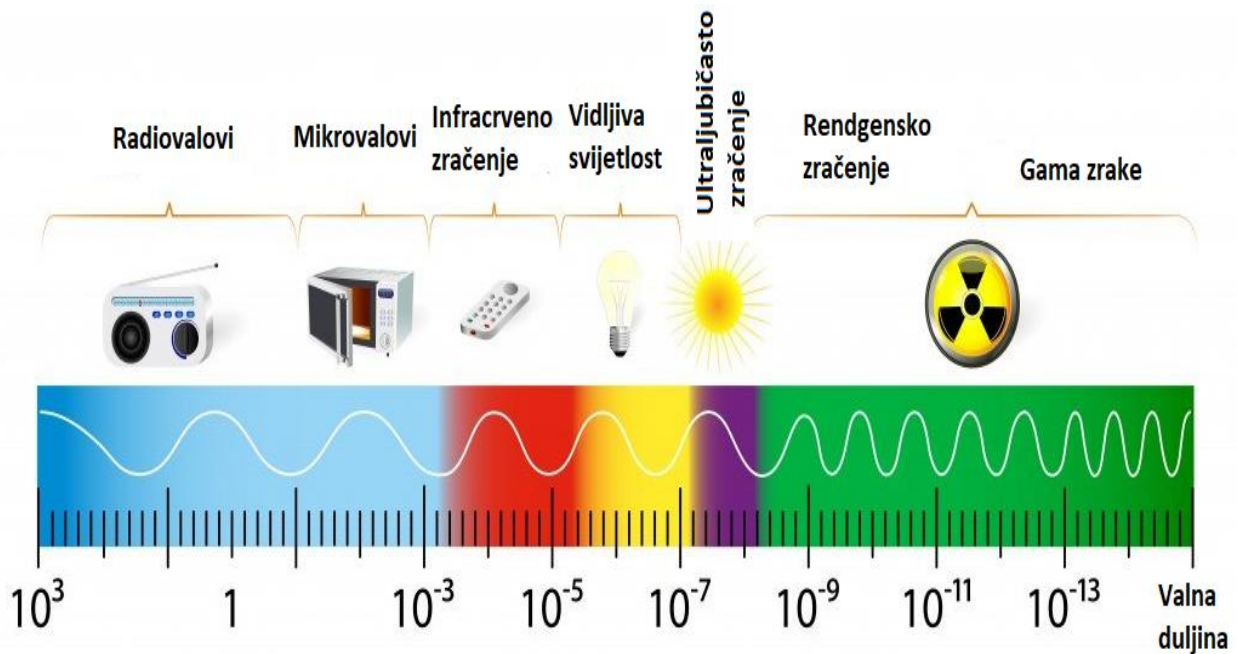
- λ – valna duljina [m]
- c – brzina širenja elektromagnetskog vala u vakuumu tj. brzina svjetlosti: $300 \times 10^6 \frac{m}{s}$
- τ – period vala [s]
- f – frekvencija [Hz].

Postoji više vrsta valova: mehanički valovi, elektromagnetski valovi, valovi tvari i gravitacijski valovi [4].

Elektromagnetski valovi prenose se titranjem električnoga i magnetskoga polja u propusnom mediju ili vakuumu. Energija elektromagnetskih valova proporcionalna je s frekvencijom, a izvori su im promjenjiva elektromagnetska polja npr. generirana u anteni. Zajednička im je brzina širenja u vakuumu koja je jednaka brzini svjetlosti, a razlikuju se po valnim duljinama i frekvencijama [7].

Raspon svih valnih duljina elektromagnetskog vala naziva se spektar i prikazan je na slici 2. Spektar elektromagnetskih valova dijeli se na: radiovalove, mikrovalove, infracrveno zračenje, vidljivu svjetlost, ultraljubičasto zračenje, rendgensko zračenje, gama zrake. Na slici 2 vidljivo

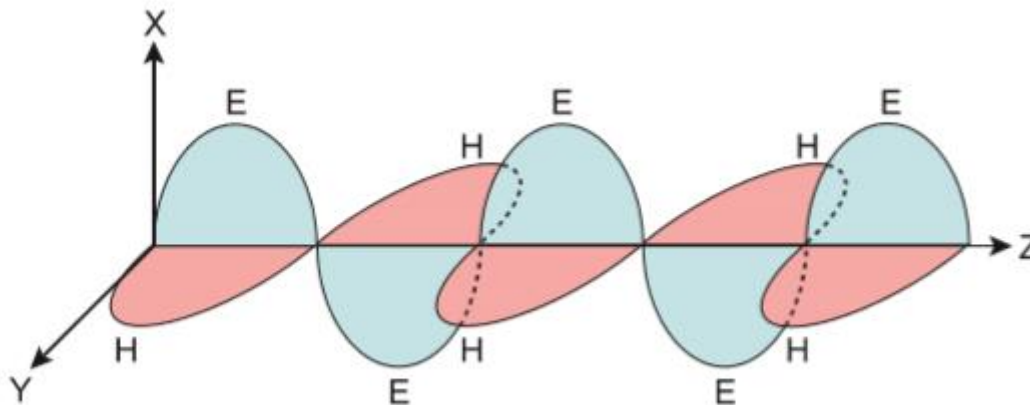
je da radiovalovi imaju najveće valne duljine i najmanje frekvencije, dok gama zrake imaju najmanje valne duljine i najveće frekvencije [7].



Slika 2. Spektar elektromagnetskih valova

Izvor: [8]

Elektromagnetski valovi mogu se generirati prolaskom nabijenih čestica vodičem. Ako kroz žicu prolazi jednosmjerna električna struja, oko žice se stvara magnetsko polje okomito na smjer strujanja električne struje. Kada kroz žicu prolazi izmjenična električna struja čiji je smjer strujanja električne struje promjenjiv, polaritet magnetskog polja će se također mijenjati ovisno o smjeru strujanja električne struje. Rezultanta energije sastoji se od dvije komponente koje su prikazane na slici 3: električnog (E) polja paralelnog sa žicom i magnetskog (H) polja okomitog na žicu. Zajedno čine elektromagnetsko polje koje emitira valove prema van iz vodiča [6].



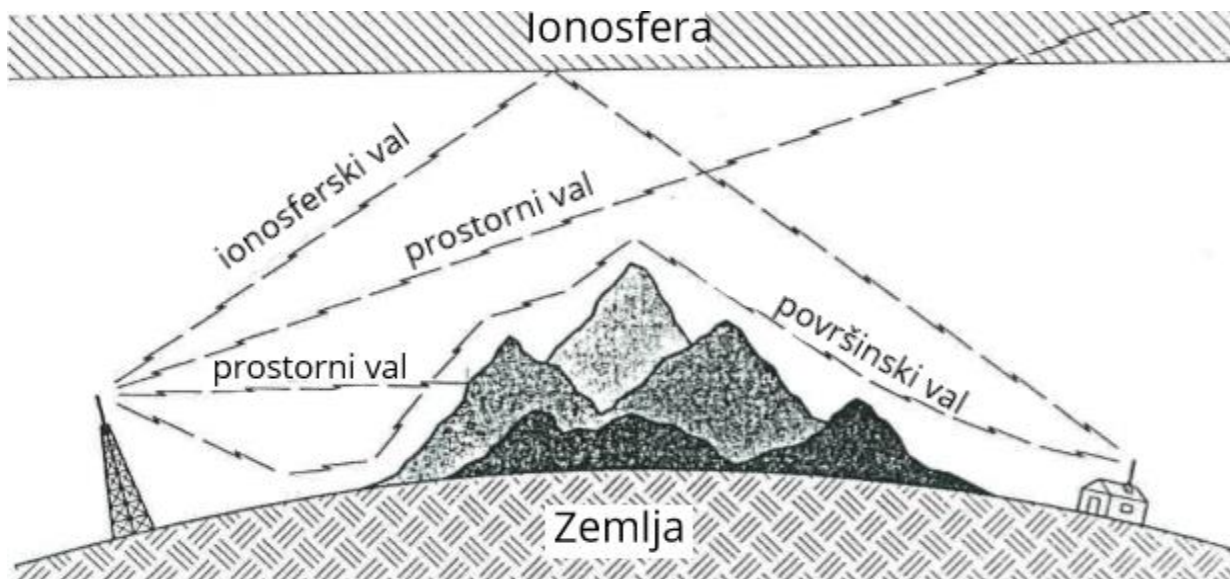
Slika 3. Elektromagnetsko polje

Izvor: [6]

Prema načinu širenja elektromagnetske valovi dijele se na:

- površinski val – (engl. *ground wave*) nastaje pri vertikalnoj polarizaciji (vertikalno postavljena antena) kada je odašiljačka stanica u blizini zemljine površine, širi se uz Zemljinu površinu radi apsorpcije tla energija mu brzo pada. Bitan je za niže frekvencije do oko 100 kHz i ima domet oko 1000 km
- ionosferski val – (engl. *skip wave*) nastaje od dijela energije zračene pod nekim kutem u odnosu za Zemljinu površinu, zbog efekata koji se događaju pri širenju elektromagnetskih valova (refrakcija, refleksija, apsorpcija - objašnjeni ispod) dio energije odbija se od visokih slojeva Zemljine atmosfere i vraća se nazad. Ima veći domet od površinskih valova i koristi se u zrakoplovnoj komunikaciji kod visokih frekvencija
- prostorni val – (engl. *space wave*) širi se od izvora zračenja u prostoru jednoliko u svim smjerovima u obliku koncentričnih kugli), važan je za komunikacije i prijenos informacija na vrlo visokim i ultra visokim frekvencijama iznad 30 MHz, a teorijski domet je unutar zone vidljivosti (engl. *in line of sight*) [9].

Na slici 4 prikazan je način širenja opisanih elektromagnetskih valova.



Slika 4. Širenje elektromagnetskih valova

Izvor: [9]

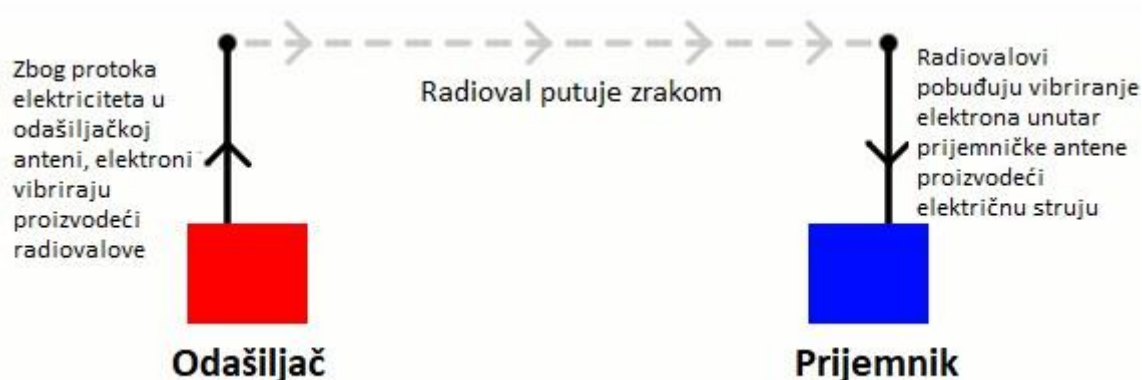
Efekti koji nastaju pri širenju elektromagnetskog vala prostorom su:

- apsorpcija – ireverzibilna pretvorba energije u drugi oblik energije (npr. toplinska) kada elektromagnetski val dođe u interakciju s medijem, efekt apsorpcije raste s frekvencijom
- refleksija – promjena smjera rasprostiranja elektromagnetskog vala pri nailasku na medij različite gustoće i/ili vodljivosti
- refrakcija – pojava promjene smjera rasprostiranja elektromagnetskog vala pri prolasku kroz slojeve atmosfere zbog različitih indeksa loma pošto se svojstva atmosfere mijenjaju visinom
- difrakcija – pojava prilagodbe elektromagnetskog vala obliku prepreke ili nehomogenosti medija na koje naiđe pri rasprostiranju karakteristična za
- interferencija – uzrokovana prijemom elektromagnetskih valova jednakih ili bliskih frekvencija iz više različitih smjerova zbog čega dolazi do smetnji u prijenosu informacija [9].

