

# Prilog unapređenju terestričke navigacije laserskim sustavom

---

**Kos, Serđo**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**1994**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:188:392972>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-26**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka Library - SVKRI Repository](#)



**S V E U Č I L I Š T E U R I J E C I**  
**P O M O R S K I F A K U L T E T**  
**R I J E K A**

**Serđo Kos**

**PRILOG UNAPREĐENJU TERESTRIČKE  
NAVIGACIJE LASERSKIM SUSTAVOM**

**Doktorska disertacija**

**SVEUČILIŠNA KNJIŽNICA  
R I J E K A**



**930000237**

Rijeka, 05. rujana, 1994.

## I. AUTOR

Ime i prezime:	SERDO KOS
Datum i mjesto rođenja:	24. siječnja 1957.
Mjesto i naziv završene srednje škole:	Tehnička škola u Rijeci
Mjesto i naziv završenog fakulteta:	Fakultet za pomorstvo i saobraćaj u Rijeci
Mjesto i naziv fakulteta na kojem je magistrirao:	Fakultet za pomorstvo i saobraćaj u Rijeci

---

## II. DISERTACIJA

Naslov: PRILOG UNAPREĐENJU TERESTRIČKE NAVIGACIJE LASERSKIM SUSTAVOM

Ustanova na kojoj je izrađena:	Pomorski fakultet u Rijeci
Broj stranica, slika ...	130 str., 33 slike, 74 formule
Znanstvena oblast i područje:	TEHNIČKA ZNANSTVENA OBLAST ZNANSTVENO PODRUČJE TEHNOLOGIJE PROMETA
Fakultet na kojem je izvršena obrana:	Pomorski fakultet u Rijeci

---

## III. OCJENA I OBRANA

Datum prijave teme:	21. listopada 1992.
Datum predaje rada:	rujan 1994.
Datum sjednice Vijeća na kojoj je rad prihvaćen:	17. listopada 1994.
Sastav komisije koja je rad ocijenila:	

- 1/ Dr. sc. IVICA VUKUŠIĆ
- 2/ Dr. sc. DINKO ZOROVIĆ
- 3/ Dr. sc. DUŠKO VRANIĆ
- 4/ Dr. sc. ANTE TIĆAC

Sastav komisije pred kojom je rad obranjen:

- 1/ Dr. sc. DUŠKO VRANIĆ
- 2/ Dr. sc. IVICA VUKUŠIĆ
- 3/ Dr. sc. DINKO ZOROVIĆ
- 4/ Dr. sc. ANTE TIĆAC

Datum obrane rada:	21. listopada 1994.
Datum promocije:	

14. 06. 1996.

## PODACI I INFORMACIJE O DOKTORANDU

1. Ime i prezime : SERĐO KOS  
2. Datum i mjesto rođenja : 24. 01. 1957., Rijeka  
3. Mjesto i adresa stanovanja : Rijeka, Bujska br. 20  
4. Naziv fakulteta i godina diplomiranja i magistriranja : POMORSKI FAKULTET, RIJEKA  
diplomirao: 31. 03. 1986.  
magistrirao: 05. 02. 1992.

## INFORMACIJE O DOKTORSKOJ DISERTACIJI

1. Naslov disertacije : PRILOG UNAPREĐENJU TERES-  
TRIČKE NAVIGACIJE LASERSKIM  
SUSTAVOM  
2. Fakultet na kojem je  
disertacija obranjena : POMORSKI FAKULTET, RIJEKA

## OCJENA I OBRANA DOKTORSKE DISERTACIJE

1. Datum prijave disertacije : 21. 10. 1992.  
2. Datum sjednice Fakultetskog  
vijeća na kojoj je disertacija  
prihvaćena : 17. 10. 1994.  
3. Članovi povjerenstva za ocjenu disertacije:  
1/ Dr. sc. IVICA VUKUŠIĆ, Imperial College, University  
of London  
2/ Dr. sc. DINKO ZOROVIĆ, redovni profesor Pomorskog  
fakulteta u Rijeci  
3/ Dr. sc. DUŠKO VRANIĆ, izvanredni profesor Pomorskog  
fakulteta u Rijeci  
4/ Dr. sc. ANTE TIĆAC, docent Pomorskog fakulteta u  
Rijeci  
4. Članovi povjerenstva za obranu disertacije:  
1/ Dr. sc. DUŠKO VRANIĆ, izvanredni profesor Pomorskog  
fakulteta u Rijeci  
2/ Dr. sc. IVICA VUKUŠIĆ, Imperial College, University  
of London  
3/ Dr. sc. DINKO ZOROVIĆ, redovni profesor Pomorskog  
fakulteta u Rijeci  
4/ Dr. sc. ANTE TIĆAC, docent Pomorskog fakulteta u  
Rijeci  
5. Datum obrane : 21. 10. 1994.

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET U RIJECI  
RIJEKA

Klasa: 602-04/94-01/7  
Urbroj: 2170-57-02-94-1

Rijeka, 18.10.1994.

Na temelju članka 168. Zakona o visokim učilištima ("Narodne novine RH" br. 96/93), a u vezi s člankom 90. bivšeg Zakona o znanstvenoistraživačkoj djelatnosti RH, Fakultetsko vijeće Pomorskog fakulteta u Rijeci, na prijedlog Povjerenstva za ocjenu doktorske disertacije, na sjednici održanoj 17. listopada 1994. godine, donijelo je slijedeću

**ODLUKU**

Prihvaća se izvješće Povjerenstva za ocjenu doktorske disertacije **MR. SC. KOS SERĐA** i disertacija pod naslovom 'PRILOG UNAPREĐENJU TERESTRIČKE NAVIGACIJE LASERSKIM SUSTAVOM'.

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije imenuje se u sastavu

1. **DR. SC. DUŠKO VRANIĆ**, izv. profesor Pomorskog fakulteta u Rijeci
2. **DR. SC. IVICA VUKUŠIĆ**, Imperial College, University of London,
3. **DR. SC. DINKO ZOROVIĆ**, red. profesor Pomorskog fakulteta u Rijeci
4. **DR. SC. ANTE TIĆAC**, docent Pomorskog fakulteta u Rijeci

Obrana doktorske disertacije održat će se 21. listopada 1994. godine s početkom u 11,00 sati u Velikoj vijećnici Pomorskog fakulteta u Rijeci, a za zapisničara se imenuje MR. SC. DUBRAVKO VUČETIĆ.

Dostaviti:

- Pristupniku
- Članovima povjerenstva
- Općoj službi, 3x
- Pismohrani

  
DEKAN,

Dr. sc. PAVAO KOMADINA

## SADRŽAJ

<b>SAŽETAK</b> .....	1
<b>1. UVOD</b> .....	3
1.1. Definiranje problema istraživanja .....	3
1.2. Očekivani znanstveni doprinos .....	5
1.3. Mogućnost primjene ponuđenog rješenja .....	5
<b>2. FIZIKALNI OSNOVI LASERSKE NAVIGACIJE</b> .....	7
2.1. Elektromagnetski spektar .....	8
2.2. Svojstva laserskog zračenja .....	11
2.2.1. Svojstva vala .....	11
2.2.2. Opća svojstva zračenja .....	13
2.2.3. Energetska svojstva zračenja .....	15
2.3. Glavne vrste lasera .....	15
2.3.1. Laseri na bazi čvrstih tijela .....	16
2.3.2. Laseri na bazi tekućina .....	17
2.3.3. Plinski laseri .....	18
2.3.4. Ostali atipični laseri .....	19
2.4. Molekularni laseri na bazi CO <sub>2</sub> .....	22

2.4.1.	Selekcija modova . . . . .	26
2.4.2.	Sinhronizacija modova . . . . .	28
3.	<b>TEORIJSKI MODEL LASERSKOG NAVIGACIJSKOG SUSTAVA . . . . .</b>	<b>31</b>
3.1.	<b>Pomorski navigacijski sustavi . . . . .</b>	<b>32</b>
3.1.1.	Pregled tehničkih karakteristika važnijih pomorsko-navigacijskih sustava . . . . .	35
3.1.2.	Elektronska navigacija . . . . .	43
3.2.	<b>Laserska navigacija . . . . .</b>	<b>45</b>
3.2.1.	"Kutna metoda" pozicioniranja pomoću predloženog teorijskog modela LNS-a . . . . .	46
3.3.	<b>Analiza utjecaja fizikalnih pojava koje mijenjaju koordinate Zemaljskih pozicija na pozicioniranje pomoću predloženog teorijskog modela LNS-a . . . . .</b>	<b>51</b>
3.3.1.	Pojava periodičnog pomicanja Zemaljskih polova . . . . .	52
3.3.1.1.	Određivanje pravokutnih koordinata Zemaljskog trenutnog pola . . . . .	53
3.3.1.2.	Utjecaj pomicanja Zemaljskih polova na geografske koordinate i azimut pravca . . . . .	56
3.3.2.	Pojava sekularnog pomicanja Zemaljskih polova . . . . .	59
3.3.3.	Pojava pomicanja Zemaljskih kontinenata . . . . .	59
3.3.4.	Relativistički efekt . . . . .	59
3.4.	<b>Matematička obrada "kutne metode" pozicioniranja pomoću predloženog teorijskog modela LNS-a . . . . .</b>	<b>60</b>
3.4.1.	Određivanje koordinata plovnog objekta pomoću dva laserska svjetionika . . . . .	64
3.5.	<b>Utjecaj valjanja i posrtanja na pozicioniranje pomoću predloženog teorijskog modela LNS-a . . . . .</b>	<b>69</b>
3.6.	<b>Laserski svjetionik . . . . .</b>	<b>70</b>

3.6.1.	Predajnik . . . . .	71
3.6.2.	Karakteristike laserskog svjetionika . . . . .	74
3.6.2.1.	Navigacijske karakteristike . . . . .	75
3.6.2.2.	Geometrijske karakteristike . . . . .	75
3.6.2.3.	Način rada . . . . .	78
3.6.3.	Postupak kod izgradnje (uspostavljanja) laserskog svjetionika . . . . .	79
3.7.	<b>Laserski prijamnik plovnog objekta . . . . .</b>	80
3.7.1.	Osnovne karakteristike laserskog prijamnika . . . . .	81
3.8.	<b>Opažanja pomoću predloženog teorijskog modela LNS-a . . . . .</b>	83
3.8.1.	Točnost pozicioniranja pomoću predloženog modela LNS-a . . . . .	83
3.9.	<b>Rasprostiranje laserske zrake kroz atmosferu . . . . .</b>	85
3.9.1.	Prigušenje usljed molekularne apsorpcije . . . . .	86
3.9.2.	Prigušenje usljed raspršenja na čvrstim česticama i kapljica- ma . . . . .	87
3.9.3.	Prigušenje usljed atmosferske turbulencije . . . . .	90
4.	<b>OPASNOSTI PRI UPORABI PREDLOŽENOG TEORIJSKOG MODELA LNS-a . . . . .</b>	93
4.1.	<b>Interakcija elektromagnetskog laserskog zračenja i bioloških struktura (tkiva) . . . . .</b>	94
4.2.	<b>Djelovanje laserske zrake na tkivo . . . . .</b>	95
4.2.1.	Fotokemijski učinak . . . . .	96
4.2.2.	Toplinski učinak . . . . .	96
4.2.3.	Ionizacijski učinak . . . . .	96
4.2.4.	Kemijsko-metaboličke promjene tkiva . . . . .	98
4.2.5.	Toplinsko djelovanje laserske zrake . . . . .	98
4.3.	<b>Djelovanje laserske zrake na ljudsko oko . . . . .</b>	100
4.4.	<b>Utjecaj laserskih isijavanja . . . . .</b>	108



---

5.	ZAKLJUČAK . . . . .	109
	ŽIVOTOPIS . . . . .	116
	LITERATURA . . . . .	119
	SUMMARY . . . . .	128

## SAŽETAK

Doktorska disertacija sadrži tri tematske cjeline.

U uvodnom dijelu definiran je problem istraživanja, očekivani znanstveni doprinos i mogućnost primjene ponuđenog rješenja.

U prvom poglavlju obrađeni su fizikalni osnovi "laserske navigacije". Definiran je elektromagnetski spektar, predstavljena su svojstva laserskog zračenja i svojstva vala s posebnim osvrtom na opća i energetska svojstva zračenja. Na osnovu analize različitih vrsta lasera predložen je odabir molekularnog lasera na bazi CO<sub>2</sub> za formiranje laserskog navigacijskog sustava. Obradena je selekcija i sinhronizacija modova.

U drugom poglavlju obrađuje se navigacijska problematika postavljanja teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava za vođenje terestričke navigacije. Izložene su ideje koje predstavljaju izvorni znanstveni doprinos razvitku nautičkih znanosti. Predstavljani su pomorski navigacijski sustavi s analizom i pregledom tehničkih karakteristika. Obradena je elektronska navigacija i predložen novi pojam "Laserska navigacija". Predložen je također teorijski model laserskog navigacijskog sustava (LNS). Za pozicioniranje pomoću predloženog teorijskog modela LNS-a razrađena je "kutna metoda". Predočena je matematička obrada "kutne metode" pozicioniranja pomoću dva laserska svjetionika. Izvršena je analiza utjecaja fizikalnih pojava koje mijenjaju koordinate Zemaljskih pozicija, a utječu na proces pozicioniranja pomoću predloženog teorijskog modela LNS-a (periodično pomicanje Zemaljskih polova, sekularno pomicanje Zemaljskih polova, pomicanje Zemaljskih kontinenata, ...). Obraden je utjecaj valjanja i posrtanja plovnog objekta na pozicioniranje

pomoću predloženog teorijskog modela LNS-a. Uveden je pojam "laserski svjetionik" uz obradu predajnika, navigacijskih i geometrijskih karakteristika te načina rada "laserskog svjetionika". Definiran je postupak kod izgradnje odnosno uspostavljanja "laserskog svjetionika". Obradene su osnovne karakteristike laserskog prijamnika plovnog objekta. Predočene su dvije osnovne metode opažanja pomoću predloženog teorijskog modela LNS-a, a za ocjenu točnosti pozicioniranja pomoću teorijskog modela LNS-a predložen je modificirani kriterij PDOP tj. kriterij položajnog raslojavanja određenosti. U zadnjem dijelu ovog poglavlja obrađeno je rasprostiranje laserske zrake kroz atmosferu uz analizu prigušenja usljed molekularne apsorpcije, prigušenja usljed raspršenja na čvrstim česticama i kapljicama te prigušenja usljed atmosfere turbulencije.

Treće poglavlje obrađuje moguće potencijalne opasnosti pri uporabi predloženog teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava. Definirana je interakcija elektro magnetskog laserskog zračenja i bioloških struktura (tkiva). Predočeno je djelovanje laserske zrake na tkivo, fotokemijski učinak, toplinski te ionizacijski učinak. Obradene su kemijsko-metaboličke promjene tkiva i djelovanje laserske zrake na ljudsko oko kao potencijalno najosjetljiviji ljudski organ uz kratku analizu utjecaja laserskih isijavanja na ljudski organizam. Na osnovu teorijskog proračuna definirane su: opasna zona, granična udaljenost te sigurna udaljenost od "laserskog svjetionika" u horizontalnoj ravnini.

Relevantni zaključci koji proizlaze iz provedenog istraživanja navedeni su u završnom dijelu rada.

## 1. UVOD

Osnovna ideja doktorske disertacije je da se na fiksnim kopnenim svjetionicima ("laserski svjetionik"), ugradi određena vrsta laserskog predajnika koji emitira laserske zrake u nevidljivom dijelu spektra, a na plovnim objektima specijalni laserski prijamnik. Na taj način može se formirati laserski navigacijski sustav koji omogućuje vođenje terestričke tj. obalne navigacije s dovoljnom frekvencijom pozicioniranja, dakle dok brod plovi ili je usidren određuju se koordinate pozicije bez obzira na vremenske uvjete (dan, noć, magla...). Također omogućuje se kontrola pomaka pozicije usidrenog broda, određivanje brzine broda u plovidbi, zanošenje tj. odstupanje od zadanog kursa plovidbe i svi ostali relevantni navigacijski parametri.