3.1. Radiovalovi

Radiovalovi dio su spektra elektromagnetskih valova koji ima najveće valne duljine i najmanje frekvencije, a obuhvaća valove valnih duljina većih od 0,1 mm. Postojanje radiovalova definirano je Maxwellovim jednačbama koje elektromagnetske valove opisuju kao posljedicu ubrzanoga gibanja čestica nabijenih električnim nabojem. Izmjenična električna struja u vodiču odašiljača npr. antene, može proizvesti elektromagnetski val koji u prijamniku inducira električnu struju iste oscilacije i tako omogućava prijenos informacije od odašiljača ka prijamniku. Opisani princip ilustriran je na slici 5. Radiovalovi se primjenjuju u radiokomunikacijama, radionavigaciji i različitim elektroničkim uređajima [10].

Radi praktičnosti postoji podjela s obzirom na njihovo frekvencijsko područje na: vrlo niske frekvencije (engl. *Very Low Frequency* - VLF), niske frekvencije (engl. *Low Frequency* - LF), srednje frekvencije (engl. *Medium Frequency* – MF), Visoke frekvencije (engl. *High Frequency* - HF), Vrlo visoke frekvencije (engl. *Very High Frequency* - VHF), Ultra visoke frekvencije (engl. *Ultra High Frequency* - UHF), Supervisoke frekvencije (engl. *Super High Frequency* - SHF), Ekstremno visoke frekvencije (engl. *Extremely High Frequency* - EHF) [10]. U tablici 1 prikazana je navedena podjela te pripadajuće frekvencije i valne duljine kao i njihova uporaba u zrakoplovstvu.



Slika 5. Prijenos informacija od odašiljača prema prijamniku,

Izvor: [5]

Tablica 1. Frekvencijska područja radiovalova i njihova uporaba u zrakoplovstvu

Frekvencijsko područje	Frekvencije	Valne duljine	Uporaba u civilnom zrakoplovstvu
VLF	3 – 30 kHz	100 – 10 km	-
LF	30 – 300 kHz	10 – 1 km	NDB
MF	300 – 3000 kHz	1000 – 100 m	NDB, komunikacija dugog dometa
HF	3 – 30 MHz	100 – 10 m	Komunikacija dugog dometa
VHF	30 – 300 MHz	10 – 1 m	Komunikacija kratkog dometa, radio-goniometar, VOR, ILS odašiljač usmjerivača pravca prilaženja, radiomarkeri
UHF	300 – 3000 MHz	100 – 10 cm	ILS odašiljač signala putanje poniranja, DME, sekundarni radar, satelitske komunikacije, radari dugog dometa
SHF	3 – 30 GHz	10 – 1 cm	Radio visinomjer, zrakoplovni radar za vrijeme, mikrovalni sustav za precizno prilaženje, radari kratkog dometa
EHF	30 – 300 GHz	10 – 1 mm	-

Izvor: [6]

4. GNSS

Globalni navigacijski satelitski (engl. *Global Navigation Satellite System* - GNSS) je opći pojam za sustav koji koristeći satelite u orbiti omogućuje određivanje pozicije. Koristeći taj sustav moguće je odrediti poziciju korisnika bilo kada i na bilo kojem mjestu na Zemlji. Trenutačno se četiri međusobno neovisna sustava globalne satelitske navigacije nalaze u operativnoj uporabi: GPS (engl. *Global Positioning System*), GLONASS (engl. *Global Orbiting Navigation Satellite System*), BeiDou i najnoviji sustav napravljen od strane Europske unije Galileo [2].

Osnova rada sustava satelitske navigacije je jednosmjerna komunikacija između satelita i prijemnika (zrakoplova). Određivanje pozicije prijemnika postiže se mjerenjem vremena širenja signala od pojedinog satelita do korisničkog prijemnika. pošto se radi o radiovalovima, brzina kojom se rasprostire signal emitiran od satelita jest brzina svjetlosti. Za točno određivanje pozicije nužno je vrlo točno mjerenje vremena jer svaka relativno mala netočnost mjerenja vremena, zbog velike brzine rasprostiranja radiovalova, stvara veliku pogrešku. Zato su u satelite ugrađeni visoko precizni atomski satovi [2].

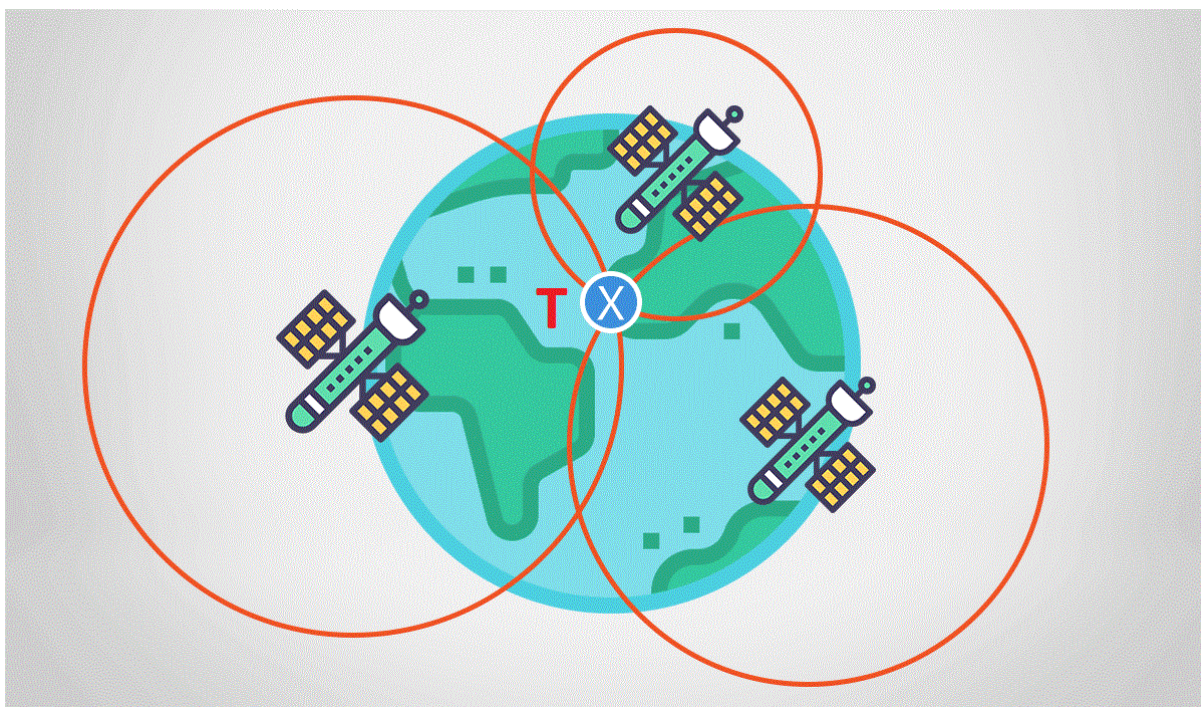
Satelit šalje signal kojeg prima prijemnik. Neke od informacija koje dobiva u signalu su vrijeme odašiljana signala i položaj satelita. Poznajući brzinu širenja signala prijemnik izračunava udaljenost i uspoređuje tu udaljenost s poznatom pozicijom satelita i dodajući korektivne parametre daje navigacijsko rješenje [2]. Pomoću razlike u vremenu od trenutka emitiranja signala sa satelita do prijema u prijemniku, prema [2] računa se udaljenost od satelita (R), prema formuli:

$$R = c \cdot \Delta t = c (t_k - t_p) \quad (5)$$

U formuli (5) oznake imaju sljedeće značenje:

- t_k – vrijeme pokazivanja satelitskog sata
- t_p – vrijeme pokazivanja sata prijamnika [2].

Za definiranje položaja neke točke (zrakoplova) potrebno je znati geografsku širinu, geografsku dužinu i visinu. Koordinate neke točke T u prostoru mogu se definirati sjecištem triju sfera s poznatim radijusima u čijim se središtima nalaze sateliti [2]. Na slici 6 grafički je prikazan navedeni princip određivanja položaja sjecištem triju sfera.



Slika 6. Određivanje pozicije koristeći tri satelita

Izvor: [8]

$$r^2 = (x_T - x_K)^2 + (y_T - y_K)^2 \quad (6)$$

Matematički se to može prikazati sustavom od tri linearne jednačbe s tri nepoznanice koju su koordinate tražene točke. Poznajući jednačbu kružnice (6) koja ima središte u točki K (s koordinatama x_K i y_K) i primjenom na tri sfere u prostoru može se definirati sljedeći sustav jednačbi (7) koji definira koordinate točke T [2].

$$\begin{aligned} R_{K1}^2 &= (x_T - x_{K1})^2 + (y_T - y_{K1})^2 + (z_T - z_{K1})^2 \\ R_{K2}^2 &= (x_T - x_{K2})^2 + (y_T - y_{K2})^2 + (z_T - z_{K2})^2 \\ R_{K3}^2 &= (x_T - x_{K3})^2 + (y_T - y_{K3})^2 + (z_T - z_{K3})^2 \end{aligned} \quad (7)$$

U sustavu jednačbi (7) oznake imaju sljedeće značenje:

- x_T, y_T, z_T – nepoznate koordinate točke T odnosno prijamnika
- $R_{K1,2,3}$ – udaljenosti točke od satelita koje se mogu izračunati na već opisan način prema formuli (5)

- $x_{K1,2,3}, y_{K1,2,3}, z_{K1,2,3}$ – poznate koordinate položaja satelita [2].

Zbog nepreciznosti satova u satelitskim prijamnicima, opisanom načinom prijamnik neće mjeriti točnu udaljenost R , već pseudoudaljenost R' (engl. *pseudorange*) prikazanu izrazom (8) u kojem:

- Δt_p i Δt_{si} predstavljaju vremenske razlike koje se pojavljuju radi odstupanja u mjerenju sustava prijamnika i mjerenju sustava satelita
- Δt_{at} predstavlja pogrešku koja se pojavljuje radi rasprostiranja vala u atmosferi pošto se val ne širi vakuumom konstantnom brzinom [2].

$$R' = R + c (\Delta t_p + \Delta t_{si}) + \Delta t_{at} \quad (8)$$

Razlika u mjerenju vremena prijemnika Δt_p ista je za sve pseudoudaljenosti i četvrta je nepoznanica sustava jednadžbi. Dakle, analogno prethodnom sustavu potrebno je postaviti sustav od četiri linearne jednadžbe s četiri nepoznanice (tri su prostorne koordinate, a četvrta je pseudoudaljenost). Radi toga za točno određivanje pozicije potrebno je imati prijem i mjerenja signala od najmanje četiri satelita [2].

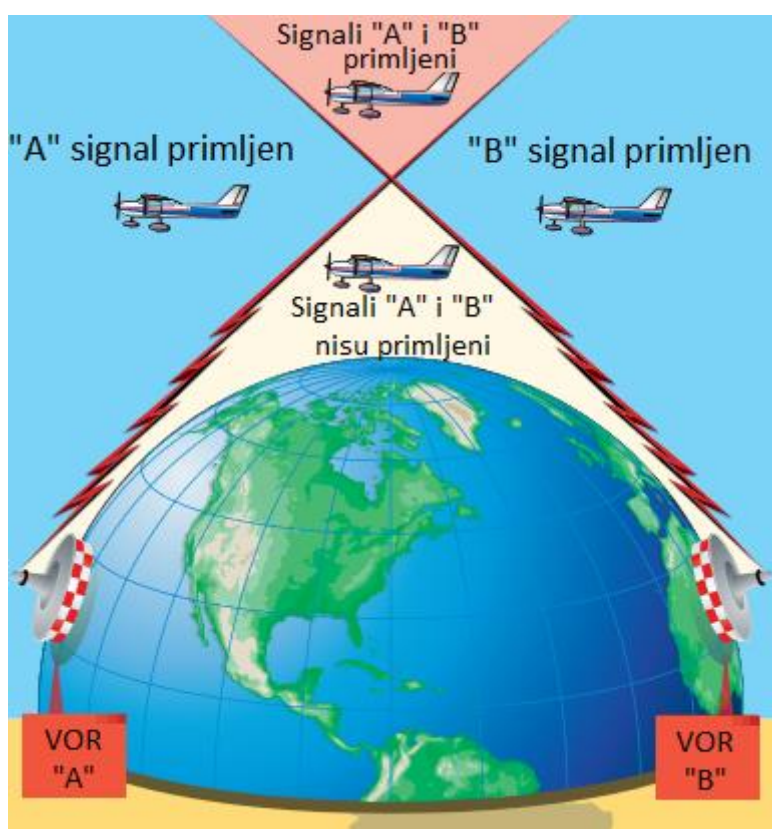
Pošto je u ovom završnom radu za određivanje točnosti sustava VOR korišten GPS sustav, bitno je znati i njegovu točnost. Pošto GPS sustav kao i drugi satelitski sustavi kao osnovu koristi elektromagnetske valove podložan je efektima i smetnjama karakterističnim za takve valove i drugim netočnostima. Prema (11) točnost GPS sustava je ± 6.7 m.

5. Sustav VOR

5.1. Definiranje sustava VOR

Visokofrekvencijski (VHF) svesmjerni radiofar (engl. Very High Frequency Omni-directional Radio Range - VOR) je moderno radionavigacijsko sredstvo s brojnim primjenama u zrakoplovstvu. Navigacija pomoću sustava VOR je jednostavna, a smetnje koje elektromagnetski valovi imaju u području VHF-a su male.

Uporaba VOR sustava postala je standardna 1960-ih. VOR odašiljačkim postajama dodijeljene su frekvencije iz frekvencijskog pojasa od 108 do 117.95 MHz, a širine kanala su po 50 kHz. Pošto je to VHF sustav, za primanje signala potrebno je da signal ne nailazi na nikakve prepreke do prijamnika, odnosno da zrakoplov bude u zoni vidljivosti (engl. *in line of sight*) s VOR odašiljačkom postajom. Zato domet sustava VOR ovisi o terenu koji ga okružuje te visini na kojoj zrakoplov leti [12]. Područja primanja signala sustava VOR prikazan je na slici 7.



Slika 7. Područje primanja signala VOR sustava

Izvor: [13]

VOR sustav sastoji se od odašiljačke postaje na zemlji vidljiva na slici 8 i prijamnika s odgovarajućim prikaznikom u zrakoplovu [13].

VOR sredstva često su kolocirana s opremom za mjerenje udaljenosti (DME) te u tim slučajevima pružaju trenutni domet i radijal koji nedvosmisleno određuju položaj zrakoplova u prostoru (engl. *fix*) [12].

VOR je dostupan u više varijanti s manjim razlikama:

- CVOR (engl. *Conventional VOR*) – konvencionalni VOR koji se koristi za definiranje zračnih putova i navigaciju na ruti
- BVOR (engl. *Broadcast VOR*) – odašilje informacije o aerodromu ili meteorološke informacije
- DVOR (engl. *Doppler VOR*) – noviji i precizniji tip sustava VOR koji koristi principe Dopplerovog efekta
- TVOR (engl. *Terminal VOR*) – manje je snage i koristi se na terminalnim područjima većih zračnih luka
- VOT (engl. *VOR Test Facility*) – služi za testiranje točnosti zrakoplovne opreme za sustav VOR
- VORTAC (engl. *VOR/Tactical Air Navigation System*) – VOR postavljen zajedno sa TACAN (engl. *Tactical Air Navigation System*) sustavom koji je inače u vojnoj uporabi i osim radijala pruža i udaljenost s većom točnošću
- DBVORTAC (engl. *Doppler VORTAC*) – kombinacija gore opisanih sustava [6].

Neovisno o varijanti VOR sustava, prikaznik sustava VOR u zrakoplovu se ponaša isto i generalni princip rada je isti [13].

VOR sustav se prema operativnoj uporabi klasificira na:

- T – terminalni (engl. *Terminal*)
- L – mala nadmorska visina (engl. *Low altitude*)
- H – velika nadmorska visina (engl. *High altitude*) [13].

S obzirom na klasu u tablici 2 prikazani su dometi odnosno radijusi prijema VOR signala zajedno sa pripadajućim visinama do kojih ima prijema signala.

Generalno radijus prijema signala na nadmorskoj visini od 1000 stopa iznad tla iznosi oko 40 do 45 milja [13]. Ta se udaljenost povećava s nadmorskom visinom i može se opisati izrazom gdje je prema [6] definiran maksimalni teoretski domet R u nautičkim miljama [NM].

$$R = 1.23 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (9)$$

- h_1 – Visina iznad tla u stopama [ft] na kojoj se nalazi prijamnik odnosno zrakoplov.
- h_2 – Visina iznad tla u stopama [ft] na kojoj se nalazi odašiljač odnosno VOR postaja.

Tablica 2. Klase i radijusi dometa VOR odašiljačkih postaja

Klasa VOR odašiljačke postaje	Visine [ft]	radijus prijema [NM]
T	12 000 i manje	25
L	Manje od 18 000	40
H	Manje od 14 500	40
H	Između 14 500 i 17 999	100
H	18 000 do 45 000	130
H	45 000 do 60 000	100

Izvor: [13]



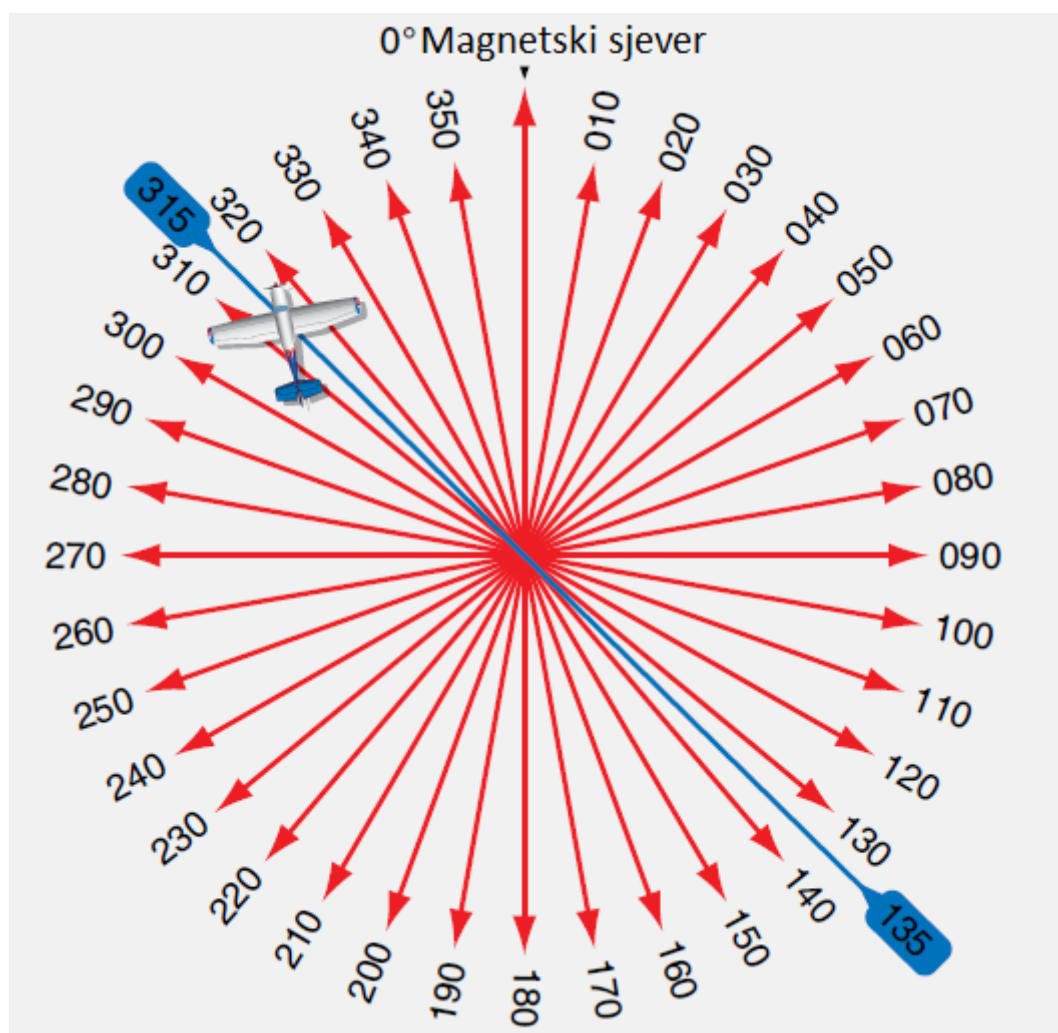
Slika 8. VOR odašiljačka postaja

Izvor: [6]

5.2. Princip rada sustava VOR

Putanja leta je projekcija putanje leta zrakoplova na zemljinu površinu. Smjer putanje leta izražen je stupnjevima u odnosu na pravi ili magnetski sjever, a putanja leta koristeći sustav VOR definirana je radijalima [2].