### 1.1. Definiranje problema istraživanja

Zadnjih dvadesetak godina ući će u povijest pomorske navigacije kao razdoblje u kojem se pomorski promet razvio u integrirani i industrijalizirani sustav u sklopu općeg svjetskog prometnog lanca. Pouzdanost i sigurnost pomorskog dijela prometnog lanca ovisi o sposobnosti posada, tehničkim i navigacijskim standardima, pri čemu su elektronska navigacijska sredstva na brodovima i na kopnu te dobro uvježbana i školovana posada od primarne važnosti. Klasične metode navigacije nisu se u posljednjih nekoliko desetljeća bitno izmijenile i one i dalje ostaju osnova sigurnog plovljenja na moru. Međutim promjene su izrazite u razvoju i uporabi sred-

stava i uređaja terestičke i oceanske navigacije i zahtjevu za povećanjem točnosti i učestalosti određivanja pozicije broda.

Ti su zahtjevi što se tiče oceanske navigacije razvojem satelitske navigacije tj. sustava GPS izuzetno dobro ostvareni. Međutim u obalnoj plovidbi javlja se problem dovoljne frekvencije, pouzdanosti i točnosti određivanja koordinata pozicije broda na raznim morima svijeta. Taj je problem naročito izražen u područjima gdje je nerazvedena niska obala bez izrazitih navigacijskih vizira i pomagala (npr. zapadna obala Afrike, prilaz Port Said, ...). U praksi se tada vodi klasična radarska navigacija ili hiperbolična navigacija (sustavi Decca, Loran ili Omega). Hiperbolični sustavi imaju određene nedostatke i ne daju visoku točnost i pouzdanost pozicioniranja. Može se voditi i satelitska navigacija, međutim njezin je najveći nedostatak mogućnost promjene koda (što ovisi o političkoj volji samo jedne zemlje) čime se bitno može smanjiti točnost pozicioniranja ili čak potpuno onemogućiti proces pozicioniranja. Laser se u pomorskoj navigaciji za sada koristi u ratnim mornaricama za određivanje udaljenosti do cilja i za lasersko-radarsko navođenje projektila i određivanje ciljeva, dok se za funkciju pozicioniranja broda u plovidbi za sada ne koristi.

Stalna potreba za pronalaženjem boljeg, uspješnijeg i preciznijeg načina pozicioniranja ogromna je pokretačka snaga koja pridonosi napretku pomorske navigacije. Cilj je dobiti navigacijski sustav koji će biti što točniji, a pozicija broda što učestalija. Laseri pružaju dosada možda najrevolucionarnije mogućnosti primjene svjetlosne energije u pomorskoj obalnoj navigaciji za potrebe pozicioniranja plovnog objekta.

Ova doktorska disertacija je teorijski rad kojim se želi ukazati na specifične mogućnosti primjene odgovarajućeg lasera u pomorskoj površinskoj navigaciji. Stoga se problem koji se ovim radom želi znanstveno obraditi i riješiti ukratko sastoji u sljedećem:

- istražiti i razraditi teorijske osnove kojima se uz primjenu odgovarajućih tehničkih pomagala (laserskog predajnika i prijamnika) može postići dovoljno učestalo određivanje koordinata pozicije plovnog objekta u obalnoj navigaciji (do 20 M od

obale) u svim obalnim područjima svijeta (bez obzira na konfiguraciju obale) te u različitim vremenskim uvjetima. Na osnovu provedenog istraživanja formirati teorijski model laserskog navigacijskog sustava čime bi se omogućilo vođenje "laserske navigacije" na moru.

## 1.2. Očekivani znanstveni doprinos

Ovom doktorskom disertacijom želi se:

- unaprijediti sigurnost na moru i pouzdanost terestričke (obalne) plovidbe uspostavljanjem predloženog teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava. U nautičku znanost može se uvesti novi pojam "laserska navigacija". Također nastoji se ostvariti osnovni zahtjev da se određivanje koordinata pozicije plovnog objekta u terestričkoj navigaciji bazira što je moguće više na znanstveno fundiranim metodama, neovisno o vještini navigatora i postojećim vremenskim uvjetima uz dovoljnu točnost, pouzdanost i učestalost pozicioniranja (Fix) bez nepoželjnih dužih intervala procijenjenih (zbrojenih) pozicija tijekom plovidbe plovnog objekta.

Na taj način proširuju se i spoznajne mogućnosti i egzaktnost navigacije u pomorskom prometu kao znanstvene discipline znanstvenog područja tehnologije prometa. Cilj je da konstatacije navedene u ovom radu posluže kao podloga za daljnja unapređenja terestričke navigacije.

## 1.3. Mogućnost primjene ponuđenog rješenja

Predložena "laserska navigacija", odnosno predloženi teorijski model laserskog navigacijskog sustava koji se teorijski koncipira i razrađuje u ovoj doktorskoj disertaciji univerzalne je naravi, a nakon kompletnog projektiranja sustava mogao bi se primjenjivati za vođenje obalne (terestričke) navigacije na teretnim trgovačkim brodovima, putničkim brodovima, na brodovima za istraživanje mora i podmorja, na

---

brodovima za izvođenje raznih hidrograđevinskih radova na moru i podmorju itd., odnosno kod svih plovnih objekata na kojima je potrebna dovoljno visoka točnost, pouzdanost i učestalost pozicioniranja u obalnoj navigaciji na svim morima i obalnim područjima svijeta bez znatnih ograničenja.

## 2. FIZIKALNI OSNOVI LASERSKE NAVIGACIJE

LASER je skraćenica od početnih slova punog engleskog naziva: LIGHT AMPLIFICATION BY STIMULATED EMISSION OF RADIATION, što se može prevesti kao pojačavanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja.

Nastao je kao rezultat novih spoznaja u području optoelektronike koja predstavlja noviju granu fizike, a bazira se na optici, spektroskopiji, kvantnoj mehanici i elektronici. Početak kvantne optoelektronike potiče od teorijskih radova A. Einsteina 1917. godine iz područja stimulirane emisije zračenja.

Znanstvenici Basov i Prohorov te Townes i Schawlow su razradili teorijski princip stimulirane emisije optičkog zračenja u molekulama plina. Na osnovi tih radova T. H. Maiman je 1960. godine izradio prvi impulsni generator optičkog zračenja na principu stimulirane emisije od sintetičkog rubina i dao je naziv LASER.

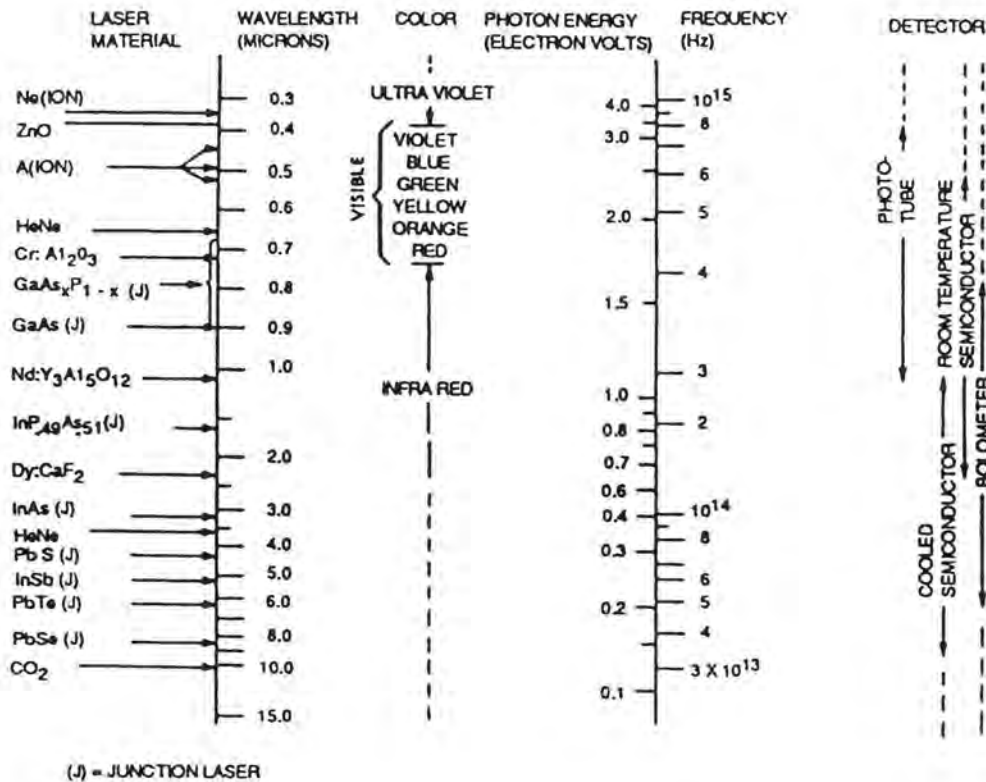
Tijekom sljedećih šest godina fundamentalnim istraživanjima laserskog učinka u materijama svih triju agregatnih stanja dobivene su razne vrste lasera te je započelo brzo i dinamično tehnološko usavršavanje lasera s vrlo širokom primjenom u raznim znanstvenim disciplinama, međutim treba istaći činjenicu da je laser djelotvoran onoliko koliko se znalački i svrsishodno primjenjuje.



## 2.1. Elektromagnetski spektar

U prirodi postoje elektromagnetski valovi različitih karakteristika. Prirodno ili umjetno stvoreni elektromagnetski valovi različitih valnih duljina čine spektar koji se ovisno o valnoj duljini može razložiti na skupine i podskupine:

a) kozmičko zračenje	$\lambda = 3 \cdot 10^{-6} \text{ nm do } 10^{-3} \text{ nm}$
b) rendgensko zračenje	$\lambda = 10^{-3} \text{ do } 10^{-1} \text{ nm}$
c) ultraljubičasto zračenje	$\lambda = 10^{-1} \text{ do } 380 \text{ nm}$
d) vidljivo zračenje	$\lambda = 0,38 \text{ do } 0,76 \mu\text{m}$
e) infracrveno zračenje	$\lambda = 0,76 \text{ do } 750 \mu\text{m}$
f) radio-valovi	$\lambda = 750 \mu\text{m do } 10 \text{ km}$



Slika 1. Odnos laserski materijal - spektar zračenja - fotonska energija - detektori

Izvor: Jelalian, A. V.:

Laser Radar systems, Boston - London, Artech House, 1992., str 131

Osnovne skupine su ionizacijska zračenja (a, b), optička, termička ili infracrvena zračenja i radio-valovi. Dio spektra koji izaziva podražaj vida zove se vidljivi spektar, a može se podijeliti u podskupine:

- ljubičasto zračenje	$\lambda = 0,38 \text{ do } 0,45 \mu\text{m}$
- plavo zračenje	$\lambda = 0,45 \text{ do } 0,48 \mu\text{m}$
- plavičasto zračenje	$\lambda = 0,48 \text{ do } 0,50 \mu\text{m}$
- zeleno zračenje	$\lambda = 0,50 \text{ do } 0,56 \mu\text{m}$
- žuto zračenje	$\lambda = 0,56 \text{ do } 0,59 \mu\text{m}$
- narandžasto zračenje	$\lambda = 0,59 \text{ do } 0,62 \mu\text{m}$
- crveno zračenje	$\lambda = 0,62 \text{ do } 0,76 \mu\text{m}$

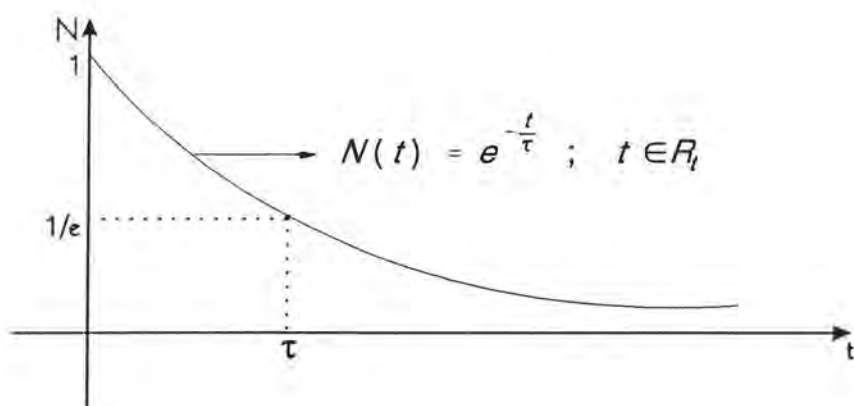
Od vidljivog spektra prema kraćim valnim duljinama nalazi se ultraljubičasti dio spektra, a prema duljim valnim duljinama infracrveno spektralno područje. Infracrveno zračenje se okvirno može podijeliti u tri podskupine:

- blisko područje	$\lambda = 0,76 \text{ do } 2,5 \mu\text{m}$
- srednje područje	$\lambda = 2,5 \text{ do } 25 \mu\text{m}$
- daleko područje	$\lambda = 25 \text{ do } 750 \mu\text{m}$

Na ovaj način su definirane glavne podskupine spektralnog područja gdje su svi laserski izvori prisutni. Radio-valovi se okvirno mogu podijeliti u sljedeće podskupine:

- submilimetarski valovi	$\lambda = 0,1 \text{ do } 1 \text{ mm}$
- milimetarski valovi	$\lambda = 1 \text{ do } 10 \text{ mm}$
- centimetarski valovi	$\lambda = 10 \text{ do } 100 \text{ cm}$
- metarski valovi	$\lambda = 1 \text{ do } 10 \text{ m}$
- kratki valovi	$\lambda = 10 \text{ do } 100 \text{ m}$
- dugi valovi	$\lambda = 1 \text{ do } 10 \text{ km}$
- vrlo dugi valovi	$\lambda = 10 \text{ do } 100 \text{ km}$

Svi klasični izvori svjetlosti (žarulje, pražnjenja u plinovima, Sunce, ...) rade na principu spontane emisije zračenja što znači da svaki atom emitira svjetlost različite frekvencije i u razno vrijeme, dakle takvi svjetlosni valovi su nekoherentni. Radi temperature koja je veća od apsolutne nule atomi vibriraju i ta vibracija doprinosi promjeni frekvencije kod emisije fotona. Fotoni su emitirani proizvoljno u bilo kojem smjeru. Svaki atom ili molekula ima određeno srednje vrijeme u pobuđenom stanju, što znači da će neki atom emitirati foton odmah nakon pobuđenja, drugi nešto kasnije itd.



Slika 2. Srednje vrijeme atoma ili molekule u pobuđenom stanju

$N$  - broj fotona u pobuđenom stanju

$\tau$  - srednje vrijeme atoma ili molekule u pobuđenom stanju

$e$  - baza prirodnih logaritama

za  $t = \tau$   $N(\tau) = 1/e$ ----- (1)

Laserski svjetlosni valovi imaju određeni stupanj koherencije u vremenu i prostoru. Međutim, veličina koherencije je relativna vrijednost i ovisi o tome gdje i kako se signal koristi. Duljina koherencije u interferometriji je:

$$L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \text{-----} (2)$$

gdje je:

$\lambda$  - valna duljina signala

$\Delta\lambda$  - spektralna širina signala

Iz jednadžbe (2) proizlazi da kod stalne spektralne širine što je manja valna duljina signala manja je i koherentna duljina.

Kod lasera koji se u ovom radu preporuča za vođenje laserske navigacije valna duljina je tako kratka da je koherentna duljina mala u odnosu na potrebnu duljinu od npr. 30 km.

## 2.2. Svojstva laserskog zračenja

Poznavanje svojstava laserskog zračenja ima veliko značenje u njegovoj primjeni u pomorskoj površinskoj navigaciji. Bez točno definiranih parametara zračenja aplikativno istraživanje ne može imati znanstvenu razinu prvenstveno zbog toga jer zaključci mogu biti pogrešni, a znanstvena komunikacija ne može biti jednoznačna. U nastavku prikazat će se najvažniji elementi u laserskom zračenju koji su u uskoj vezi s primjenom lasera kod pozicioniranja u terestričkoj navigaciji tj. vođenju "laserske navigacije". Ti elementi definiraju svojstva vala, svojstva zračenja i energetska svojstva.

### 2.2.1. Svojstva vala

Val je periodična pojava, a lasersko zračenje je elektromagnetski val koji se širi brzinom svjetlosti koja ovisi o mediju kroz koji putuje. Uz površinu Zemlje laserski zrak se kreće po ortodromi.

Duljina vala ( $\lambda$ ) - je put koji val pređe za vrijeme jedne periode.

Boja zračenja u vidljivom spektralnom području elektromagnetskog vala određena je valnom duljinom.