U odnosu na VOR odašiljačku postaju može se dobiti beskonačan broj radijala koji predstavljaju kut mjeren u smjeru kazaljke na satu od magnetskog sjevera na poziciji VOR odašiljačke postaje do crte radiosmjera na kojoj se nalazi zrakoplov. Ipak, za svrhe uporabe njihov broj limitira se na njih 360 od kojih svaki predstavlja po 1 stupanj u odnosu na sredstvo [12]. Radijali su prikazani na slici 9 gdje centar slike predstavlja VOR, a zrakoplov se nalazi na radijalu 315°.

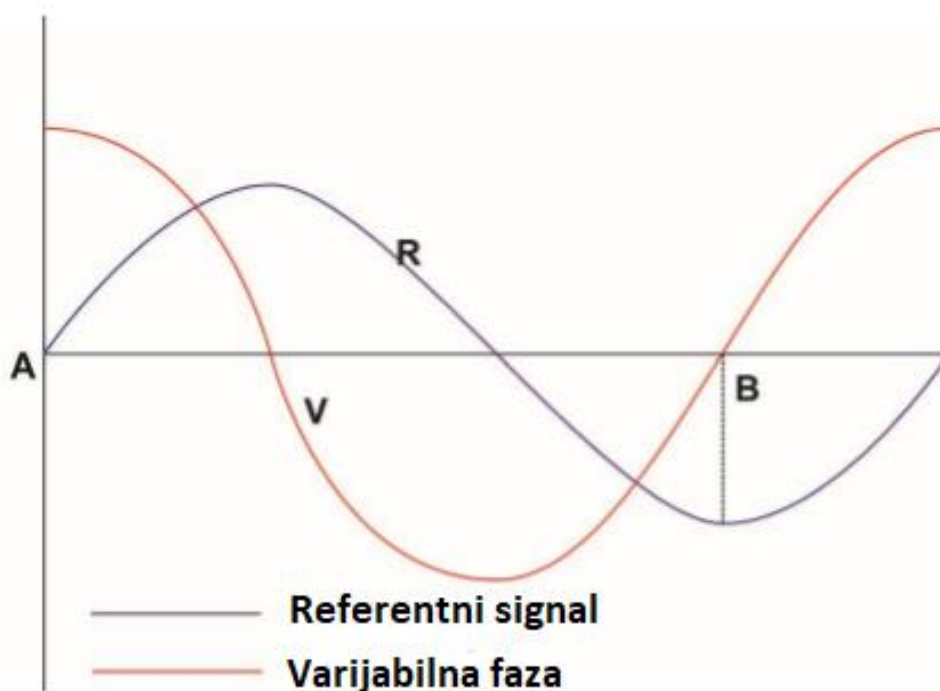


Slika 9. Radijali s pozicije VOR odašiljačke postaje

Izvor: [18]

Određivanje radijala na kojem se prijamnik odnosno zrakoplov nalazi u odnosu na odašiljačku postaju, koristeći sustav VOR, radi se mjereći fazni pomak između dva VHF radio signala. Fazni pomak udaljenost je između najbližih brjegov a ili dolova dvaju valova jednake frekvencije i smjera širenja [6].

VOR odašiljačka postaja odašilje dva signala od kojih je prvi referentni i odašilje se u svim smjerovima istovremeno oko postaje. Referentni signal je frekvencijski modulirani signal, a faza ovog signala je konstantna kroz svih 360 stupnjeva azimuta od sredstva. Drugi signal, nazvan varijabilna faza, emitiran je kao rotacijsko polje amplitudno moduliranog signala koje rotira jednoliko brzinom od 30 okretaja u sekundi te mu faza varira ovisno o azimutu. Dakle, to znači da faza varijabilnog signala varira za svaki jedinstveni stupanj oko postaje. Dva signala su drugačije modulirana kako bi se izbjeglo miješanje signala kod primitka u prijamniku [12].



Slika 10. Referentni signal i varijabilna faza sustava VOR

Izvor: [6]

Na slici 10 grafički je prikazan referentni signal (R) i varijabilna faza (V). Da bi se odredila razlika u fazi razliku između dva signala, prvo je potrebno identificirati položaj nulte faze na svakom od valova. Nakon toga izabrati referencu na referentnom valu npr. u ovom primjeru izabrana je nulta faza. Zatim u pozitivnom smjeru (prema desno), počevši od nulte faze

referentnog vala, izmjeriti fazni kut koji je referentni val putovao prije nego što se na varijabilnoj fazi postigla nulta faza [6].

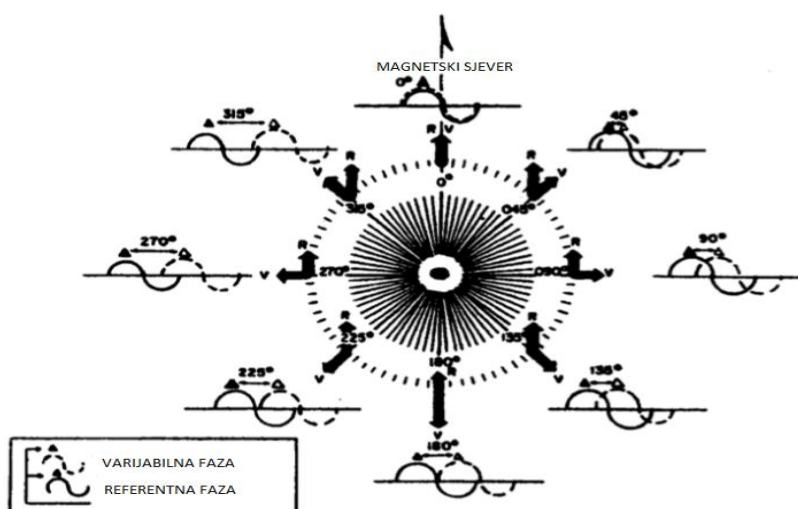
U primjeru na slici 10, počevši od nulte faze na referentnom valu (točka A), vidljivo je da je referentni val prošao fazni kut od 270° prije nego što je nulta faza postignuta na promjenjivom valu (točka B), dakle fazna razlika iznosi 270° [6].

Isto se može prikazati i matematički izrazom (10). Faza referentnog vala u početku je 0° (360°), a faza varijabilnog vala je 090° . Oduzimanje faznog kuta nulte faze varijabilnog vala od faznog kuta nulte faze referentnog vala daje isti rezultat. Ako je rezultat negativan potrebno je samo u računu dodati 360° [6].

$$R - V = 360^\circ - 90^\circ = 270^\circ \quad (10)$$

Dakle ako je razlika u fazi jednaka 270° znači da se zrakoplov nalazi na radijalu 270° ili ako je razlika u fazi jednaka 145° , znači da se zrakoplov nalazi na 145° radijalu.

Kao referenca za mjerenje razlike između faza ovih dvaju VOR radio signala koristi se magnetski sjever. Dva signala baždarena su tako da su na magnetskom sjeveru točno u istoj fazi. Kako se povećava vremenska razlika između primitka dva signala odnosno azimut oko sredstva, analogno raste i razlika u fazi, a to je jasno prikazano na slici 11. Razlika se mjeri elektroničkim putem i konvertira se u stupnjeve te prikazuje vizualno na odgovarajućem prikazniku čime se određuje pozicija zrakoplova azimutom u odnosu na sredstvo [12].



Slika 11. Razlika u fazi između referentnog signala i varijabilne faze s obzirom na radijale

Izvor: [12]

5.3. VOR prikaznik u zrakoplovu

U zrakoplovu se nalaze tri komponente sustava VOR:

- Antena – za sporije zrakoplove najčešće bič/štapna antena na trupu, a za brže zrakoplove antena je u aerodinamičnom kućištu
- Prijamnik – elektronička kutija ugrađena zajedno sa drugom avionikom
- Prikaznik – informacije dobivene od VOR signala prikazuju se vizualno na prikaznicima [6].

Jedan od tih prikaznika je prikaznik odstupanja od radiokursa (engl. *course deviation indicator* – CDI) prikazan na slici 12. Sastoji se od: ručice birača radiokursa, strelica TO – FROM, zastavice otkaza NAV, kazaljke te ljestvice devijacije [14].



Slika 12. CDI prikaznik

Izvor: [9]

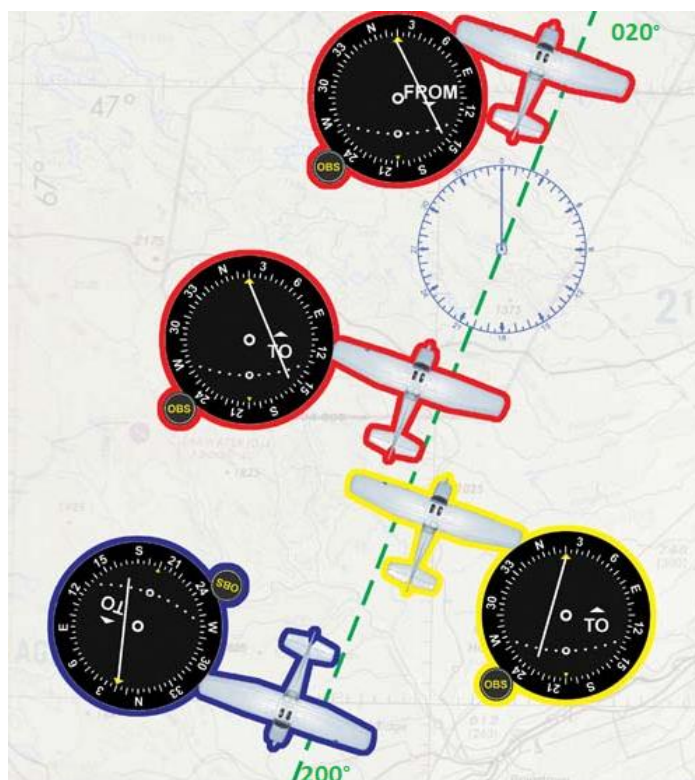
Ručica birača radiokursa (engl. *Omni Bearing Selector* – OBS) kojom pilot može izabrati radiokurs kojim želi letjeti od ili prema VOR sredstvu [14].

Prikaznik TO – FROM izveden u obliku strelice indicira radi li se o približavanju (engl. *Course-to-Station*) ili udaljavanju (engl. *Course-from-station*) zrakoplova od radionavigacijskog sredstva [14].

Zastavica otkaza (engl. *Flag*) ima oznaku NAV i pojavljuje se pri odsutnosti ili nedostatnosti signala VOR odašiljača [14].

Ljestvica devijacije određena je brojem točkica lijevo i desno od središta prikaznika. Svakoj točkici pridruženo je odgovarajuće odstupanje u stupnjevima. Za VOR sustav ukupna devijacija koja se može prikazati na ovom prikazniku je $\pm 10^\circ$ te ovisno o broju točkica svaka točkica predstavlja određenu devijaciju. Ako je 5 točkica sa svake strane, svaka predstavlja devijaciju od 2° [14].

Kazaljka devijacije prikazuje odstupanje od izabranog radijala od VOR odašiljačke postaje s obzirom na ljestvicu devijacije [14].



Slika 13. CDI prikazivanje pri uporabi sustava VOR

Izvor: [15]

Ako zrakoplov nije na radijalu odabranom ručicom birača kursa, CDI će pokazati devijaciju. Centralna točka se može gledati kao zrakoplov, a kazaljka devijacije kao željeni radijal. Ako je

kazaljka pomaknuta desno od centralne točke, zrakoplov treba skrenuti u desno kako bi interceptirao željeni radijal. Na slici 13 opisana situacija prikazana je crvenim zrakoplovom i CDI prikaznikom.

Bitno je napomenuti da ako se zrakoplov udaljava od VOR odašiljačke postaje uz indikaciju TO na CDI prikazniku, imat će obrnuto pokazivanje. Ova situacija prikazana je na slici 13 plavim zrakoplovom i CDI prikaznikom. Dakle ako je kazaljka devijacije otklonjena u desno, a zrakoplov leti u desno kako bi interceptirao željeni radijal, zapravo će se udaljavati od njega. Isto vrijedi za slučaj kada se zrakoplov približava odnosno leti prema VOR odašiljačkoj postaji s indikacijom FROM. Uz to, otklon kazaljke odnosno devijacija ne ovisi o pravcu leta zrakoplova (engl. *heading*), već isključivo o poziciji zrakoplova u odnosu na VOR.

5.4. Uporaba sustava VOR

VOR sredstva koriste se:

- Za definiranje početka, kraja i središnje linije zračnih puteva
- Kao glavno ili pomoćno/rezervno sredstvo korišteno u publiciranim instrumentalnim procedurama na aerodromima
- Za krug čekanja
- Za određivanje položaja zrakoplova u odnosu na VOR sredstvo i let prema/od VOR stanice
- Za navigaciju tijekom rutnog dijela leta [6].

Prije uporabe bitno je identificirati sredstvo slušanjem dvoslovnog ili troslovnog Morseovog koda kojeg VOR postaje odašilju barem svakih 10 sekundi. Također moguće su izvedbe gdje se odašilje glasovna identifikacija ili druge informacije poput meteoroloških informacija [12].

5.5. TEORIJSKA TOČNOST SUSTAVA VOR

Algebarska suma svih grešaka koje dovode do netočnosti sustava VOR naziva se ukupnom pogreškom (engl. *aggregate error*) [12].

Pogrešku na mjestu zemaljske postaje (engl. *site error*) uzrokuje neravan teren poput brda i umjetnih konstrukcija, drveća, pa čak i duge trave u blizini odašiljača. Netočnost poravnavanja pri odašiljanju VOR radijala (engl. *VOR course-displacement error*) se nadzire i obično je unutar $\pm 1^\circ$ [6].

Nakon što su signali napustili VOR odašiljačku postaju s točnošću $\pm 1^\circ$, na prijenos dodatno utječe teren i udaljenost. Na većim udaljenostima može doći do netočnosti u primljenom VOR signalu zbog učinaka difrakcije, refleksije i drugih propagacijskih efekata. Zbog toga dolazi do nesavršenosti u kod primljenog VOR signala što ima za posljedicu sporo ili naglo pomicanje kazaljke devijacije na CDI prikazniku [6].

Uz to postoje pogreške zračne opreme uzrokovane zrakoplovnom opremom koja pretvara fazne razlike u stupnjeve radijala i prikazuje ih. Maksimalna pogreška opreme zrakoplova trebala bi biti $\pm 3^\circ$ [6].

Kada se gore navedene pogreške zbroje daju netočnost od $\pm 5^\circ$. Uz to postoji greška u letenju zbog manje udaljenosti između stupnjeva radijala kako se zrakoplov približava VOR odašiljačkoj postaji [6].

Dijelovi VOR prijemničke i indikatorske opreme se vremenom pogoršavaju što utječe točnost VOR sustava. Najbolje osiguranje održavanja točne VOR prijamničke opreme u zrakoplovu su periodične provjere i umjeravanja barem jednom godišnje. Provjere može izvršiti pilot i u osnovi se sastoje od provjere jesu li VOR radijali zrakoplovne opreme koji su primljeni usklađeni s radijalima koje stanica odašilje. Ne postoje regulatorni zahtjevi za VFR letenje, no u IFR letenju postoje. Zahtijevane tolerancije IFR-a su $\pm 4^\circ$ za zemaljske provjere i $\pm 6^\circ$ za provjere u zraku [13].

Za provjeru točnosti sustava VOR za piloti mogu koristiti: VOR ispitno postrojenje (VOT), ovjerene kontrolne točke u zraku, ovjerene kontrolne točke na aerodromskim površinama [13].

Ako zrakoplov ima ugrađena dva VOR prijemnika, može se izvršiti provjera dvostrukog VOR prijemnika. Da bi izvršio provjeru dvostrukog prijemnika, pilot mora podesiti oba VOR prijemnika na isti VOR i odredi položaj u odnosu na njega. Najveća dopuštena odstupanja u indikaciji radijala između dva navedena prijemnika su 4° [13].

6. Navigacijska oprema zrakoplova 9A-DMB i 9A-DAD

6.1. Navigacijska oprema 9A DMB

9A-DMB je jednomotorni klipni zrakoplov tipa Cessna 172N. Koristi se za obuku pilota u sklopu Hrvatskog zrakoplovnog nastavnog središta i u vlasništvu je Fakulteta prometnih znanosti.



Slika 14. Dio instrument ploče zrakoplova 9A-DMB

Crvenim okvirima i brojevima prema (16) na slici 14 označeni su instrumenti korišteni za eksperimentalni dio rada:

- Brojem 1 – označena su dva instrumenta Garmin G5 koji se mogu koristiti kao primarni letni prikaznik – PFD (engl. *Primary Flight Display*) ili kao prikaznik horizontalne situacije – HSI (engl. *Horizontal Situation Indicator*).

PFD Garmin G5 prikazuje: indiciranu i putnu brzinu, visinu, klizanje, skretanje, nagib, brzinu uzdizanja i spuštanja.

HSI Garmin G5 prikazuje: smjer leta pomoću okretne kompasne ruže, odstupanje od željenog radiokursa dobivenog od VOR stanice ili od GNSS sustava. Također prikazuje i putnu brzinu, udaljenost do sljedeće točke, trenutni smjer leta i crtu puta.

- Brojem 2 - označen je CDI za određivanje odstupanja od zadanog radiokursa radionavigacijskog sredstva, u nastavku rada referiran je kao CDI DMB
- Brojem 3 - označen je Garmin GTN750 odnosno instrument koji omogućava navigaciju pomoću GNSS sustava. Opremljen je prijamnikom GPS i SBAS signala i zbog visoke preciznosti koristi se za instrumentalne prilaze kao i za rutni dio letenja. Pruža i mogućnost za navigaciju pomoću konvencionalnih sustava poput sustava VOR. Na zaslonu prikazuje trenutnu poziciju zrakoplova, izabranu putanje i druge odabrane informacije. Na GTN750 se izabiru komunikacijske i navigacijske frekvencije poput onih za VOR. Povezan je s Garmin G5 instrumentima na kojima se prikazuju prethodno opisane informacije sukladno odabranom na GTN750.
- Brojem 4 – označen je Garmin GTN 650 koji je zapravo manja verzija GTN750 i koristi se kao rezervni sustav u slučaju otkaza. Na njemu se odabiru i navigacijske frekvencije povezane s CDI prikaznikom označenog s brojem 2.
- Brojem 5 – označena je oprema za mjerenje udaljenosti od odabranog radionavigacijskog sredstva (VOR) [16].

Zrakoplov je uz navedenu opremu opremljen i: brzinomjerom, visinomjerom, koordinatorom skretanja, EDM-900 instrumentom za parametre motora, variometrom, prikaznikom stranskog kuta i drugima [16].

6.2. Navigacijska oprema 9A DAD

9A-DAD je jednomotorni klipni zrakoplov tipa Cessna 172R. Također se koristi za obuku pilota u sklopu Hrvatskog zrakoplovnog nastavnog središta i u vlasništvu je Fakulteta prometnih znanosti. Ima nešto manje naprednu opremu u odnosu na 9A-DMB.

Na slici 15 brojevima su prema (17) označeni instrumenti korišteni u eksperimentalnom djelu rada:

- Brojem 1 - označen je CDI za određivanje odstupanja od zadanog radiokursa radionavigacijskog sredstva, dalje u radu ovaj CDI je referiran kao CDI 1

- Brojem 2 - također je označen CDI koji je dalje u radu referiran kao CDI 2
- Brojem 3 – označen je Bendix King KLN 89 GPS sustav koji prikazuje direktnu crtu puta prema odabranoj točki ili sredstvu, devijaciju od željene crte puta, crtu puta kojom leti zrakoplov, udaljenost do odabrane točke/sredstva, putnu brzinu itd.
- Brojem 4 – označena su dva Bendix KX 155A VH s KI 208/9 indikatorom. Služe za postavljanje i prijem frekvencija za komunikaciju i radionavigaciju. Gornji od njih je povezan s CDI 1, a donji s CDI 2. Jedna od mogućnosti im je i digitalno prikazivanje radijala što se također koristi za mjerenje točnosti u eksperimentalnom djelu rada. Gornji od njih je u radu referiran kao DIGIT 1, a donji DIGIT 2.
- Brojem 5 – označena je oprema za mjerenje udaljenosti zrakoplova od odabranog radionavigacijskog sredstva poput [17].



Slika 15. Dio instrument ploče zrakoplova 9A-DAD

7. Eksperiment određivanja točnosti sustava VOR

7.1. Opis izvođenja eksperimenta

Eksperimentom je testirana točnost letenja korištenjem sustava VOR. Za utvrđivanje točnosti napravljeno je nekoliko eksperimentalnih letova sa zrakoplovima 9A-DMB i 9A-DAD. Letovi su izvedeni tako da je kao primarni i referentni navigacijski sustav korišten GNSS sustav. Neka od mjerenja su napravljena tijekom trenažnih letova stoga nisu napravljena na velike udaljenosti zbog ograničenja vremena trajanja leta i kontrole letenja.

Na GTN 750 odnosno na Bendix King KLN 89 GPS sustav postavljena je određena crta puta prema ili od radionavigacijskog sredstva. Zrakoplovom se uz visoku preciznost leti zadanom crtom puta, pošto GPS sustav kontinuirano daje informacije o crti puta koju zrakoplov održava uzimajući u obzir vjetar. Za eksperiment je greška GNSS sustava zanemariva pa se uzima pretpostavka da je apsolutno točan.

Na radionavigacijske prijemnike postavljena je frekvencija radionavigacijskog sredstva prema ili od kojeg se leti te ista crta puta odnosno radijal određen GNSS sustavom postavljen je na CDI prikaznik ručicom birača radiokursa. Također ista frekvencija postavljena je na opremu za mjerenje udaljenosti od radionavigacijskog sredstva.