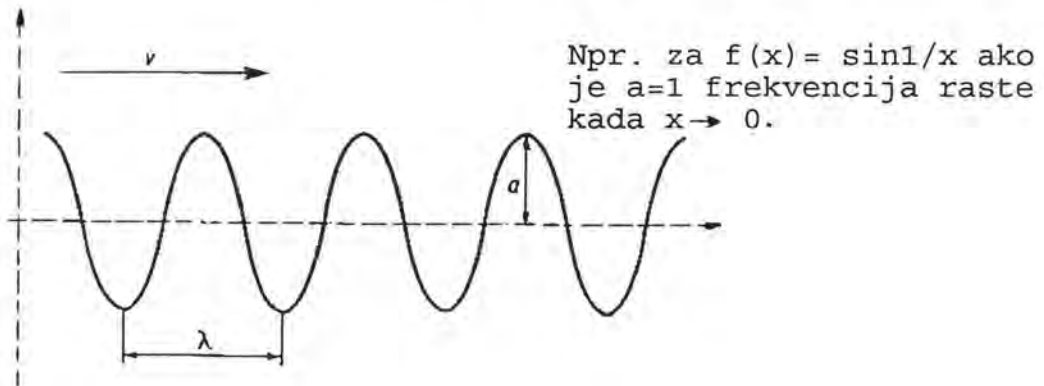
Frekvencija vala ( $f$ ) - je učestalost prolaženja jedne točke vala kroz određenu ravninu u jednoj sekundi. Vrijedi odnos:

$$c = \lambda \cdot f \text{-----(3)}$$

gdje je:

$c$  - brzina svjetlosti

Amplituda ( $a$ ) je najveća elongacija vala od nultog položaja. Amplituda je mjerodavna veličina za intenzitet i snagu laserskog zračenja.



Slika 3. Osnovni parametri sinusnog vala

Faza - je relativna veličina kojom se definira relativni položaj određene točke naspram drugog vala. Ako su valovi u fazi stvaraju rezultatni val dvostruke amplitude, ako su u suprotnoj fazi oni se poništavaju.

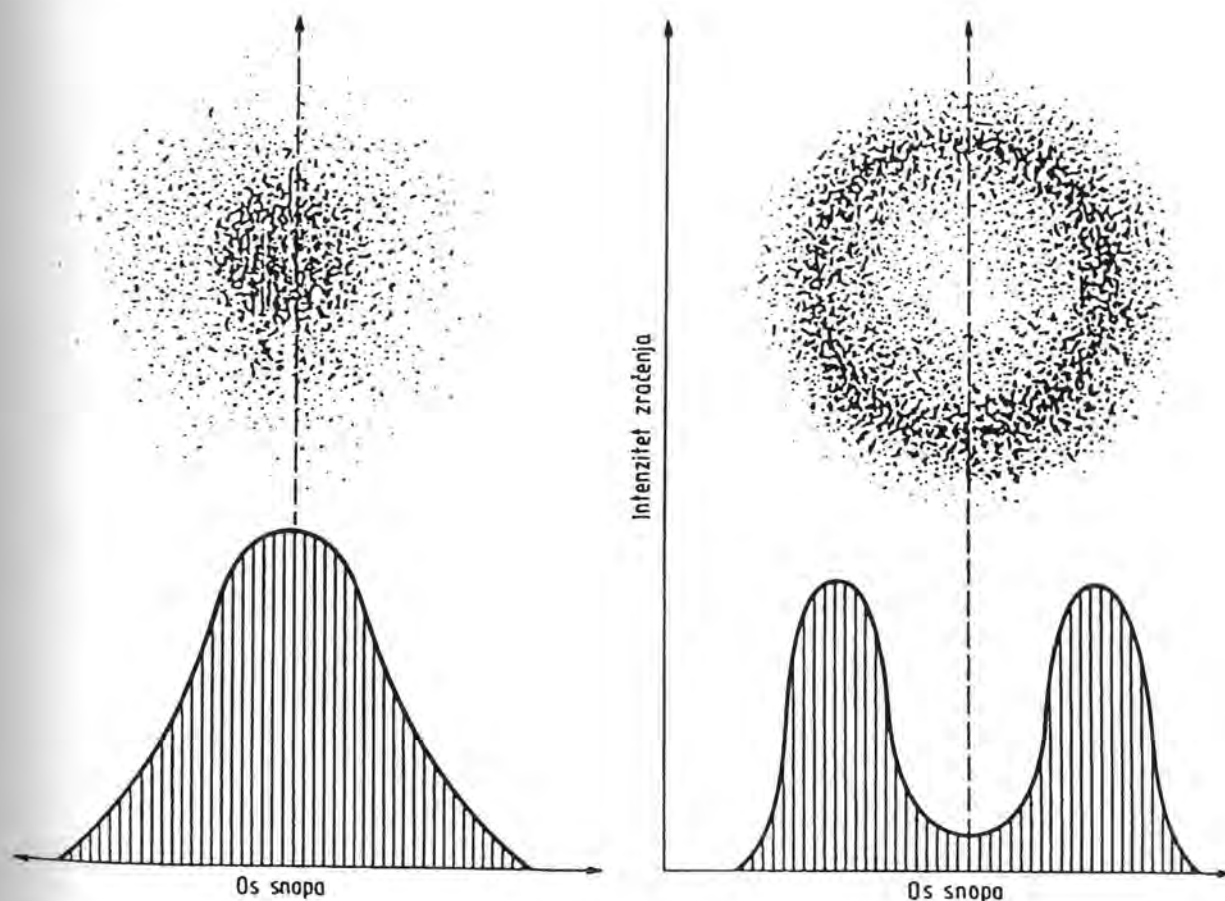
Koherencija određuje međufazne odnose valova u prostoru i vremenu. Ako su fazni odnosi u određenom izvoru zračenja konstantni u prostoru i vremenu javlja se prostorna i vremenska koherentnost izvora zračenja.

## 2.2.2. Opća svojstva zračenja

Zračenje se može definirati kao prostorni razvoj valne formacije određenog izvora. Ploha valova iste faze čini valnu frontu zračenja. Samo koherentni izvori mogu imati valnu frontu.

Divergencija laserske zrake - definira kut pod kojim se laserski snop širi prostorom u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini.

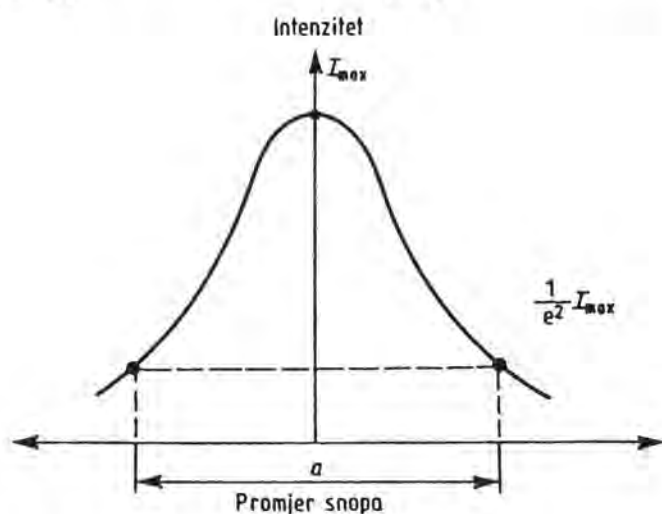
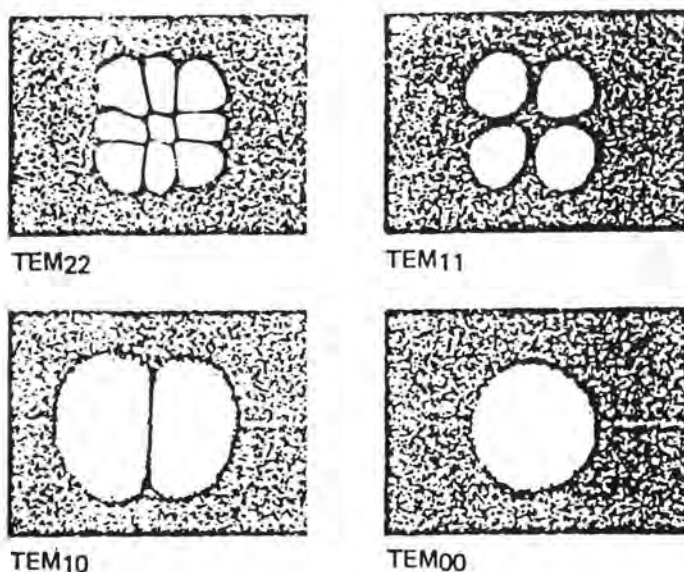
Mod rada - označava raspodjelu snage oko osi laserskog snopa. Raspodjela snage ovisi o vrsti laserskog rezonatora. Temeljni mod zračenja je  $TEM_{00}$  (engl. Transverse Electromagnetic Mode) kojemu je glavnina snage raspoređena oko osi snopa.



Slika 4. Mod  $TEM_{00}$  i  $TEM_{01}$

Izvor: Negovetić, L. i (dr.): *Laser u kirurgiji glave i vrata*, Zagreb, Školska knjiga, 1990, str. 22

Ako rezonator radi izvan temeljnog moda javlja se multimodalno lasersko zračenje.



Slika 5. Razni modovi rada

Izvor: Negovetić, L. i (dr.): *ibidem*, str. 23

Površina presjeka laserskog snopa ovisi o vrsti presjeka laserskog snopa (krug, kvadrat, pravokutnik itd.), a bitna je za određivanje gustoće snage laserskog snopa.

### 2.2.3. Energetska svojstva zračenja

Mogu se definirati sljedećim veličinama:

Snaga laserskog zračenja - određena je konstrukcijom lasera i funkcionalnim svojstvima, a izražava se u vatima (W). Pomoću instrumenta ugrađenog u laserski uređaj može se kontrolirati snaga zračenja na izlasku iz laserskog rezonatora.

Gustoća snage - označava snagu po jediničnoj poprečnoj površini laserskog snopa na određenoj udaljenosti od izvora laserskog snopa.

Energija laserskog zračenja - je sposobnost obavljanja rada. Izražava se u joulima (J). Ukupna djelotvorna laserska energija koja se primjenjuje u medicini ovisi o snazi laserskog zračenja i duljini vremena zračenja.

Doza laserskog zračenja - je preračunata energija na jedinicu površine. Važna je u dijagnostici i biostimulativnoj primjeni laserskog zračenja.

Apsorpcija zračenja - javlja se kad atom apsorbira neko vanjsko zračenje i na taj način prelazi u pobuđeno stanje. Posljedica je prijelaz atoma iz nižeg u više energetske stanje. Atom se nalazi u pobuđenom stanju vrlo kratko vrijeme (oko  $10^{-8}$  sekundi) nakon čega se elektroni vraćaju u početno stanje uz zračenje pri čemu se može javiti spontana emisija zračenja ili inducirana emisija zračenja.

### 2.3. Glavne vrste lasera

Laseri su svjetlosni sustavi koji imaju volumen pojačanja svjetlosti i povratnu spregu u obliku zrcala. Principijelno, sastoje se od rezonatora s aktivnom sredinom i sustava za pumpanje. U aktivnoj sredini koja može biti plin, čvrsto ili tekuće tijelo, stvara se inverzija naseljenosti energetskih nivoa pomoću energije koja se dovodi izvana iz posebnog izvora (pumpe). Pumpa može biti visokonaponski generator, lampa koja daje jaku svjetlost ili neki drugi izvor energije. Pomoću pumpe pobuđuju se atomi aktivne sredine koji izvode inducirane prijelaze energetskih nivoa i dolazi do stvaranja koherentne svjetlosti. Kako aktivna sredina može imati različita



agregatna stanja, postoje laseri na bazi plinskog, tekućeg i čvrstog tijela s tim da laseri na bazi čvrstog tijela mogu biti izrađeni na bazi izolatora i na bazi poluvodiča. U nastavku analizirat će se pojedine važnije vrste lasera i predložiti odgovarajuća vrsta za vođenje "laserske navigacije" vodeći računa o divergenci zračenja i frekventnom spektru.

### 2.3.1. Laseri na bazi čvrstih tijela

Kao aktivna sredina koristi se kristalno (npr. rubin) ili amorfno (npr. staklo) tijelo. Aktivni elementi ovih lasera su različitih dimenzija što ovisi o uporabi i izlaznoj snazi lasera. Kut divergencije laserske zrake ovisi o laserskom oscilatoru, odnosno o svojstvima pojačala i zrcala. Inverzija naseljenosti pojedinih energetske nivoa, ostvaruje se optičkim pumpanjem na taj način da se aktivna sredina osvjetljava intenzivnim svjetlom iz posebnog izvora svjetlosti. Aktivna sredina u obliku kristalnog ili amornog dielektrikuma ima oblik valjka ili pravokutnog paraleloida. Ogljedala (zrcala) se mogu postaviti na graničnu površinu aktivne sredine ali za veću stabilnost frekvencija, zrcala su odvojena od aktivne sredine. Razlog tome je promjena dimenzija pojačala s promjenom temperature. Rezonator na bazi dielektrikuma se sastoji od dvije komponente: matrice i aktivatora. Matrica predstavlja kristalni ili amorfni dielektrikum koji sadrži male količine primjesnih atoma ili iona aktivatora ( $\leq 1\%$ ). Inducirani prijelazi dešavaju se na aktivatorima čime se dobiva lasersko zračenje. Pobuđivanje aktivatora se vrši pomoću specijalnih lampi koje moraju davati velik intenzitet svjetlosti. U postojećim izvedbama koeficijent korisnog djelovanja kreće se od 0,1 do 30%.

Laseri na bazi čvrstih tijela nisu pogodni za uporabu u pomorskoj navigaciji jer zahtijevaju veće impulsne snage za što bi trebalo koristiti jače bliješatalice, a one stvaraju veliku toplinu. Također rade na valnim duljinama koje nisu pogodne za specifične uvjete pomorske površinske navigacije, a imaju i dosta malu termičku stabilnost u odnosu na temperaturu okolnog ambijenta

### 2.3.2. Laseri na bazi tekućina

Kao aktivna sredina kod ove vrste lasera koriste se spojevi anorganskih i organskih boja. Kod lasera na bazi tekućina postiže se relativno visoka koncentracija aktivnih čestica tako da se može dobiti relativno velika energija zračenja po jedinici volumena aktivnog tijela. Također tekućina je optički homogena pa su zato u tekućini mnogo manji gubici zračenja nego u čvrstim tijelima kod kojih postoje razni defekti u strukturi. Hlađenje tekućine vrši se cirkulacijom što predstavlja jednostavu i učinkovitu metodu, a pri impulsnom režimu rada može se radni volumen tekućine u potpunosti obnoviti.

Kod ovih vrsta lasera treba spomenuti problem toksičnosti neorganskih spojeva, međutim dobro svojstvo ovih lasera je njihova stabilnost u odnosu na termička naprezanja. Značajan nedostatak lasera na bazi tekućina predstavlja nestabilnost otopine tako npr. u otopini se nakon jednog do dva mjeseca stvaraju talozi, koji bitno smanjuju lasersko zračenje. Također tekućine imaju velike vrijednosti termooptičkog koeficijenta, što opet izaziva stvaranje termičkih leća čiji se fokus mijenja za vrijeme impulsa zračenja, tako da divergencija laserske zrake može iznositi čak nekoliko stupnjeva što je neprihvatljivo za vođenje "laserske navigacije".

Na bazi organskih otopina dobiva se širok spektar laserskog zračenja, tako da spektralna linija može imati širinu od oko 100 nm. Laseri na bazi organskih otopina mogu raditi u kontinuiranom i impulsnom režimu. Pobuđivanje lasera na bazi tekućina izvodi se optičkim pumpanjem. Ovi laseri daju snagu u impulsnom režimu od nekoliko megawata. Trajanje impulsa iznosi od 1 do 15 mikrosekundi ako se pobuđivanje aktivne sredine vrši blješatlicom, odnosno od 10 do 30 nanosekundi ako se pobuda vrši drugim laserom. Na osnovu iznijetog može se zaključiti da ni ova vrsta lasera nije pogodna za vođenje "laserske navigacije".

### 2.3.3. Plinski laseri

U ovu grupu spadaju laseri kojima je pojačivački medij plin i koji se pobuđuju:

- propustom električne struje kroz plin,
- optički,
- kemijskim reakcijama.

Ukoliko se pobuda izvodi kemijskim reakcijama mogu se razlikovati dvije osnovne grupe:

- laseri s vanjskom pobudom kemijske reakcije,
- laseri bez vanjske pobude kemijske reakcije

Prvoj grupi pripadaju laseri u kojima se kemijska reakcija u aktivnoj sredini izaziva vanjskim djelovanjem: svjetlošću, toplinom itd., što zahtijeva korištenje dodatnih uređaja kao što su posebni svjetlosni izvori, toplinske komore itd., dok se u drugoj grupi kemijska reakcija ostvaruje samostalno iznutra pri miješanju komponenti. Lasersko zračenje u ovim laserima nastaje induciranim prijelazima između oscilacijsko-rotacijskih ili rotacijskih energetske nivoa dvoatomskih molekula.

Osim toga za lasere koji pripadaju drugoj grupi nisu potrebni glomazni izvori za napajanje kao što je to slučaj kod tekućih lasera i lasera na bazi čvrstih tijela. Nedostatak ovih lasera sastoji se u mogućoj toksičnosti aktivnih materijala, te u činjenici da se tijekom rada mora mijenjati aktivna sredina. Laseri ove vrste nalaze se u stadiju intenzivnog razvoja u laboratorijama i mogu se očekivati znatna poboljšanja i unapređenja.

U kemijskim laserima koriste se uglavnom oscilacijsko-rotacijski prijelazi, tako npr. kod jodnog lasera laserska emisija se ostvaruje između elektronskih nivoa atoma joda. Fotodisocijacijom alkil-jodida postiže se pobuda atoma joda. Fotodisocijaciji su podvrgnuti veći volumeni početnog molekularnog plina čime se dobivaju znatne impulsne energije. Jodni laseri rade na valnoj duljini od 1350nm s tim da mogu raditi i u kontinualnom režimu.

Usprkos određenim nedostacima plinski laseri su pogodni za uporabu u obalnoj plovidbi za vođenje "laserske navigacije".

#### 2.3.4. Ostali atipični laseri

Ukratko će se obraditi laseri na F centrima<sup>1</sup>, laseri na bazi slobodnih elektrona i excimer laseri.

Tzv. obojeni centri ili F centri predstavljaju u kristalima specifične pogreške kristalne strukture, koji nastaju lokalizacijom elektrona u blizini defektnih mjesta. Kako je luminescencija F centra vrlo slična luminescenciji organskih boja, to se F centri u literaturi nazivaju i obojeni centri.

U tvari s F centrima spadaju alkalni kristali: NaCl, KCl, CaF<sub>2</sub>, BaF<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> itd. Nastankom defektnih mjesta u navedenim kristalima (odsutvo atoma ili iona u kristalnoj rešetki s mjesta na kojem bi se trebao nalaziti) pojavljuju se u toj zoni dodatni energetske nivoi, a time i dodatni apsorpcijski pojasevi u spektru. Dakle ukratko ako se kristal zrači ultraljubičastim, rendgenskim ili  $\gamma$  zracima nastaju F centri. U tom slučaju halogeni negativni ioni u čvorovima kristalne rešetke apsorbiraju kvante zračenja, gube elektron i postaju neutralni atomi. Ovako nastali F centri imaju malu termičku i optičku stabilnost, naime obojeni kristali lako gube boju pri apsorpciji svjetlosti u karakterističnom F spektralnom pojasu pri niskim temperaturama i pri zagrijavanju što je sve nepovoljno za slučaj vođenja "laserske navigacije" pri različitim hidrometeorološkim uvjetima u atmosferi. F centri nastaju također kada elektroni visoke energije bombardiraju alkalne kristale. Laseri na bazi F centara rade u spektralnom području od 900 do 3300 nm, a koriste se u spektroskopiji. Nisu pogodni za uporabu u laserskoj navigaciji jer imaju vrlo male izlazne snage (nekoliko  $\mu$ W).

Kod lasera na bazi slobodnih elektrona<sup>2</sup>, elektroni se slobodno kreću u zrakovom prostoru pod utjecajem periodičnog magnetskog polja. U klasičnim zrakopraznim elektronskim uređajima vrlo visokih frekvencija, dimenzije uređaja

---

<sup>1</sup> Adams, J. M.: An Introduction to Optical Waveguides, Chichester, John Wiley & Sons, 1981.

<sup>2</sup> Svelto, O.: Principles of Lasers, New York-London, Plenum Press, 1976.

usporedive su s valnom duljinom koju uređaj zrači. U području interakcije elektrona i elektromagnetskog polja dolazi do zgušnjavanja i razrjeđivanja elektrona. Uzduž navoja pravolinijske spirale (cijev s putujućim valom) elektromagnetski val putuje brzinom koja je bliska brzini svjetlosti. U smjeru z osi spirale fazna brzina  $V_z$  iznosi približno:

$$V_z = c \cdot d / 2\pi a \text{-----(4)}$$

gdje je:

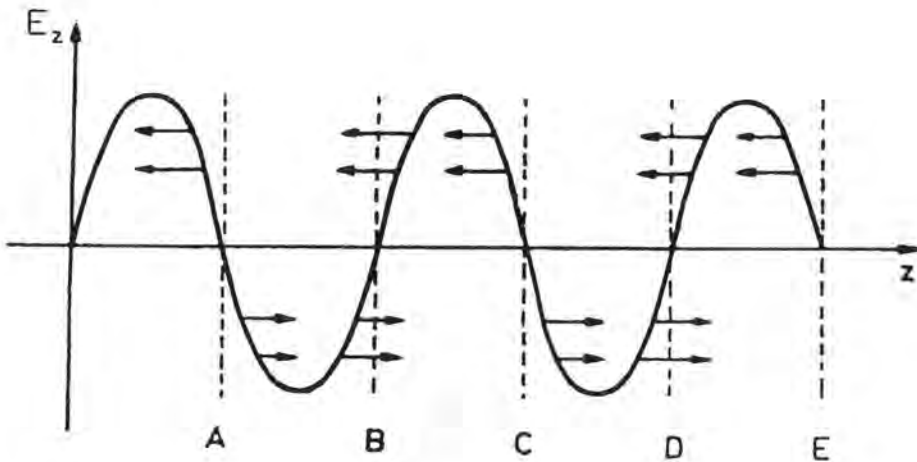
$c$  - brzina svjetlosti

$d$  - korak spirale

$a$  - polumjer spirale

Elektroni se kreću sinhronizirano s valom i grupiraju se pod utjecajem ubrzavajućeg i usporavajućeg djelovanja vala. Na sljedećoj slici prikazan je slučaj kada aksijalna komponenta električnog polja iznosi:

$E_z = E_0 \cdot \sin(W_t - W_z/V_z)$ . Na slici su strelicama prikazane sile koje djeluju na elektrone.



Slika 6. Kretanje elektrona pod utjecajem električnog polja aksijalne komponente usporednog progresivnog vala

U ravninama B i D elektroni se zgušnjavaju dok se u ostalim ravninama razrjeđuju. Ako je brzina kretanja elektrona  $V$  uzduž osi Z jednaka faznoj brzini vala  $V_z$  elektroni su nepokretni u odnosu na valno polje i ne dolazi do razmjene energije između elektrona i vala. Pri  $V > V_z$  kinetička energija elektrona prelazi u energiju visokofrekventnog polja što znači da se polje pojačava. To pojačanje je koherentno. Mlaz relativističkih elektrona prolazi kroz poprečno magnetsko polje ondilatora ili viglera. Interakcijom elektromagnetskog vala i elektrona nastaje inducirano zračenje čija frekvencija zavisi od indukcije magnetskog polja, energije elektrona i karakteristika elektrona (masa i radijus). Ovi laseri su još uvijek u fazi intenzivnog ispitivanja i razvoja, a osnovni im je nedostatak mali koeficijent korisnog djelovanja koji iznosi oko 0,5%.

Excimer laseri<sup>3</sup> rade na kvantnim prelazima excimernih molekula tj. molekula koje postoje samo u pobuđenom stanju. Ako se u nekom volumenu nalaze excimeri dobiveni pumpanjem može doći do induciranih prelaza (generacije) između gornjih (vezanih) i donjih (slobodnih) nivoa. Inverzna naseljenost nastaje pražnjenjem nižih nivoa na račun odbijanja atoma. U ovim laserima koriste se dvoatomske excimerne molekule. Aktivna sredina sastoji se od inertnog plina pri atmosferskom ili nešto višem pritisku s vrlo malim dodatkom nekog halogenog elementa. Pomoću impulsa koji stvaraju jako poprečno električno polje u rezonatoru ili bombardiranjem plina elektronima, pobuđuju se neutralni atomi koji u pobuđenom stanju stvaraju excimere. Kako excimeri imaju vrlo kratak vijek trajanja (oko 10 ns) a širok energetski nivo potrebno je ostvariti veliku koncentraciju excimernih molekula. Povratkom u normalno stanje excimerna molekula brzo disocira i zato je osnovni nivo prazan. Kako ovdje ne postoje jasno izraženi rotacijsko-oscilacijski nivoi, a prelaz je širokopojasan moguće je podešavanje laserskog zračenja po frekvenciji u datom intervalu. Kod excimernih lasera obično se koristi smjesa inertnih plinova: Ar, Kr, Xe s atomima halogenih elemenata Cl i F. U pobuđenom stanju atom inertnog plina stupa u kemijsku reakciju s halogenim elementima čime nastaje ionski spoj.

<sup>3</sup> Rhodes, K. Ch.: Excimer lasers, Berlin, Spinger-Verlag, 1979.

Tako se dobiva npr. ArF koji radi na  $\lambda = 193$  nm, KrF na  $\lambda = 248$  nm, XeCl na  $\lambda = 308$  nm, itd. Može se postići srednja snaga od 100W s frekvencijom ponavljanja impulsa od 1000 Hz. Excimerni laseri su pogodni za uporabu u područjima gdje je potreban snažan izvor ultraljubičastog zračenja, ali nisu pogodni za uporabu u "laserskoj navigaciji". Ovi laseri emitiraju u pojasu od 200 do 500 nm i koriste se u kemiji i medicini za promjenu oblika rožnice oka kod vrlo velikih dioptriya.

#### 2.4. Molekularni laseri na bazi CO<sub>2</sub>

Za vođenje "laserske navigacije" predlaže se odabir molekularnog lasera na bazi CO<sub>2</sub>. U nastavku obradit će se teorijske osnove na kojima se bazira rad laserskog svjetionika (predajnika) koji je ključni element u formiranju teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava.

Osnovni nivoi energija kod lasera su elektronski. Za razliku od atoma, molekule imaju pored energetske nivoe i oscilacijske i rotacijske nivoe. U molekuli se elektroni kreću oko jezgara atoma što daje elektronske nivoe, oscilacijsko kretanje atomskih jezgri jedno u odnosu na drugo stvara oscilacijske energetske nivoe, a rotacija molekule kao cjeline oko osi stvara rotacijske energetske nivoe. Razlika između pojedinih energetske nivoe približno iznosi 1 do 2 eV, razlika između oscilacijskih energetske nivoe iznosi približno 0,1 do 0,01 eV, a razlika između rotacijskih energetske nivoe iznosi približno 0,001 do 0,0001 eV. Sve tri vrste energije su strogo kvantificirane. Razlike između elektronskih energetske nivoe  $\Delta E_e$  mogu se približno izraziti jednadžbom:

$$\Delta E_e = \frac{h^2}{4\pi^2 r^2 m^2} \text{-----} (5)$$

gdje je:

r - polumjer molekule

m - masa elektrona

h - Planckova konstanta

Razlika energija između dva oscilacijska nivoa  $\Delta E_0$  za dvoatomsku molekulu približno iznosi:

$$\Delta E_0 = \sqrt{\frac{m}{M}} \cdot \Delta E_e \text{-----} (6)$$

gdje je:

M - masa molekule

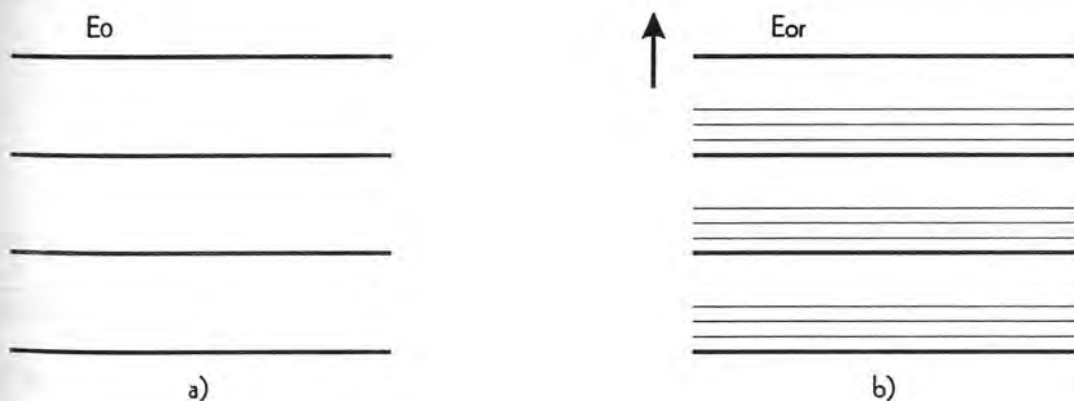
Razlika energija između dva rotacijska energetska nivoa  $\Delta E_r$  približno iznosi:

$$\Delta E_r = \sqrt{\frac{m}{M}} \cdot \Delta E_0 \text{-----} (7)$$

gdje je:

$$\sqrt{\frac{m}{M}} \text{ približno } 10^{-4}$$

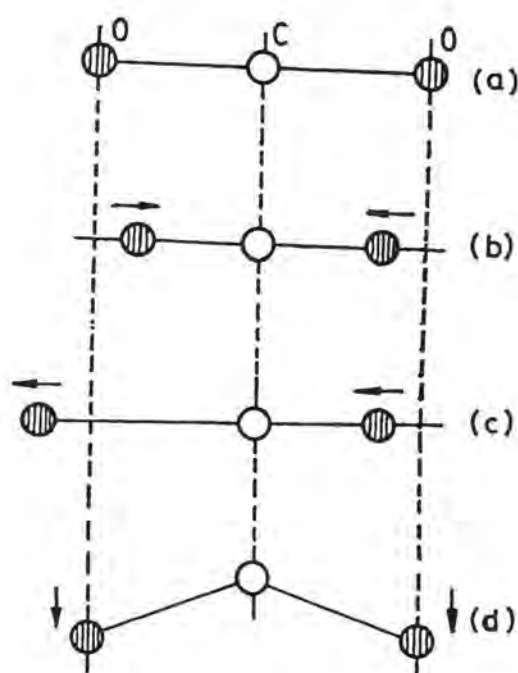
Na osnovu jednadžbi iz kvantne mehanike za  $E_0$ ,  $E_0$  i  $E_r$  dobivaju se energetske nivoi.



Slika 7. Oscilacijski (a) i oscilacijsko-rotacijski (b) energetske nivoi molekule



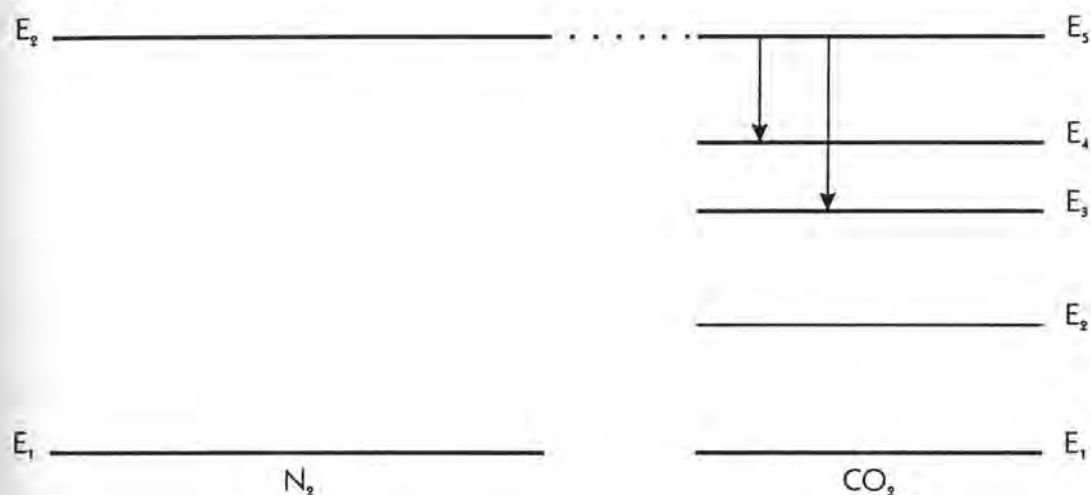
U molekuli koja se sastoji iz nekoliko atoma unutrašnja energija ovisi od energija svakog atoma i od energije oscilacijskog kretanja atoma oko nekog ravnotežnog položaja. Oscilacije atoma u molekuli su kvantizirane, a dozvoljene su samo one oscilacije koje se mogu opisati diskretnim skupom vrijednosti energije oscilacija. Najjednostavnija struktura oscilacijskih nivoa dobiva se za dvoatomske molekule  $O_2$ ,  $N_2$  itd. U tom slučaju moguće su samo simetrične oscilacije atoma uzduž osi molekula. Energetski nivoi u tom slučaju odgovaraju prikazu na slici 7a. Struktura oscilacija višeatomskih molekula je znatno složenija. Tako npr. oscilacije molekule ugljičnog dioksida imaju oblik prikazan na sljedećoj slici:



Slika 8. Moguće oscilacije molekule  $CO_2$ .