Takvim načinom postavljanja može se pratiti devijacija tj. odstupanje koje prikaznik VOR sustava CDI pokazuje svaku milju. Ako tijekom leta dođe do nepreciznosti u letenju, to je prikazano na GPS-u te je taj podatak zabilježen i za taj iznos je smanjena izmjerena devijacija na CDI-u. Izmjereni podaci su onda dalje statistički obrađeni i prikazani. Devijacija koju prikazuje CDI je zapravo kumulativna netočnost VOR sustava koja uključuje sumu svih netočnosti opisanih u poglavlju 4.5.

Analizom rezultata cilj je utvrditi odgovara li točnost sustava VOR u praksi pretpostavljenoj točnosti u poglavlju 4.5 prema kojoj je točnost poravnanja radijala obično unutar ± 1 stupanj, no veća odstupanja moguća su zbog grešaka kod prijemničke opreme. Također bit će provjereno je li zadovoljena propisana točnost za IFR letenje.

Pošto točnost sustava VOR ovisi o točnosti prijemničkih sustava i prikaznika u zrakoplovu bilo bi netočno uzeti aritmetičku sredinu svih odstupanja na oba zrakoplova skupa kao grešku

sustava VOR. Stoga, mjerenja za svaki zrakoplov su obrađena zasebno te su na kraju rezultati uspoređeni.

7.2. Mjerenja na 9A-DMB

7.2.1. VOR LAK

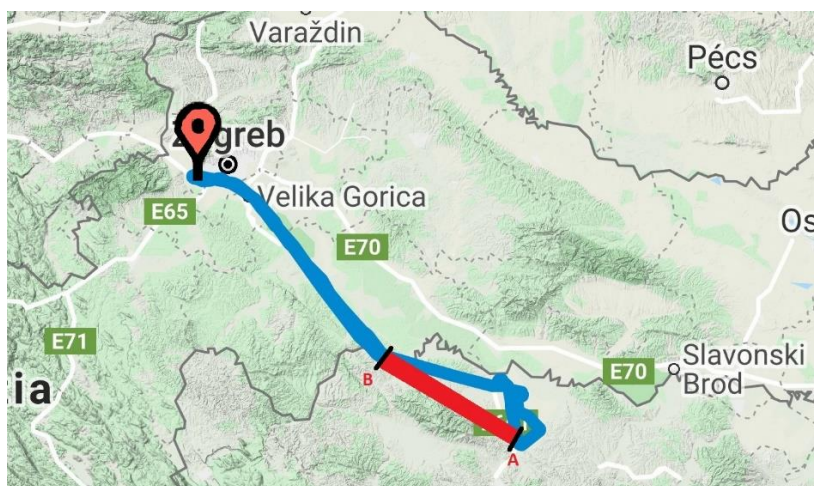
Mjerenja su izvedena 19.8.2020 između 16:20 i 16:40h za vrijeme trenažnog leta. Korišten je zrakoplov 9A-DMB pri letu od VOR LAK s aerodroma Banja Luka prema aerodromu Lučko.

LAK je VOR/DME frekvencije 115.3 MHz i klasificiran je kao tip L dometa 50NM [18].

GTN750 je postavljen na radijal odnosno crtu puta 296 od LAK prema IFR točki TEBLI preko GNSS sustava. Na GTN650 postavljena je frekvencija VOR LAK 115.3 MHz te radijal 296 na CDI. Opisane postavke vidljive su na slici 16. Crta puta je na slici 17 označena crvenom linijom između točki A i B. Npr. na opremi za mjerenje udaljenosti vidi se 17 milja, crta puta po GNSS-u je potpuno poravnata što je prikazano na G5 HSI-u i GTN750, a odstupanje po CDI DMB je 4 stupnja. Zabilježena mjerenja prikazana su tablicom 3.



Slika 16. Postavke instrumenata na zrakoplovu 9A-DMB za mjerenje točnosti sustava VOR pri odletu od VOR LAK



Slika 17. Crta puta pri mjerenju na VOR LAK

Tablica 3. Mjerenja na VOR LAK - Banja Luka, radijal 296, zrakoplov 9A-DMB

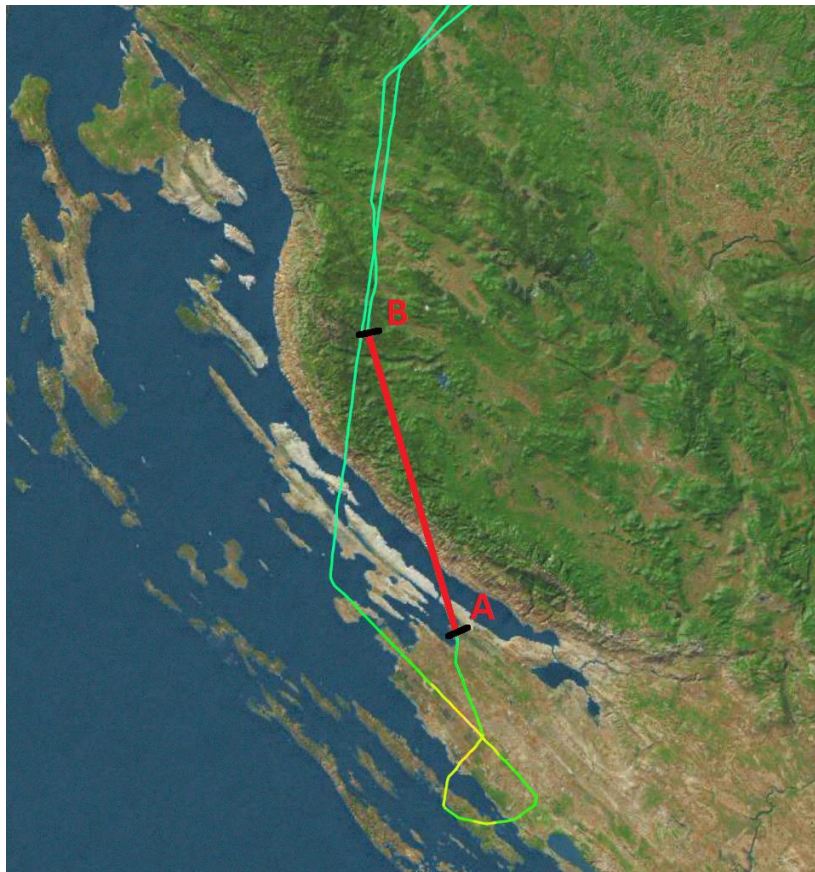
Udaljenost [NM]	CDI DMB odstupanje [stupnjevi]
9	3
10	3
11	3
12	4
13	4
14	4
15	4
16	4
17	4
18	4
19	4
20	4
21	4
22	4
23	5
24	5
25	5
26	4
27	5
28	5
29	5
30	5

7.2.2. VOR ZDA

Drugi dio mjerenja na zrakoplovu 9A-DMB, izveden je na povratku s trenažnog leta iz Zadra prema Lučkom 21.8.2020. pri čemu je korišten VOR ZDA.

ZDA je VOR/DME frekvencije 108.6 MHz klase H i dometa od 100 NM osim u sektorima QDR 334°-044° i QDR 124°-274° gdje mu je domet nešto manji zbog prepreka terena [19].

GTN750 je postavljen na radijal odnosno crtu puta 320 od ZDA preko GNSS sustava. Izabrana crta puta je predstavljena crvenom linijom na slici 18. Namjerno je izabran radijal 320 kako bi se preciznije mogao izabrati radijal na CDI-u. Na GTN650 postavljena je frekvencija VOR ZDA 108.6 MHz te radijal 320 na CDI. Zabilježena mjerenja prikazana su u tablici 4.



Slika 18. Crta puta pri mjerenju na VOR ZDA

Tablica 4. Mjerenja na VOR ZDA – Zadar, radijal 320, zrakoplov 9A-DMB

Udaljenost [NM]	CDI DMB odstupanje [stupnjevi]
12	0.5
13	0.5
14	0.5
15	0.5
16	0.5
17	1
18	1

19	1
20	1
21	1
22	1
23	1
24	1
25	0.5
26	0.5
27	0.5
28	0

7.3. Mjerenje na 9A-DAD

Eksperimentalni let koristeći zrakoplov 9A-DAD izveden je 26.8.2020. tijekom leta od aerodroma Lučko prema aerodromu Osijek. Za mjerenja je korišten VOR VBA.

VBA je VOR/DME frekvencije 117.4 MHz klase H i dometa od 80 NM osim u sektorima QDR 114°-159° [19].

Bendix King KLN 89 GPS postavljen je na crtu puta 090 prema VOR VBA. Također je namjerno je izabran radijal 090 kako bi se eliminirala greška pri izabiranju radijala na CDI-u. Na Bendix KX 155A VH s KI 208/9 indikatorom postavljena je frekvencija VOR VBA 117.4 MHz. Mjerenja su napravljena pri doletu prema VBA (na slici 19 crta puta predstavljena crvenom linijom od A do B) i pri odletu od VBA (na slici 19 crta puta predstavljena crvenom linijom od C do D). Pri doletu je bio postavljen radijal 270 na CDI odnosno 090 s indikacijom TO, a pri odletu radijal 100 s indikacijom FROM. Bilježena su odstupanja na CDI 1, CDI 2 kao i na digitalnim indikatorima s KI 208/9. Zabilježena mjerenja su prikazana tablicom 5 i 6.