Između dva atoma kisika nalazi se atom ugljika. U takvoj molekuli moguća su tri oblika oscilacija: ravnotežno stanje, simetrične oscilacije, nesimetrične oscilacije, deformacijske oscilacije. Frekvencije ovih oscilacija mogu se definirati kao frekvencije normalnih oscilacija pri čemu se pod pojmom normalnih oscilacija podrazumijevaju harmonijske oscilacije koje postoje u linearnim oscilacijskim sustavima s više stupnjeva slobode kad se zanemari disipacija. Dakle u svakoj normalnoj osci-

laciji sve točke sustava osciliraju s istom frekvencijom pa je broj normalnih oscilacija jednak broju oscilacijskih stupnjeva slobode sustava. Također sve normalne oscilacije su međusobno nezavisne u smislu da se može pobuditi npr. samo jedna oscilacija između svih mogućih. Na taj način se skup frekvencija normalnih oscilacija određuje skupom vlastitih rezonantnih frekvencija oscilacijskog sustava. Analogno se može zaključiti da je pojam normalnih oscilacija u molekuli identičan pojmu moda u rezonatoru. CO<sub>2</sub> molekularni laser radi na principu induciranih prijelaza između oscilacijskih energetske nivoa molekula CO<sub>2</sub> čiji je pojednostavljeni dijagram prikazan na sljedećoj slici:



Slika 9. Energetski dijagrami oscilacijskih nivoa molekula dušika i ugljičnog dioksida (strelica pokazuje laserske prijelaze)

Molekula CO<sub>2</sub> ima tri frekvencije vlastitih oscilacija kojima odgovaraju energetske nivoi E<sub>3</sub>, E<sub>4</sub> i E<sub>5</sub>. U stvarnosti se iza nivoa E<sub>5</sub> nalaze još tri energetska nivoa: E<sub>6</sub>, E<sub>7</sub> i E<sub>8</sub> ali kod pražnjenja plina učestvuju uglavnom energetske nivoi E<sub>3</sub>, E<sub>4</sub> i E<sub>5</sub>. Inverzna naseljenost u molekuli može nastati na nekoliko načina:

- pobuda se postiže kada se molekula CO<sub>2</sub> sudari s elektronima pri pražnjenju plina. Ovaj način nije efikasan i ne koristi se u praktičnim izvedbama.
- drugi način pobude postiže se dodavanjem ugljičnom dioksidu plina dušika. Prilikom sudara elektrona s molekulama dolazi do povećanja njihove energije pri čemu molekule CO<sub>2</sub> zauzimaju nivo E<sub>5</sub>, a molekule

$N_2$  nivoe  $E_2$ . Pri tom oko 30% molekula  $N_2$  prelazi na nivo  $E_2$ . Kako molekule  $CO_2$  na nivou  $E_5$  imaju iste energije kao i molekule  $N_2$  na nivou  $E_2$ , kao rezultat neelastičnih sudara između ove dvije vrste molekula dolazi do rezonantne predaje energije čime molekule  $CO_2$  zauzimaju nivo  $E_5$ .

treći način pobude molekula  $CO_2$  vrši se sudarom ovih molekula s atomima helija (He). U ovom slučaju helij ostvaruje još jednu važnu ulogu, a to je hlađenje jer se prilikom sudara javlja povišena temperatura u plinskoj cijevi koja negativno utječe na inverznu naseljenost. Kako helij ima odličnu toplinsku vodljivost on omogućuje hlađenje plina iznutra. Umjesto helija može se koristiti i vodena para, a da bi se povećala snaga lasera plin unutar cijevi treba stalno mijenjati pomoću cirkulacije smjese. Tada se visokofrekventno pražnjenje u plinu ostvaruje pomoću istosmjernog napona ili pomoću napona čija je frekvencija 50 Hz.

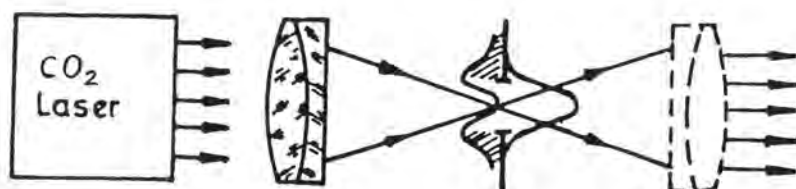
U stvarnosti svaki energetski oscilacijski nivo  $E_5$ ,  $E_4$  i  $E_3$  predstavlja skup diskretnih podnivoa, pa zato generacija laserskog snopa može nastati pri različitim frekvencijama (otprilike 100 frekvencija). Laserski prijelazi između nivoa  $E_5$  i nivoa  $E_4$  daju lasersku zraku valne duljine  $10,6 \mu\text{m}$ , a prijelazi  $E_5 - E_3$  lasersku zraku valne duljine  $9,6 \mu\text{m}$ . Deformacijskim oscilacijama odgovaraju prijelazi  $E_2 - E_1$  pri čemu bi se dobilo zračenje valne duljine od  $15,6 \mu\text{m}$ . Asimetričnim oscilacijama odgovarao bi prijelaz  $E_5 - E_1$  pri čemu bi se dobilo zračenje valne duljine od  $4,3 \mu\text{m}$ .

Za vođenje "laserske navigacije" predlaže se odabir laserske zrake valne duljine  $10,6 \mu\text{m}$ .

#### 2.4.1. Selekcija modova

Predloženi molekularni  $CO_2$  laser za potrebe "laserske navigacije" trebao bi raditi samo pri jednoj frekvenciji tj. u monomodnom režimu. Kako laseri imaju tendenciju da rade u polimodnom režimu jer naseljenost energetskih nivoa aktivnog materijala (aktivatora) može biti nehomogeno raspoređena postoji mogućnost

nezavisne pobude određenog broja uzdužnih i poprečnih modova u rezonatoru, koji nezavisno jedni od drugih dolaze u zasićenje. Zbog toga se lasersko zračenje sastoji od skupa diskretnih frekvencija. Većinom ne postoji interakcija modova, međutim za potrebe "laserske navigacije" potrebno je ograničiti broj modova. To se može postići selekcijom modova na različite načine. Tako se npr. u rezonator može ugraditi dijafragma koja ima otvor u sredini i propušta samo  $TEM_{00}$  mod dok modove višeg reda prigušuje. Dijafragma može biti ugrađena i izvan rezonatora.



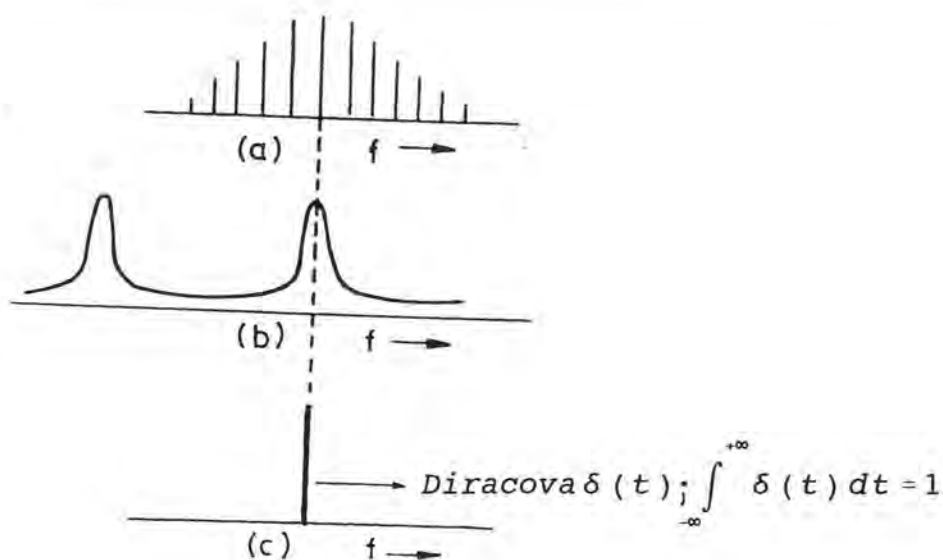
Slika 10. Vanjska selekcija poprečnih oscilacija pomoću dijafragme i dvije leće

Osnovni mod  $TEM_{00}$  ima raspodjelu energije kao što prikazuje dijagram desno od dijafragme dok prvi viši mod  $TEM_{10}$  ima raspodjelu energije koju prikazuje lijevi dijagram u odnosu na dijafragmu.

Šrafirano je prikazana energija koju ne propušta dijafragma. Razmak između frekvencija ovisan je o duljini rezonatora.

Vanjska selekcija<sup>4</sup> poprečnih modova može se npr. izvesti na sljedeći način: izlazno zračenje  $CO_2$  lasera propušta se kroz kraći Fabry-Perotov rezonator (interferometar) koji je podešen tako da propušta samo jedan mod od velikog broja modova koje laser zrači, dok druge modove reflektira.

<sup>4</sup> Maitland, A. - Dunn, H. M.: Laser Physics, Amsterdam-London, North Holland Publishing Co., 1969.



Slika 11. Vanjska selekcija modova:  
 (a) frekventni spektar izlazne zrake,  
 (b) karakteristika interferometra,  
 (c) izlaz signala iz interferometra

Da bi se izbjegla interakcija reflektiranih modova i modova lasera može se koristiti djelitelj npr. Glanova prizma. Za ujednačavanje Gaussovog mlaza zrake i interferometra može se koristiti leća. Stabilizacija izlazne zrake može se izvesti na razne načine.

Unutrašnja selekcija<sup>5</sup> modova može se npr. izvesti pomoću tri ogledala koja formiraju sekundarni rezonator koji se podešava na refleksiju onog moda koji je potreban u osnovnom rezonatoru. Tijekom rada lasera valja neprekidno održavati točan i stabilan (nepromijenjen) razmak između ogledala.

#### 2.4.2. Sinhronizacija modova

Pri slobodnoj generaciji u rezonatoru lasera nastaje više poprečnih i uzdužnih modova, a između tih modova unutar spektralne širine laserskog zračenja ne posto-

<sup>5</sup> Maitland, A. - Dunn, H. M.: Laser Physics, Amsterdam-London, North Holland Publishing Co., 1969.

je konstantni fazni odnosi u vremenu nego slučajna raspodjela faza. Zato je potrebno osigurati da lasersko zračenje nastane od modova koji imaju približno iste amplitude i konstantnu faznu razliku, što se može postići sinhronizacijom modova (engl. mode locking). Sinhronizacijom aksijalnih modova u laseru se postižu sljedeći učinci:

- laser zrači impulse s periodom

$$\tau = 2L/c \text{-----}(8)$$

gdje je:

L = duljina rezonatora

c = brzina svjetlosti

- vršna snaga lasera veća je za  $(2m + 1)$  puta od srednje snage lasera. Broj  $(2m + 1)$  označava broj sinhroniziranih modova,
- vršna amplituda električnog polja jednaka je produktu amplitude jednog moda i broja  $(2m + 1)$ ,
- dužina trajanja impulsa u režimu sinhronizacije modova iznosi:

$$T = 1/\Delta fg \text{-----}(9)$$

gdje je:

$\Delta fg = (2m + 1)^2 \Delta f$  ukupna širina spektra zračenja lasera

$\Delta f$  - frekventna razlika između dva uzastopna moda

Pri sinhronizaciji modova amplituda električnog polja proporcionalna je Fourierovoj transformaciji spektra amplituda.

Sinhronizacija modova može se izvesti na dva načina:

- metodom aktivne (vanjske) sinhronizacije modova pri čemu u laserski rezonator valja ugraditi modulacijski element (npr. Pokelsova ćelija) koja se napaja izvana i vrši modulaciju gubitaka u rezonatoru, odnosno mijenja koeficijent propuštanja svjetlosti u rezonatoru što se koristi

---

kod pulsnih lasera koji imaju relativno dugo vrijeme pobuđenog stanja, a cilj je dobiti kratke optičke impulse velikih snaga, metodom pasivne (unutrašnje) sinhronizacije modova kada se u rezonator ugrađuje nelinearni optički element (organska boja) odnosno pasivni filter.

### 3. TEORIJSKI MODEL LASERSKOG NAVIGACIJSKOG SUSTAVA

Projektiranje laserskog navigacijskog sustava je izuzetno složen i kompleksan proces, a sastoji se iz više faza koje su iterativno povezane i isprepletene u vremenu. U radu će se analizirati samo oni elementi koji su značajni za proces pozicioniranja tj. određivanja koordinata pozicije plovnog objekta u terestričkoj navigaciji bez detaljnih konstrukcijskih pojedinosti odnosno predočit će se opći teorijski model laserskog navigacijskog sustava s teorijskom razradom navigacijske problematike.

Pomorska površinska navigacija obuhvaća niz znanstvenih disciplina čiji je predmet proučavanja teorijska razrada postojećih i uvođenje novih metoda vođenja broda te analiza općih zakonomjernosti kretanja broda i čimbenika koji utječu na to kretanje. U teoriji navigacije proučavaju se također sredstva navigacije radi njihovog poboljšanja i stvaranja novih u skladu s razvojem znanosti, tehnike i potreba suvremenog plovljenja što je ujedno i cilj rada ove doktorske disertacije.

Treba istaći da navigator mora podjednako dobro poznavati sve discipline navigacije i navigacijska sredstva kako bi u određenoj konkretnoj situaciji upotrijebio one metode i sredstva koja pružaju najsigurnije, najpovoljnije i najbrže rješenje konkretnog zadatka. Praktički to znači da čak i u slučaju potpuno automatiziranog procesa vođenja broda samo navigator s potpunim teorijskim znanjem i odgovarajućim iskustvom može sigurno i pouzdano voditi brod na svim morima i oceanima i u svim vremenskim uvjetima.

Brodska navigacijska sredstva obuhvaćaju pribor, instrumente i tehnička pomagala za mjerenje navigacijskih parametara i drugih veličina i rješavanje pro-



blematike vođenja broda. Pribor i instrumenti čija uporaba na brodu nije vezana radom vanjskih sredstava mogu se uvjetno nazvati autonomna navigacijska sredstva. S druge strane pojam navigacijskog sustava može se definirati kao sva sredstva (i metode) navigacije koja su objedinjena u sustavu tehničke zavisnosti brodskih uređaja i uređaja na kopnu. Na osnovu iznijetog teorijski model predložen u ovom radu koji u osnovi objedinjuje i povezuje laserske svjetionike i laserske prijavnike na plovnom objektu čime se omogućuje proces vođenja plovnog objekta posebnom metodom nazvan je laserski navigacijski sustav (LNS).

U nastavku izvršit će se raščlamba između autonomnih navigacijskih sredstava i navigacijskih sustava. Autonomna navigacijska sredstva su:

- instrumenti za određivanje kutova (kompasi),
- instrumenti i uređaji za mjerenje kutova (npr. smjerna ploča, diopter, radar, ...),
- instrumenti za mjerenje brzine i prevaljenog puta (brzinomjeri),
- instrumenti i uređaji za mjerenje udaljenosti (daljinomjeri),
- instrumenti za mjerenje dubina (dubinomjeri),
- instrumenti za mjerenje vremena (satovi, kronometri),
- uređaji za vođenje zbrojene navigacije (kompjuteri, ...),
- pomagala s podacima o područjima plovljenja (pomorske karte, navigacijski priručnici),
- navigacijski pribor (navigacijski trokuti, šestari, računala),
- hidrometeorološki pribor (barometar, termometar, anemometar, faksimil, ...),

### 3.1. Pomorski navigacijski sustavi

Pomorske navigacijske sustave čine:

- radio-navigacijski sustavi
- hiperbolički navigacijski sustavi
- satelitski navigacijski sustavi

- podvodno-akustički navigacijski sustavi
- inercijalni navigacijski sustavi
- predloženi teorijski model laserskog navigacijskog sustava

Brodski navigacijski kompleks predstavlja objedinjenje navigacijskih sredstava i brodskih primopredajnih uređaja navigacijskih sustava čime se omogućuje istovremeno i automatsko rješavanje više različitih navigacijskih zadataka kao npr. određivanje koordinata pozicije broda, kursa, prevaljenog puta i proračun drugih navigacijskih parametara. Navigacijski kompleks je osnova automatskog metoda vođenja navigacije.