Slika 19. Crta puta pri mjerenju na VOR VBA

Tablica 5. Mjerenja na VOR VBA – Velika Barna, radijal 270, zrakoplov 9A-DAD

Udaljenost [NM]	CDI 1 odstupanje [stupnjevi]		CDI 2 odstupanje [stupnjevi]	
	Analogni	Digitalni	Analogni	Digitalni
40	1.5	1	5	0
39	1.5	0	5	0
38	1	0	4.5	0
37	1	0	4.5	0
36	1	0	4	0
35	1	0	4	0
34	1	0	4	0
33	1	0	4	0
32	0	0	4	1
31	0.5	1	4	1
30	0.5	1	4	1
29	1	1	4.5	1
28	1	0	4	1
27	1	0	4	0
26	1.5	0	4	0
25	1	0	4.5	0
24	1	0	5	0
23	0	0	4	0
22	1	0	4	1
21	1.5	1	5	0
20	2	2	6	1
19	1.5	1	5	0
18	1	0	5.5	0
17	1.5	1	6	1
16	1	0	5	0
15	1	0	5	0
14	1	0	5	0
13	1.5	0	5	0
12	1.5	1	5.5	0
11	1.5	1	5.5	0
10	1.5	0	5	0
9	1.5	0	5	0
8	2	1	5.5	1
7	2	1	6	0
6	1.5	0	5	1
5	2	1	6.5	1
4	2.5	1	7	1
3	3	1	5	1

Tablica 6. Mjerenja na VOR VBA – Velika Barna, radijal 100, zrakoplov 9A - DAD

Udaljenost [NM]	CDI 1 devijacija [stupnjevi]		CDI 2 devijacija [stupnjevi]	
	Analogni	Digitalni	Analogni	Digitalni
7	1.5	0	4	0
8	1	0	4	1
9	1	1	4	1
10	1	0	4	1
11	1.5	0	4	1
12	2	0	5	0
13	2	0	5	0
14	2	0	4.5	0
15	2	0	4.5	0
16	2	0	4.5	0
17	2	1	4.5	0
18	2	0	4	0
19	1.5	0	4	1
20	1.5	0	4	0
21	2	0	4	1
22	1.5	0	4	1
23	1.5	1	4	2
24	1.5	1	4	1
25	1.5	1	4	1
26	1.5	1	4	1
27	1	0	4	1
28	1.5	1	4	1
29	1	0	4	1
30	1	1	4	2
31	1	1	4	1
32	0.5	1	3	2
33	1.5	0	4	1
34	1.5	0	4	1
35	1.5	0	4	1
36	2	0	5	0
37	1	0	4	0
38	1.5	0	4.5	0
39	1.5	0	4	0
40	2	1	5	1

7.4. Analiza i usporedba rezultata mjerenja

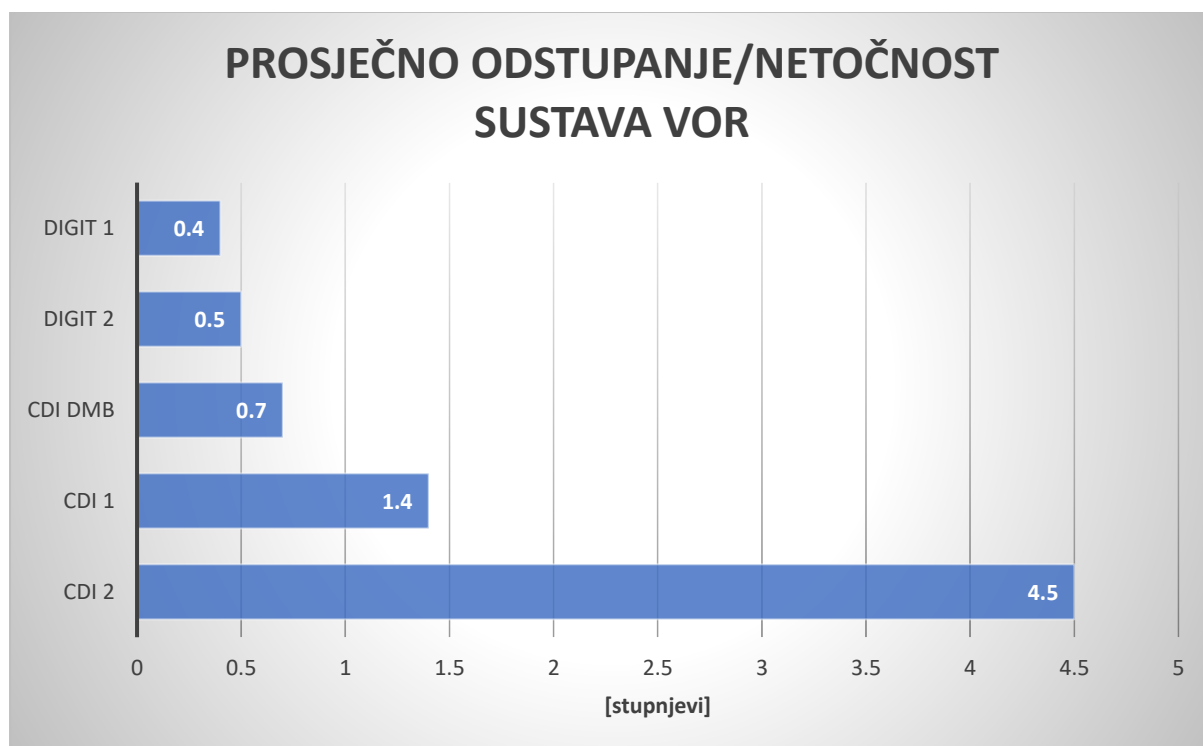
Koristeći Microsoft Excel i funkcije za izračunavanje srednje vrijednosti dobiveni su sljedeći rezultati:

Prosječna devijacija izmjerena na CDI prikazniku zrakoplova 9A-DMB (CDI DMB) iznosi: 0.7 stupnjeva.

Prosječna devijacija izmjerena na prikaznicima zrakoplova 9A-DAD je sljedeća:

- Za CDI 1 DAD iznosi 1.4 stupnja
- Za CDI 2 DAD iznosi 4.5 stupnjeva
- Za DIGIT1 indikator iznosi 0.4 stupnja
- Za DIGIT2 indikator iznosi 0.5 stupnja.

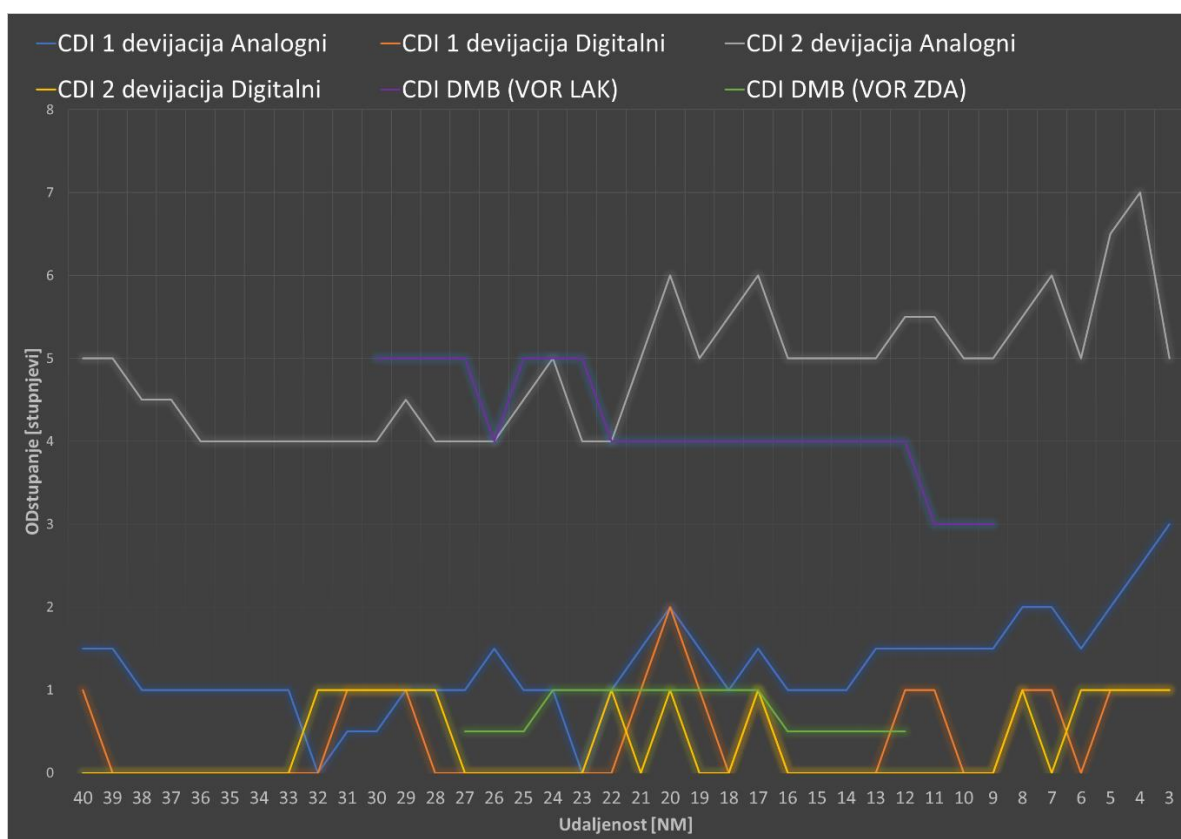
Navedeni rezultati za oba zrakoplova grafički su prikazani na grafikonu 1.



Grafikon 1. Prikaz prosječnog odstupanja odnosno netočnosti sustava VOR ovisno o zrakoplovnim prikaznicima

Dakle najmanju devijaciju odnosno najveću točnost imaju digitalni KI 208/9 indikatori (DIGIT 1 i 2), slijedi ih CDI na zrakoplovu 9A-DMB i tek onda prikaznici na zrakoplovu 9A-DAD CDI 1 i CDI 2.

Mjerenja iz tablice 3 posebno su obrađena pošto ih treba uzeti s rezervom jer je postavljeni radijal bio 296 pa postoji šansa za netočnost pri selektiranju željenog radijala. Mjerenja su ipak iznenađujuća pošto je radijal selektiran s velikom pažnjom i preciznošću što se može vidjeti na slici 16. Uz to, očekivano bi bilo da se s povećanjem udaljenosti devijacija smanjivala pošto je na većoj udaljenosti udaljenost između jednog stupnja veća, no događalo se obrnuto. Na grafikonu 2 vidljivo je trend povećanja odstupanja s udaljenošću kod svih mjerenja osim kod ovog. Ovoj netočnosti mogle su pridonijeti smetnje zbog terena ili mala snaga odašiljačke postaje VOR LAK, iako je zrakoplov bio unutar dometa sredstva po specifikacijama sredstava zajedno sa zvučnom identifikacijom primanja signala. To je dokaz da u određenim uvjetima može doći do većih netočnosti kod korištenja sustava VOR kao što je opisano u poglavlju 4.5. To je bio slučaj za ovo mjerenje gdje je prosječna netočnost bila 4.2 stupnja što je ipak u granicama tolerancije za IFR pri zračnoj provjeri točnosti i unutar moguće predviđene netočnosti.



Grafikon 2. Prikaz odstupanja točnosti sustava VOR s obzirom na udaljenost

Uvjetna provjera točnosti GNSS sustava korištenih u zrakoplovu provjerena je i snimajući crtu puta aplikacijom Mytracks koristeći uređaj Apple iPad (2018). Snimljena je crta puta za let zrakoplova 9A-DMB pri odletu od VOR LAK i crta puta za let zrakoplova 9A-DAD pri doletu i odletu od VOR VBA. Iz aplikacije Mytrack izvedene su .gpx datoteke u kojima su zabilježene geografske koordinate za svaku točku na snimljenoj crti puta. Koristeći program EasyGPS određene su dvije krajnje točke odnosno koordinate na dijelu gdje su provedena mjerenja za određivanje točnosti sustava VOR. Koristeći skripte s web stranice (20), unošenjem geografske širine i dužine krajnjih točaka određen je radijal koji je snimljen na Ipad uređaju. Rezultati navedene analize su da se radijal kojim se letilo na eksperimentalnom letu od Zadra, zrakoplovom 9A-DMB, u potpunosti poklapa sa zabilježenom crtom puta. Kod zabilježene crte puta pri letu na zrakoplovu 9A-DAD prema i od VOR VBA zabilježeno je odstupanje od 2 stupnja. Ne može se sa sigurnošću reći da je GPS crta puta snimljena iPad uređajem točnija od crte puta koju je indicirao GPS sustav zrakoplova 9A-DAD, no postoji mogućnost za to.