Po principu rada suvremena pomorska navigacijska sredstva su: mehanička, žiroskopska, magnetska, hidraulična, elektromagnetska, elektronska, inercijalna, optička, infracrvena i laserska.

Predloženi teorijski model LNs-a omogućuje automatsko vođenje broda u obalnoj plovidbi odabranom rutom primjenom novih metoda navigacije koje su obrađene i ponuđene u ovom radu.

Povijesno gledano s obzirom na sredstva i metode koje se koriste u pomorskoj navigaciji mogu se razlikovati dvije grupe sustava navigacije:

- klasični sustavi navigacije
- moderni sustavi navigacije (elektronska navigacija)

Predloženi teorijski model LNS-a spada u grupu modernih sustava navigacije.

S obzirom na područje plovljenja pomorska navigacija se može podijeliti na:

- obalnu
- oceansku i
- polarnu

Pri plovljenju u obalnom području kada su vidljivi objekti na obali primjenjuje se terestrička i elektronska navigacija.

Pri plovljenju na oceanu ili otvorenom moru primjenjuje se elektronska, astronomska i zbrojena navigacija.

Polarna navigacija se primjenjuje pri plovljenju u polarnom području kada se koriste specifične metode i sredstva.

Radi boljeg i potpunijeg razumijevanja problematike pomorske navigacije, potrebno je dati barem kratki osvrt na najčešće pogreške koje se javljaju kod temeljnih oblika vođenja pomorske navigacije:

a) Obalna (terestrička) navigacija

- pogreška paralakse,
- pogreška zbog zamjene luka velike kružnice lukom loksodrome,
- pogreška zbog pogrešno ucrtanih pozicija na pomorskim kartama nekih slabije istraženih područja svijeta,
- pogreške u magnetskoj varijaciji,
- pogreška devijacije magnetskog i žiro-kompasa, itd.

b) Oceanska (astronomska) navigacija

- pogreške seksanta (trajne i promjenjive),
- pogreške izmjerenih visina nebeskih tijela (stalne i slučajne),
- pogreške očitavanja vremena,
- aproksimacija krivulje položaja pravcem, itd.

c) Elektronska navigacija

- promjenjiva stanja u zraku i moru,
- pogreške kao posljedica otklona elektromagnetskih valova na području gdje se kopnene mase susreću s morskim tj. na morskoj obali,
- smetnje u atmosferi (sunčeve pjege, magnetske oluje, ...) itd.

Općenito za vođenje bilo kojeg oblika pomorske navigacije neophodan je određen broj informacija. Informacije se mogu primiti optičkim, akustičkim ili elektromagnetskim putem.

Navigacijski sustav kako je prethodno definiran spada u oblik proizvodnog sustava čiji je konačni proizvod navigacijski parametri u određenom vremenskom trenutku, dakle na osnovu određenog broja ulaznih informacija stvaraju se nove informacije koje omogućuju proces vođenja pomorske navigacije.

Pouzdanost nekog proizvodnog sustava ovisi o:

- pouzdanosti prostora ( $R_p$ ),
- pouzdanosti opreme ( $R_o$ ),

- pouzdanosti radnika ( $R_r$ ).

Analitički izraz pouzdanosti proizvodnog sustava glasi:

$$R_s = R_p \cdot R_o \cdot R_r \text{-----}(10)$$

Pouzdanost predloženog teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava je:

$$R_{LNS} = R_p \cdot R_o \text{-----}(11)$$

gdje je:

- $R_{LNS}$  - pouzdanost predloženog teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava
- $R_p$  - pouzdanost prostora. U ovom slučaju u prostor spada izvor informacija, sredstva i način prijenosa tih informacija od izvora do broda, atmosfere, hidrometeorološke prilike i razni prirodni fenomeni koji utječu na prijenos informacija.
- $R_o$  - pouzdanost opreme. U opremu spada laserski svjetionik-predajnik, laserski prijamnik plovnog objekta i sva pripadajuća oprema.

### 3.1.1. Pregled tehničkih karakteristika važnijih pomorsko-navigacijskih sustava

Za pomorsku navigaciju od naročitog su značaja sljedeći navigacijski sustavi:

- hiperbolički navigacijski sustavi,
- satelitski navigacijski sustavi,
- elektronski navigacijski sustavi visoke točnosti pozicioniranja,
- inercijalni navigacijski sustavi,
- podmorsko-akustički navigacijski sustavi.

Radi potpunijeg razumijevanja problematike koja se obrađuje u ovoj doktorskoj disertaciji obradit će se relevantne nautičko-tehničke karakteristike navedenih grupa navigacijskih sustava.

#### a) Hiperbolički navigacijski sustavi

U ovim sustavima stajnice su hiperbole. Hiperbolički sustavi se međusobno razlikuju po mjerenoj veličini (parametru) signala:

LORAN A sustav, koji se sastoji od jedne glavne (engl. Master) i nekoliko pomoćnih (engl. Slave) postaja što čini LORAN A lanac. Postaje LORAN A lanca emitiraju impulse trajanja  $10 \mu\text{s}$  s međusobnim razmakom ponavljanja impulsa (PRF - Pulse Repetition Frequency) koji varira od lanca do lanca. Loran A sustav koristi tri radne frekvencije u području srednjeg vala i to 1950 kHz, 1850 kHz i 1900 kHz. Siguran domet površinskim valovima LORAN A sustava iznosi po danu od 600 do 900 M, a noću na udaljenostima od 600 do 1400 M prima se samo prostorni val, pa izmjerene vrijednosti vremenskih razlika valja korigirati.

Teorijska veličina srednje kvadratne pogreške pozicije iznosi:

$$\delta = \pm 0,5 \text{ M uz prijem površinskih valova,}$$

$$\delta = \pm 1,3 \text{ M uz prijem prostornih valova.}$$

Stvarne pogreške su veće i do tri puta.

LORAN C sustav, sastoji se od glavne postaje i tri do četiri sekundarne postaje označene slovima W, X, Y, Z. Rad postaja sinhroniziran je "atomskim oscilatorom". Radna frekvencija je od 85 do 115 kHz, najčešće 100 kHz. Sa snagama odašiljača od 300 kW postiže se domet od 1200 M površinskim valovima i 2300 do 3400 M prostornim valovima.

Osnovna karakteristika svakog lanca LORAN C sustava je vremenski interval između dvije grupe impulsa glavne postaje (engl. GRI - Group Repetition Interval). Uporabljivi površinski valovi se mogu detektirati na udaljenostima od 1200 M, jednom odbijeni prostorni valovi na 2300 M, a dvaput odbijeni na 2400 M. Pogreške LORAN C sustava mogu se iskazati na sljedeći način:

- pogreška sinhronizacije sata glavne i sekundarnih postaja manja je od  $\pm 0,1 \mu\text{s}$ ,
- pogreška zbog širenja signala preko kopna može narasti i do  $10 \mu\text{s}$ , ali rijetko prelazi vrijednost  $3 \mu\text{s}$ ,
- izobličenje envelope signala može u najgorem slučaju narasti do  $10 \mu\text{s}$ , ali je najčešće u granicama od 1 do  $2 \mu\text{s}$ ,

- pogreška prijavnika s automatskim određivanjem poredbene točke u slučaju jakog šuma ili prostornih valova može biti 10, 20 ili 30  $\mu$ s.

Točnost pozicioniranja pomoću ovog sustava korištenjem površinskih valova je  $\pm 0,25$  M, dok prostorni valovi mogu smanjiti točnost na  $\pm 1$  do 10 M.

DECCA sustav, sastoji se od jedne glavne i dvije do tri pomoćne postaje. To je fazni sustav, a razlika udaljenosti između prijavnika i jednog para postaja određuje se mjerenjem fazne razlike njihovih signala. Svaki DECCA lanac ima osnovnu frekvenciju koja se kreće u granicama od 14.01666 do 14.3175 kHz. Radne frekvencije postaja su cjelobrojni višekratnici osnovne frekvencije.

Točnost pozicioniranja pomoću određenog DECCA lanca moguće je definirati pomoću statističke analize pogreški tog konkretnog lanca. Također točnost pozicioniranja pomoću DECCA sustava znatno ovisi o dobi dana (sumrak, ljeto, ...) i trajanja dobi dana u ovisnosti o godišnjoj dobi, a okvirno se kreće u granicama od  $\pm 0,1$  M do  $\pm 1,5$  M.

OMEGA sustav, čini osam postaja raspoređenih po površini Zemlje. Radna frekvencija sustava je 10,2 kHz a po načinu rada to je fazni sustav. Točnost pozicioniranja kreće se u granicama od 1,5 do 2 M po danu, 2 do 3 M po noći i preko 3 M u sumrak.

DIFERENCIJALNI OMEGA sustav, omogućuje znatno veću točnost pozicioniranja, ali mu je domet ograničen na 200 do 250 M. Točnost određivanja koordinata pozicije broda kreće se u granicama od  $\pm 0,3$  do  $\pm 0,5$  M kada se brod nalazi u blizini monitorske postaje.

#### b) Satelitski navigacijski sustavi

TRANSIT sustav, razvijan je od 1958. do 1963. godine od strane Ratne mornarice Sjedinjenih Američkih Država. Čini ga pet satelita koji kruže oko Zemlje na visini od približno 1075 km u polarnim orbitama. Sateliti su u vezi sa Zemaljskim postajama i korisnicima na frekvencijama od 150 MHz i 400

MHz. Okvirna točnost pozicioniranja je u granicama od 50 do 90 m. Ovaj sustav se napušta i zamjenjuje sustavom GPS.

NAVSTAR ili GPS (Global Positioning System). Planirano je da se u orbitu lansira 24 satelita na visini od 20 200 km koji omogućuju dobivanje pozicije korisnika u tri dimenzije. Ovaj sustav nije kompatibilan s TRANSIT sustavom. Frekvencija pozicioniranja je od 0,6 do 1,2 sekunde.

DIFERENCIJALNI GPS sustav, znatno povećava točnost pozicioniranja. Ovisno o proizvođaču domet se kreće u granicama od 100 do 600 km od motrilačke postaje čije su koordinate utvrđene preciznim geodetskim mjerenjima. U nastavku dat će se podaci nekoliko poznatih svjetskih proizvođača;

OCEANICS MN8 DIFFERENTIAL GPS:

pokrivenost: sjeverozapadna Europa, Srednji Istok, Daleki Istok, Mediteran, Zapadna Afrika, ...

Točnost pozicioniranja:  $\leq 3$  m uz vjerojatnost od 95%.

SERCEL DIFFERENTIAL GPS:

Horizontalna točnost pozicije s PDOP  $\leq 6$  i S/A neaktivirano  $\leq 20$  m/2  $d_{RMS}$

Diferencijalna pozicija:  $\leq 5$  m/ $d_{RMS}$

Točnost određivanja brzine objekta:  $\leq 5$  cm/sek  $\pm 1\%$

Frekvencija pozicioniranja: 0,6 sekundi

Vrijeme do prvog Fixa:  $\leq 2$  minute

Maksimalna brzina objekta: 500 km/h

DELTA FIX SR

Točnost pozicioniranja: od 1 do 3 m uz PDOP  $\leq 6$

Treba istaći da je osnovni nedostatak GPS sustava direktna ovisnost korisnika o korištenom kodu, naime promjenom koda može se bitno ograničiti preciznost pozicioniranja ili čak onemogućiti pozicioniranje.

**c) Elektronski navigacijski sustavi visoke točnosti pozicioniranja**

Točnost određivanja pozicije hiperboličkim sustavima koji koriste vrlo niske, niske i srednje frekvencije je zadovoljavajuća za potrebe oceanske navigacije. Za

potrebe obalne navigacije naročito u područjima gustog pomorskog prometa i područjima s plovidbenim opasnostima potrebno je određivati poziciju u kratkim vremenskim intervalima s točnošću od nekoliko metara. Za te potrebe pored diferencijalnog GPS-a, mogu se koristiti elektronski navigacijski sustavi visoke točnosti pozicioniranja. Ovi sustavi koriste frekvencije iznad 3 MHz, a za određivanje stajnica koristi se "kružna metoda", "hiperbolična metoda" ili njihova kombinacija. "Kružna metoda" koristi kružnicu kao stajnicu, a sastoji se u mjerenju dviju ili više udaljenosti od postaja smještenih na poznatim pozicijama. Udaljenost se može izmjeriti pasivnim ili aktivnim načinom. Kod "hiperbolične metode" stajnica je hiperbola koja se dobije mjerenjem razlike u vremenu ili razlike u fazi dvaju primljenih signala.

- Sustav "MINI-RANGER", frekventni opseg sustava je od 5,4 do 5,6 GHz, a domet do 30 M ( $\pm 10$  M). Točnost mjerenja udaljenosti iznosi  $\pm 2$  m. Srednje kvadratna pogreška pozicije određena s dvije stajnice iznosi od 2,8 do 4 m.
- Sustav "TRISPONDER", frekventni opseg sustava je od 8,8 do 9,0 GHz i od 9,3 do 9,5 GHz, a domet do 100 M. Za određivanje stajnica koristi se "kružna metoda", a točnost mjerenja udaljenosti iznosi  $\pm 2$  m. Srednje kvadratna pogreška pozicije određena ovim sustavom ista je kao i kod sustava "MINI-RANGER".
- Sustav "HI-FIX/6", koristi frekvencije između 1,6 MHz i 5,0 MHz čime se postiže domet od 300 M. Za određivanje stajnice koristi se "kružna" i "hiperbolična metoda". Kod "kružne metode" točnost mjerenja udaljenosti iznosi  $\pm 2$  m, a srednje kvadratna pogreška pozicije iznosi od 3 do 4 m.
- Sustav "HYPER FIX", koristi frekvencije od 1,6 do 3,4 MHz čime se postiže domet od 700 M danju, a 300 M noću. Točnost mjerenja udaljenosti na baznoj liniji iznosi  $\pm 1$  m. Pozicija broda se može odrediti s deset stajnica, što daje srednje kvadratnu pogrešku pozicije u iznosu od 1 do 5 m.
- Sustav "RAYDIST", koristi frekvencije 1,6 MHz i 3,3 MHz. Domet je do 250 M danju i 150 M noću. Širina pojasa za frekvenciju od 3,3 MHz je 45,5 m,



a preciznost mjerenja od 0,01 širine pojasa daje ponovljivu točnost određivanja dijela pojasa ispod  $\pm 2$  m na baznoj liniji.

Sustav "SYLEDIS", koristi frekvencije od 408 do 434 MHz i od 422 do 448 MHz, a emitiraju se kodirani impulsi u trajanju od 2,6  $\mu$ s. Domet iznosi do 160 M. Za određivanje stajnice koristi se "kružna" ili "hiperbolična metoda". Točnost mjerenja udaljenosti je u granicama od  $\pm 1$  do  $\pm 3$  m. Vremenske nepogode znatno smanjuju domet sustava. Srednje kvadratna pogreška pozicije određena ovim sustavom iznosi od 1 do 5 m, a pri lošim vremenskim uvjetima od 20 do 40 m.

#### d) Podmorsko-akustički navigacijski sustav

Pomoću odgovarajućih podmorskih instrumenata (transpondera) i uređaja na matičnom površinskom brodu ovaj sustav omogućuje ronionicima preciznu podvodnu orijentaciju, indentifikaciju i pozicioniranje objekata na dnu mora itd.

Sastoji se od sljedećih komponenata;

- Brodski procesorski podsustav (SPS - Shipboard Processing Subsystem) koji sačinjava: višekanalski akustički radio primopredajnik, podvodna ronilica, preobličivač zvuka, sklop kabela, kompjuter s CRT video-pozicijskim displayom, plotter, printer te kalibracijsko-navigacijski software.
- Pridneni podsustav transpondera (SAS - Seabed array Subsystem) čini četiri transpondera učvršćena na morskom dnu koji se koriste kao referentne točke za pozicioniranje položaja ronioca.
- Roniočeva podmorska jedinica (DSU - Diver Subsea unit) koja obuhvaća akustički višekanalski prislušni procesor postavljen na leđima ronioca te pozicijsko-monitorski display postavljen na ruci ronioca.
- Podsustav podmorskog pozicioniranja (Submersible positioning) koji koristi modificirani DSU modul. Omogućuje pozicioniranje podmorskih i pridnenih objekata u tri dimenzije. Ti podaci se akustički predaju matičnom površinskom brodu.

Podmorsko-akustički navigacijski sustav radi na frekvenciji od 30 kHz, akustička razina izvora zvuka iznosi 188 db a operativne dubine mora od 91 do 6096 m. Točnost pozicioniranja iznosi  $\pm 1$  m na površini od približno 1 km x 1 km. Ronilac se na jednom utvrđenu poziciju definiranu koordinatama (x, y) može vratiti s točnošću od  $\pm 0,5$  m.

#### e) Inercijalni navigacijski sustavi

Inercijalni navigacijski sustav spada u tzv. zatvorene navigacijske sustave jer se kompletna komunikacija između sastavnih elemenata sustava odvija unutar samog plovila. Otvoreni navigacijski sustavi su oni koji imaju vezu tj. komunikaciju s vanjskim prostorom izvan samog plovila. Postoje dvije vrste inercijalnih navigacijskih sustava.

1) Inercijalni navigacijski sustav sa stabiliziranom platformom čine sljedeće komponente:

- stabilizirana platforma horizonta koja treba što točnije održavati pravilan smjer osi horizontalnog geografskog koordinatnog sustava,
- tri akcelometra koja trebaju kontinuirano registrirati i vrlo mala ubrzanja u smjeru N - S i E - W i promjene po vertikali,
- računarski sustav koji na osnovu izmjerenih ubrzanja i polaznih koordinata izračunava aktualne tekuće koordinate plovnog objekta ili ronilice,
- sustav za uklanjanje: centripetalnog ubrzanja zbog kretanja broda komponentom brzine po paraleli, Coriolisovog ubrzanja izazvanog djelovanjem rotacije Zemlje i kretanja broda, Coriolisovog ubrzanja izazvanog djelovanjem vertikalne kutne brzine rotacije Zemlje i komponente brzine broda po meridianu te ukupno linijsko ubrzanje broda po paraleli. Ova ubrzanja registriraju akcelometri, a stvarno ne ulaze u kretanje broda te ih treba eliminirati. Osnovni nedostatak ovog sustava inercijalne navigacije je nemogućnost primjene na visokim geografskim širinama, jer se ubrzanje naglo povećava zbog viših geografskih širina.

## II) Precesijski inercijalni navigacijski sustav čine:

Tri integrirajuća žiroskopa smještena u prstenu azimuta i prstenu geografske širine. Mjerna os dužinskog žiroskopa je paralelna s rotacijskom osi Zemlje, meridijanskog žiroskopa je u ravnini meridijana i okomita na os Zemlje, a mjerna os trećeg žiroskopa je horizontalna i položena u smjeru E - W. Oba prstena prateći motori održavaju u nepromijenjenom položaju tj. u ravnini meridijana i paralele. Na prstenu azimuta je dvoosni akcelometar koji registrira ubrzanje u smjeru meridijana (N - S) i paralele (E - W) na temelju čega se dvostrukim integriranjem dobivaju relativne koordinate  $\Delta\varphi$  i  $\Delta\lambda$  odnosno tekuće koordinate plovila. Integrirani signali s akceleratora N - S se dovode na prateći motor prstena geografske širine zakrećući ga za nastalu promjenu zbog kretanja broda po meridijanu. Također integrirani signali s akcelometra E - W se dovode na prateći motor prstena azimuta zakrećući ga za vrijednost  $\Delta\lambda$  nastale zbog kretanja broda po paraleli. Na taj način os dužinskog žiroskopa ostaje uvijek paralelna rotacijskoj osi zemlje, a akcelometri u smjeru N - S i E - W. Nedostatak ovog sustava inercijalne navigacije je otežano postavljanje dužinskog žiroskopa paralelno rotacijskoj osi Zemlje što zahtijeva duži boravak broda u lukama specijaliziranim i opremljenim za tu namjenu.

Pogreške sustava inercijalne navigacije su sustavne i slučajne. Sustavne pogreške predstavljaju osnovne i instrumentalne pogreške. Osnovne pogreške su pogreške izazvane oblikom Zemlje te pogreške zbog nepotpune kompenzacije ubrzanja mjerenih akcelometara. Instrumentalne pogreške su izazvane netočnim položajem stabilizirane platforme, izbijanjem osi žiroskopa te pogreškama akcelometra. Slučajne pogreške se ne mogu točno odrediti niti razjasniti uzroci njihovog nastanka.

Na osnovu izloženog može se zaključiti da se srednje kvadratna pogreška pozicije određena ovim sustavom navigacije povećava s vremenom, prosječno iznosi oko  $\pm 400$  m što ovisi o proteklom vremenu u plovidbi, a tijekom 24 sata neprekidne plovidbe dostiže vrijednost od  $\pm 2$  M. Zbog toga sustav inercijalne

navigacije zahtijeva kontrolu i korekciju pozicije pomoću nekog drugog navigacijskog sustava. U slučaju kada se uz inercijalni navigacijski sustav koristi i neki hiperbolički ili satelitski navigacijski sustav za kontrolu i korekciju pozicije formira se tzv. mješoviti (hibridni) navigacijski sustav.

### 3.1.2. Elektronska navigacija

Pojam elektronska navigacija kako se koristi u ovom radu obuhvaća sredstva i metode vođenja broda korištenjem elektro-magnetskih valova. Sredstva i metode elektronske navigacije potvrdila su svoju neprocjenjivu vrijednost u miru i ratu, a njihov daljnji razvoj usmjeren je k povećanju stupnja točnosti i pouzdanosti pozicioniranja, kompleksnijem prekrivanju svjetskih mora i oceana alternativnim sustavima, uvođenju u rad novih sustava posebno specijalne namjene i povećanju stupnja automatizacije u plovidbi broda.

Modernizacija i povećanje stupnja automatizacije postojećih elektronskih navigacijskih sustava i uređaja te zamjena i uvođenje novih sustava i uređaja točnijim i pouzdanijim je sadašnji trend razvoja elektronske navigacije. Pri tom je sve izraženija pojava visokotočnih navigacijskih sustava malog dometa za posebne namjene čiji je osnovni nedostatak nemogućnost standardizacije (npr. Hyper Fix, Syledis, Raydist, ...). Predloženi model "laserske navigacije" koji spada upravo u tu grupu sustava karakterizira upravo mogućnost standardizacije i mogućnost univerzalne primjene na svim morima svijeta.

Elektronska navigacija kao dio pomorske navigacije može se podijeliti u sljedeće grupe:

- radio-navigacija,
- radarska navigacija,
- hiperbolična navigacija,
- inercijalna navigacija,
- satelitska navigacija,

- podvodno-akustička navigacija,
- predložena "laserska navigacija".

Ova podjela je uvjetna jer je moguće koristiti i druge kriterije za podjelu, a kakvi se u literaturi mogu susresti (npr. Dopplerova navigacija, ultrazvučna navigacija, itd.)

Navedena podjela učinjena je u odnosu na konstrukciju i različitost tehničkih i geometrijskih principa na kojima rade elektronska navigacijska sredstva. Neka od tih se sastoje samo od brodskih uređaja, a neka samo od elemenata smještenih van broda.

Sva elektronska navigacijska sredstva, uređaji i sustavi mogu se podijeliti prema:

- geometrijskom principu određivanja navigacijskog parametra,
- tehničkom principu mjerenja navigacijskog parametra,
- dometu rada,
- mjestu razmještaja sastavnih elemenata sustava.

Po geometrijskom principu određivanja navigacijskog parametra sredstva se mogu podijeliti na:

- azimutna (kutomjerna) kod kojih se mjeri samo azimut (kut) na izvor emitiranja (npr. radio-goniometar, radio-far, ...)
- daljinomjerna kod kojih se mjeri udaljenost ili promjena udaljenosti od izvora emitiranja do plovnog objekta (npr. dubinomjer, radio-daljinomjer, laserski daljinomjer, Transit, radio-brzinomjer, ...),
- hiperbolična kod kojih se mjeri razlika udaljenosti od dvije postaje na kopnu ili u svemiru (npr. Decca, Loran, Omega, ...),
- radijalno-brzinska kod kojih se mjeri brzina približavanja (ili udaljenosti) izvora emitiranja od motritelja na plovnom objektu,
- kombinirana koja omogućuju mjerenje dva parametra (npr. radar, ...).

Navigacijski parametri se obično ne određuju direktno nego posrednim mjerenjem električnih veličina. Prema principu rada tj. prema električnom parametru kojeg mjere elektronska navigacijska sredstva se mogu podijeliti na:

- amplitudna (radio-goniometar, ...)
- fazna (Decca, Omega)
- impulsna (Loran A i C, radar, Navstar/GPS, ...)
- frekventna (Transit)
- kombinirana

Geometrijski i tehnički principi nisu međusobno strogo vezani jer se jedan navigacijski parametar može mjeriti koristeći više tehničkih principa i obratno.

Prema dometu rada elektronska navigacijska sredstva se mogu podijeliti na:

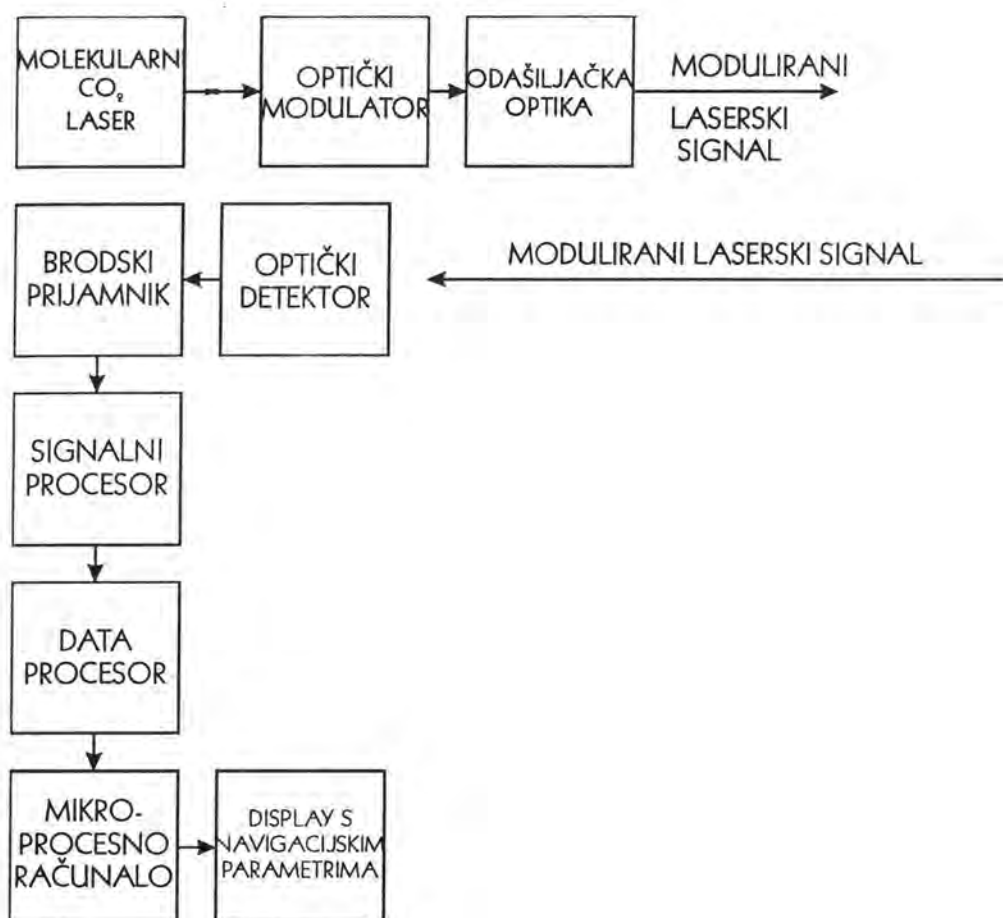
- globalna koja prekrivaju čitavu površinu Zemlje,
- velikog dometa kod kojih je prijem korisnih signala na udaljenostima od 300 do 2500 M,
- srednjeg dometa od 100 do 300 M,
- malog dometa kod kojih je prijem korisnih signala na udaljenosti manjoj od 100 M, gdje spada i predloženi teorijski model laserskog navigacijskog sustava.

Prema mjestu postavljanja jedinica navigacijskog sustava elektronska navigacijska sredstva se mogu podijeliti na:

- kopnena (predajnici na kopnu),
- svemirska (predajnici na satelitima u svemiru)
- podmorska (predajnici smješteni ispod površine mora).

### 3.2. Laserska navigacija

Uvođenjem predloženog modela laserskog navigacijskog sustava u navigacijsku znanost može se uvesti novi pojam: "laserska navigacija". Pojam "laserska navigacija" se može definirati kao proces vođenja broda odnosno plovnog objekta pomoću laserskih zraka odgovarajućim sredstvima i metodama na udaljenosti do 20 M od obale. Za potrebe izvođenja "laserske navigacije" predlaže se teorijski model laserskog navigacijskog sustava.



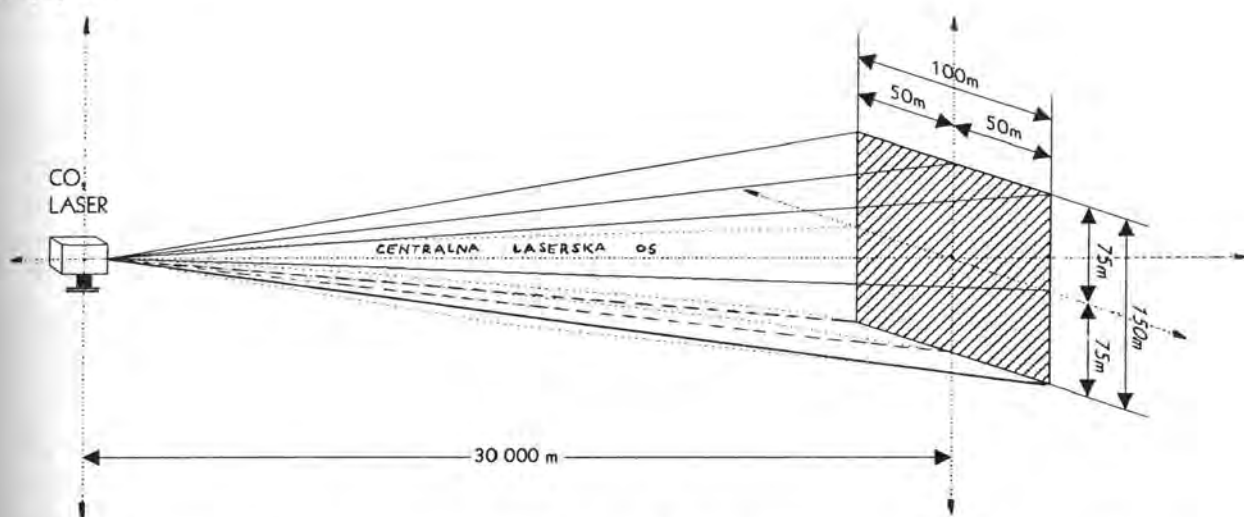
Slika 12. Blok shema predloženog modela laserskog navigacijskog sustava

Za pozicioniranje pomoću predloženog teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava razrađena je "kutna metoda" koja će se u sljedećoj točki detaljno objasniti.