Eksperimentom je potvrđen teorijski dio točnosti sustava VOR, pošto razlike u mjerenju potvrđuju da se netočnosti događaju upravo zbog VOR prijemničke i indikatorske opreme koja se kroz vrijeme pogoršava. To je posebno očito kod mjerenja izvršenih na zrakoplovu 9A-DAD gdje su često u isto vrijeme zabilježene 4 različite indikacije odstupanja od zadanog radijala na VOR prikaznicima. Indikacije na digitalnim prikaznicima su bile iznimno točne što znači da VOR zemaljska postaja ipak odašilje signale s dobrim poravnanjem, no drugi prikaznici griješe. Na digitalnim prikaznicima i novijem analognom CDI DMB odstupanja su unutar granica ± 1 stupanj kao što je predviđeno u teoriji, dok stariji CDI prikaznici na 9A DAD imaju veću grešku što je posebno očito na CDI 2. Pri provjeri dvostrukog prijemnika gdje je dopušteno da se dva CDI prikaznika razlikuju u indikaciji za maksimalno 4 stupnja, 9A-DAD je unutar tolerancije točnosti iako na samoj granici.

8. Zaključak

Visokofrekvencijski svesmjerni radiofar (VOR) moderno je radionavigacijsko sredstvo sa širokom primjenom u zrakoplovnoj navigaciji. VOR sustav čine zemaljska odašiljačka postaja i odgovarajuća prijemnička i prikaznička oprema u zrakoplovu. Sustav VOR za odašiljanje signala koristi radiovalove, a uvjet je da odašiljačka postaja i zrakoplov budu unutar zone vidljivosti. Mjerenjem razlike u fazi između primljenih signala u prijemniku zrakoplova može se na odgovarajućim prikaznicima prikazati radijal na kojem se nalazi zrakoplov.

Iako sustav operira u VHF području za kojeg su karakteristične male smetnje pri širenju elektromagnetskih valova, postoji više drugih faktora zbog kojih može doći do netočnosti sustava VOR. Faktori koji utječu na točnost sustava VOR su: greške zemaljske odašiljačke postaje, prepreke, efekti pri širenju elektromagnetskih valova i deterioracije točnosti dijelova prijemničke i indikatorske opreme sustava VOR u zrakoplovu.

Teorijski je predviđeno, a eksperimentalno potvrđeno da najveću netočnost donosi deterioracija točnosti dijelova prijemničke i indikatorske opreme sustava VOR u zrakoplovu. Zbog toga svaki zrakoplov ima različitu točnost pri korištenju sustava VOR i točnost mu ovisi najviše upravo o umjerenosti instrumenata. Izmjereno je da zrakoplov ima najveću točnost pri uporabi sustava VOR ako se koriste digitalni prikaznici. U tom slučaju izmjerena je točnost unutar ± 0.5 stupnjeva. Koristeći analogne prikaznike (poput CDI prikaznika korištenih u eksperimentu) izmjerena točnost varira od ± 0.7 do ± 4.5 stupnjeva ovisno o prikazniku. U ekstremnim slučajevima zbog navedenih faktora koji utječu na točnost u kombinaciji s pogreškom pri selektiranju radijala, za inače najtočniji CDI prikaznik kojem je točnost obično bila unutar ± 0.7 stupnjeva, izmjereno je prosječno odstupanje od ± 4.2 stupnja.

Literatura

- [1] Novak D. *Zrakoplovna računska navigacija*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti; 2012.
- [2] Novak D. *Zrakoplovna prostorna navigacija*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti; 2015.
- [3] Hrvatska enciklopedija. *Navigacija*. Preuzeto sa:
<https://enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=43139#poglavlje23450> [Pristupljeno: lipanj 2020.].
- [4] Hrvatska enciklopedija. *Valovi*. Preuzeto sa:
<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=63780> [Pristupljeno: lipanj 2020.].
- [5] Autodraw. <https://www.autodraw.com/> [Pristupljeno: lipanj 2020.].
- [6] CAE Oxford Aviation Academy. *ATPL Book 11 Radio Navigation*; 2014.
- [7] Hrvatska enciklopedija. *Elektromagnetski valovi*. Preuzeto s:
<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=17633> [Pristupljeno: lipanj 2020.].
- [8] Preuzeto s: <https://cushmanchronicle.com/3428/arts/electromagnetic-spectrum-what-is-it/> [Pristupljeno: srpanj 2020.].
- [9] *ZN2 Handout*. Zrakoplovna navigacija 2 [Moodle]. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti.
- [10] Hrvatska enciklopedija. *Radiovalovi*. Preuzeto s:
<https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=51511> [Pristupljeno: lipanj 2020.].
- [11] *Satelitski navigacijski sustavi*. Zrakoplovna navigacija 2 [Moodle]. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti.
- [12] CASA. *Operational Notes on VHF Omni Range (VOR)*. Preuzeto sa:
<https://www.casa.gov.au/files/vhf-omni-range-vor-0> [Pristupljeno: kolovoz 2020.].
- [13] The Federal Aviation Administration. *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge Chapter 16: Navigation*; 2014. Preuzeto s:
https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak/
[Pristupljeno: kolovoz 2020.].
- [14] Bucak, T., Zorić I. *Zrakoplovni instrumenti i prikaznici*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti; 2002.

- [15] Preuzeto s:
http://www.scottsasha.com/aviation/handbook/vor/VOR_navigation.html
[Pristupljeno: kolovoz 2020.].
- [16] Cessna. *Pilot's operating handbook Skyhawk model 172N*, Registration 9A-DMB, Revision 1; 2020.
- [17] Cessna. *Pilot's operating handbook Skyhawk model 172R*, Registration 9A-DAD, Revision 9; 2004.
- [18] Služba zrakoplovnih informacija Bosne i Hercegovine. *eAIP*. Preuzeto s:
<https://eaip.bhansa.gov.ba/2020-08-13-AIRAC/html/index-en-GB.html> [Pristupljeno: kolovoz 2020.].
- [19] Hrvatska kontrola zračne plovidbe. *eAIP*. Preuzeto s:
<https://www.crocontrol.hr/UserDocsImages/AIS%20produkti/eAIP/start.html>
[Pristupljeno: kolovoz 2020.].
- [20] Preuzeto s: <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html> [Pristupljeno: kolovoz 2020.].

Popis kratica

NDB	(Non Directional Beacon) Neusmjereni radiofar
VOR	(Very High Frequency Omnidirectional Radio Range) Visokofrekvencijski svesmjerni radiofar
DME	(Distance measuring equipment) Oprema za mjerenje udaljenosti
ILS	(Instrument Landing System) Sustav za precizno prilaženje prema instrumentima
VFR	(Visual Flight Rules) Pravila vizualnog letenja
VMC	(Visual Meteorological Conditions) Vizualni meteorološki uvjeti
IFR	(Instrumental Flight Rules) Pravila instrumentalnog letenja
IMC	(Instrumental Meteorological Conditions) Instrumentalni meteorološki uvjeti
VLF	(Very Low Frequency) Vrlo niske frekvencije
LF	(Low Frequency) Niske frekvencije
MF	(Medium Frequency) Srednje frekvencije
HF	(High Frequency) Visoke frekvencije
VHF	(Very High Frequency) Vrlo visoke frekvencije
UHF	(Ultra High Frequency) Ultra visoke frekvencije
SHF	(Super High Frequency) Supervisoke frekvencije
EHF	(Extremely High Frequency) Ekstremno visoke frekvencije
GNSS	(Global Navigation Satellite System) Globalni navigacijski satelitski sustav
GPS	(Global Positioning System)
GLONASS	(Global Orbiting Navigation Satellite System)
CVOR	(Conventional VOR)
BVOR	(Broadcast VOR)
DVOR	(Doppler VOR)
TVOR	(Terminal VOR)
VOT	(VOR Test Facility)
VORTAC	(VOR Tactical Air Navigation System)
TACAN	(Tactical Air Navigation System)
DBVORTAC	(Doppler VORTAC)
T	(Terminal) Terminalan

L	(Low altitude) Mala nadmorska visina
H	(High altitude) Velika nadmorska visina
CDI	(Course deviation indicator) Prikaznik odstupanja od radiokursa
OBS	(Omni Bearing Selector) Ručica birača radiokursa
HSI	Horizontal Situation Indicator) Prikaznik horizontalne situacije
PFD	Primary Flight Display) Primarni letni prikaznik

Popis slika

Slika 1. Sinusoidni val s pojašnjenjima	4
Slika 2. Spektar elektromagnetskih valova	6
Slika 3. Elektromagnetsko polje	7
Slika 4. Širenje elektromagnetskih valova	8
Slika 5. Prijenos informacija od odašiljača prema prijatelju	9
Slika 6. Određivanje pozicije koristeći tri satelita	12
Slika 7. Područje primanja signala VOR sustava	14
Slika 8. VOR odašiljačka postaja	16
Slika 9. Radijale s pozicije VOR odašiljačke postaje	17
Slika 10. Referentni signal i varijabilna faza sustava VOR	18
Slika 11. Razlika u fazi između referentnog signala i varijabilne faze s obzirom na radijale ...	19
Slika 12. CDI prikaznik	20
Slika 13. CDI prikazivanje pri uporabi sustava VOR	21
Slika 14. Dio instrument ploče zrakoplova 9A-DMB	24
Slika 15. Dio instrument ploče zrakoplova 9A-DAD	26
Slika 16. Postavke instrumenata na zrakoplovu 9A-DMB za mjerenje točnosti sustava VOR pri odletu od VOR LAK	28
Slika 17. Crta puta pri mjerenju na VOR LAK	29
Slika 18. Crta puta pri mjerenju na VOR ZDA	30
Slika 19. Crta puta pri mjerenju na VOR VBA	31

Popis tablica

Tablica 1. Frekvencijska područja radiovalova i njihova uporaba u zrakoplovstvu	10
Tablica 2. Klase i radijusi dometa VOR odašiljačkih postaja.....	16
Tablica 4. Mjerenja na VOR LAK - Banja Luka, radijal 296, zrakoplov 9A-DMB.....	29
Tablica 5. Mjerenja na VOR ZDA – Zadar, radijal 320, zrakoplov 9A-DMB.....	30
Tablica 6. Mjerenja na VOR VBA – Velika Barna, radijal 270, zrakoplov 9A-DAD	32
Tablica 7. Mjerenja na VOR VBA – Velika Barna, radijal 100, zrakoplov 9A - DAD	33

Popis grafikona

Grafikon 1. Prikaz prosječnog odstupanja odnosno netočnosti sustava VOR ovisno o zrakoplovnim prikaznicima34

Grafikon 2. Prikaz odstupanja točnosti sustava VOR s obzirom na udaljenost.....35



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 **Eksperimentalno određivanje točnosti sustava VOR**

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

U Zagrebu, _____ 8.9.2020. _____

Student/ica:

Dominik Majstorović

(potpis)