### 3.2.1. "Kutna metoda" pozicioniranja pomoću predloženog teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava

Kako je osnovna veličina na kojoj se bazira proces vođenja "laserske navigacije" kut predložena metoda nazvana je "kutna metoda". Predlaže se da predajnik laserskog svjetionika bude molekularni CO<sub>2</sub> laser valne duljine 10,6 μm, kon-

tinuirane snage 40 W koji se može modulirati s impulsima frekvencije 1 MHz. Za potrebe obalne navigacije do udaljenosti laserskog horizonta 30 000 m  $\cong 16,198704$  M prema podacima iz literature ukupni gubici snage laserskog signala ne bi bili veći od 10 dB (omjer snage predajnika i prijarnika plovnog objekta od 10 : 1), što bi na udaljenosti od 30 km na ulazu prijarnika plovnog objekta dalo snagu od 4 W. Da bi se zadovoljio uvjet terestričkog pozicioniranja, laserski snop na udaljenosti od 30 km od laserskog predajnika trebao bi imati oblik prikazan na donjoj slici:

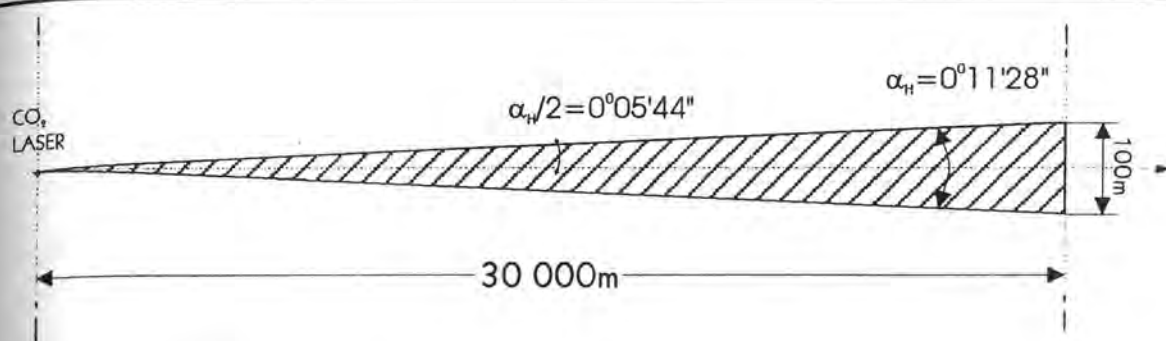


Slika 13. Presjek laserskog snopa na udaljenosti od 30 000 m od laserskog predajnika.

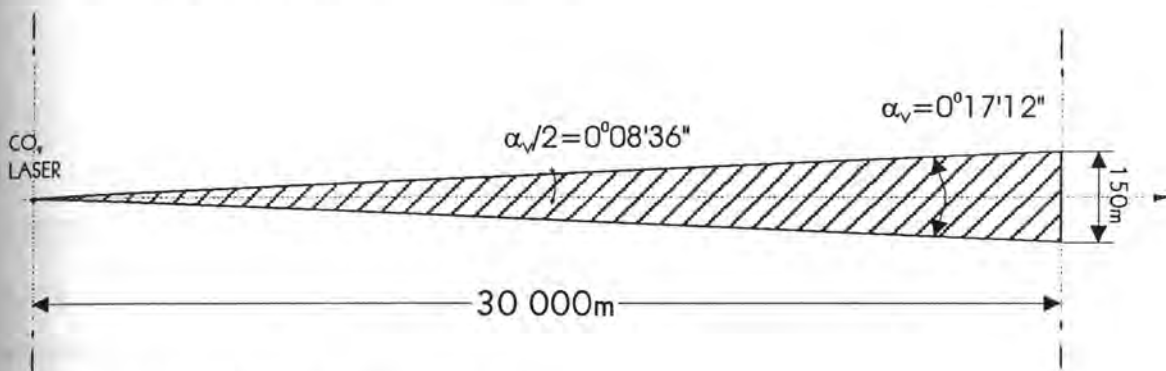
Na osnovu postavljenog uvjeta divergencija laserske zrake treba iznositi:

- horizontalno  $\alpha_H = 0^{\circ} 11' 28''$
- vertikalno  $\alpha_V = 0^{\circ} 17' 12''$





a) Horizontalna ravnina

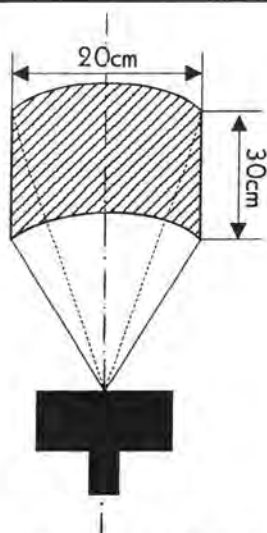


b) Verikalna ravnina

Slika 14. Divergencija laserske zrake u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini

Na osnovu postavljenog uvjeta na udaljenosti od 30 000 m od laserskog predajnika površina poprečnog presjeka  $A$  laserskog snopa iznosi:  $A = 150 \cdot 10^3 \text{ m}^2 = 1,5 \cdot 10^8 \text{ cm}^2$ , što daje gustoću snage:  $P_d = 4 \cdot 10^6 \mu\text{W} / 1,5 \cdot 10^8 \text{ cm}^2 \cong 0,026 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ .

Da bi se na ulazu laserskog prijmnika plovnog objekta dobila zadovoljavajuća snaga laserskog signala površina kolektora prijmnika mora biti najmanje  $600 \text{ cm}^2$ .



Slika 15. Dimenzije kolektora laserskog prijavnika plovnog objekta

Kolektor laserskog prijavnika plovnog objekta veličine 30 cm x 20 cm, površine  $A_1 = 600 \text{ cm}^2$  prikupio bi snagu laserskog signala:  $P_1 = P_d \cdot A_1 \cong 15,6 \mu\text{W}$  ili neku drugu vrijednost ovisno o vremenskim uvjetima tj. stanju atmosfere. Dobivena vrijednost snage  $P_1$  je dovoljna za pouzdan rad laserskog prijavnika plovnog objekta.

Laserski predajnik laserskog svjetionika treba emitirati tako da se laserski snop okreće vodoravno kutnom brzinom od  $200^\circ/\text{sek}$ , odnosno  $0,2^\circ/\text{msek}$ .

Molekularni  $\text{CO}_2$  laser valja modulirati tako da u jednom smjeru šalje detalje (znak raspoznavanja ili Cartesiusove koordinate laserskog svjetionika) i kuteve ( $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ )-10 impulsa, zatim se treba zarotirati za kut od  $0,25^\circ$  i opet ponoviti detalje (znak raspoznavanja ili Cartesiusove koordinate svoje pozicije i nove kuteve ( $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ )-10 impulsa, itd. čime bi se dobilo 20 impulsa za jedan smjer, 80 impulsa za jedan stupanj i ako radi u sektoru od  $200^\circ$  dobilo bi se 1600 impulsa. To se može učiniti za 0,5 sekundi tj. s 32 kHz modulacije, s tim da laser treba biti moduliran optički.

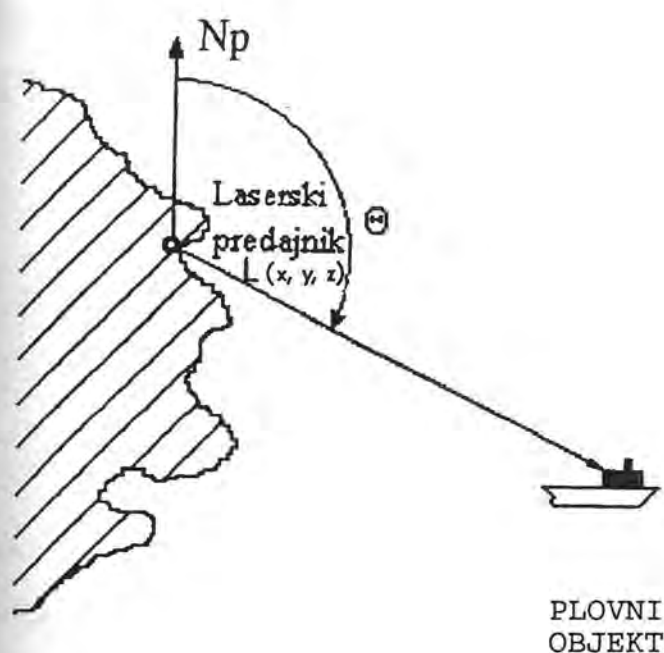
Za testiranje i praktična mjerenja predloženog teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava moguće je primijeniti npr. već postojeći laser:

"United technology optical systems"

Tip LC 40 40 W

$\lambda = 10,6 \mu\text{m}$

TEM mode sa linearnom polarizacijom.



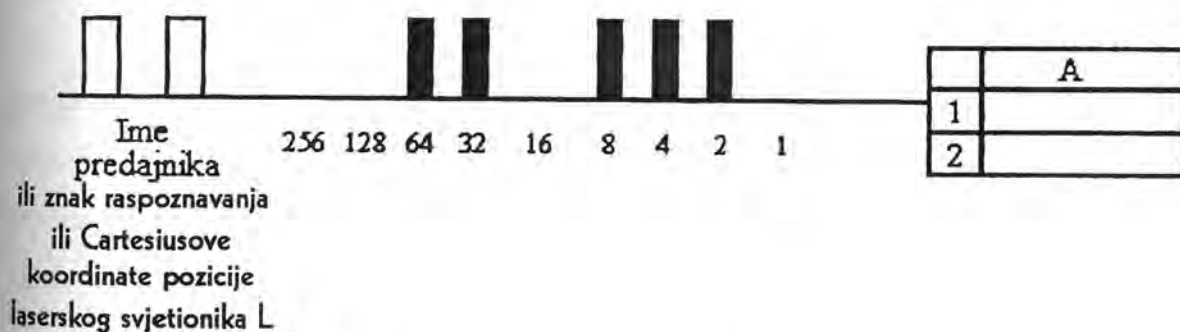
$(x, y, z)$  - Cartesiusove koordinate laserskog svjetionika  $L$

$\theta$  - azimut pravi laserskog svjetionika

$\alpha$  - kut koji zatvara centralna os laserskog snopa s osi  $x$  Cartesiusovog koordinatnog sustava

$\beta$  - kut koji zatvara centralna os laserskog snopa s osi  $y$  Cartesiusovog koordinatnog sustava

Slika 16. Relevantne karakteristike laserskog svjetionika  $L$



Slika 17. Binarni oblik informacije kuteva  $(\theta, \alpha, \beta)$

Detektorski sustav prijavnika na plovnom objektu treba se okretati tako da sigurno primi signale iz predajnika  $1^\circ$  na sekundu ili  $360^\circ$  za 6 minuta, čime bi se omogućilo dobivanje pozicije prijavnika svakih 6 minuta. Da bi se povećala frekvencija dobivanja koordinata pozicije plovnog objekta valja postaviti 4 prijavnika na zajedničku platformu tako da su međusobno otklonjeni za kut od  $90^\circ$ . Prijamnik treba biti spojen na specijalizirani računarski sustav. Okretanje platforme ne treba

biti vrlo točno, ali svakako ne brže od  $1^{\circ}$  na sekundu. S četiri prijavnika dobile bi se koordinate četiri pozicije na ekranu display-a:

1. Pozicija sad (trenutna)
2. Pozicija prije 90 sekundi
3. Pozicija prije 180 sekundi
4. Pozicija prije 270 sekundi

Prijamnik (IR detektor) za valnu duljinu  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$  dimenzija  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  treba biti hlađen pomoću električnog hladećeg sustava (Thermo electric Cooler). Radna temperatura treba biti ispod  $20^{\circ}\text{C}$  naime, što je niža temperatura manje je smetnji (termalni šum).

Za sada je jedini problem dužina života lasera ovog tipa koja danas iznosi oko 4000 sati odnosno otprilike šest mjeseci, međutim i tu je u znanosti stalni napredak.

Da bi se omogućilo povećanje učestalosti pozicioniranja od 90 sekundi na 1 sekundu antena na brodu se ne bi okretala nego bi detektor bio ugrađen u kugli ili cilindru germanija koji bi služio kao sabirna leća. U tom slučaju detektor bi trebao biti osjetljiviji od prijašnjeg. Takvih detektora još nema na tržištu, ali već postoje u laboratorijama.

Konačno mikroprocesorsko računalo laserskog prijavnika nakon dobivenih informacija od najmanje dva laserska svjetionika izračunava koordinate pozicije plovnog objekta s frekvencijom pozicioniranja svakih 90 sekundi po prvoj varijanti, odnosno s frekvencijom pozicioniranja svaku jednu sekundu po drugoj varijanti.

### 3.3. Analiza utjecaja fizikalnih pojava koje mijenjaju koordinate Zemaljskih pozicija na pozicioniranje pomoću predloženog teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava

Geografske i Cartesiusove koordinate pozicija na Zemlji nisu nepromjenjive nego se mijenjaju zbog:

- pojave periodičnog i sekularnog pomicanja Zemaljskih polova,
- pojave pomicanja Zemaljskih kontinenata.

U nastavku obradit će se utjecaj ovih pojava na pozicioniranje pomoću predložene teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava.

### 3.3.1. Pojava periodičnog pomicanja Zemaljskih polova

Precesija i nutacija su pojave koje mijenjaju položaj Zemaljske rotacijske osi u prostoru nebeske sfere, ali ne i u unutrašnjosti same Zemlje. Zbog toga one mijenjaju nebeske koordinate nebeskih tijela, ali ne mijenjaju Zemaljske koordinate pozicija na Zemlji.

Međutim Zemaljska rotacijska os zadržavajući svoju orijentaciju u prostoru mijenja svoj položaj u samoj Zemaljskoj masi. Zbog toga dolazi do pojave periodičnog pomicanja Zemaljskih polova tj. do promjene koordinatnog sustava u kojem se određuju položaji pozicija na Zemlji. Dakle zbog ove pojave mijenjaju se Zemaljske koordinate pozicija na Zemlji, a ne mijenjaju se nebeske koordinate nebeskih tijela.

Polovicom XVIII stoljeća D'Alembert i Euler su dokazali da kod čvrstog tijela koje slobodno rotira oko jedne točke mora dolaziti do periodičnog pomicanja rotacijske osi oko glavne polarne osi inercije, ako je raspored masa u njemu promjenljiv i na njemu nesimetričan ili ako je tijelo nehomogeno. Ruski astronom Peters otkrio je polovicom XIX stoljeća da se geografska širina točke na Zemlji mijenja tijekom vremena. Otkrićem promjenjivosti geografskih širina D'Alembert-Eulerovo teorijsko predviđanje ispunilo se je u slučaju Zemlje kao rotacijskog tijela nehomogene mase. Za vrijednost jednog punog obilaska Zemaljskog pola po kružnoj putanji u direktnom smjeru pod pretpostavkom čvrste Zemlje dobivena je perioda od 305 dana. Američki astronom Chandler je ustanovio da pomicanje Zemaljskih polova ima dvije periode: jednu od oko 14 mjeseci (428,1 dan) i drugu godišnju koja ima vrlo promjenljivu amplitudu.

S čisto teorijskog stanovišta ovo Zemaljsko kretanje još nije potpuno objašnjeno. Putanja pola je složena spirala koja na Zemaljskoj površini ne izlazi iz okvira kvadrata sa stranicama od otprilike 25 metara.

Kako je pozicioniranje pomoću predloženog teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava precizno to se za numeričko izračunavanje koordinata pozicije plovnog objekta treba koristiti jedinstveni koordinatni sustav u kojem je položaj Zemaljske rotacijske osi stalan (srednji položaj Zemaljske rotacijske osi) čime se umanjuje utjecaj navedenih fizikalnih pojava na proces pozicioniranja.

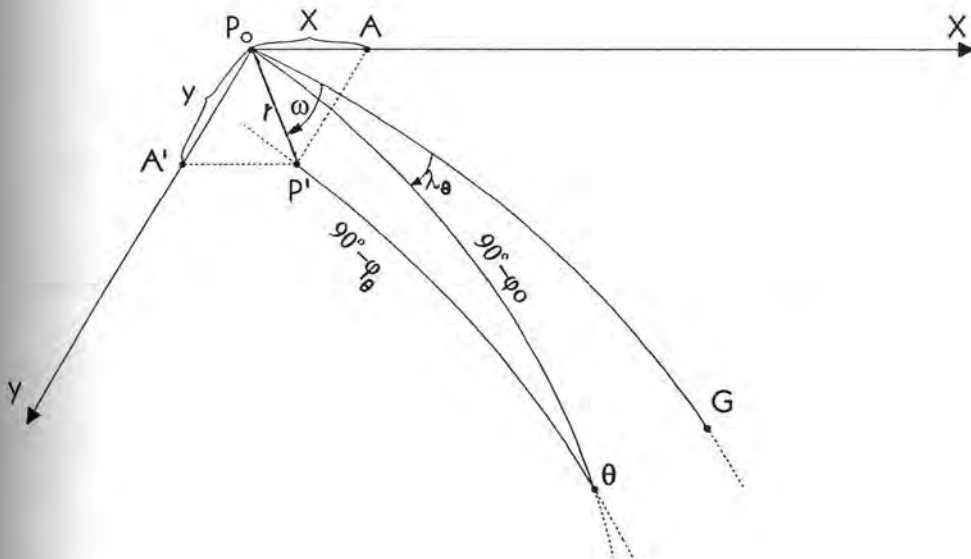
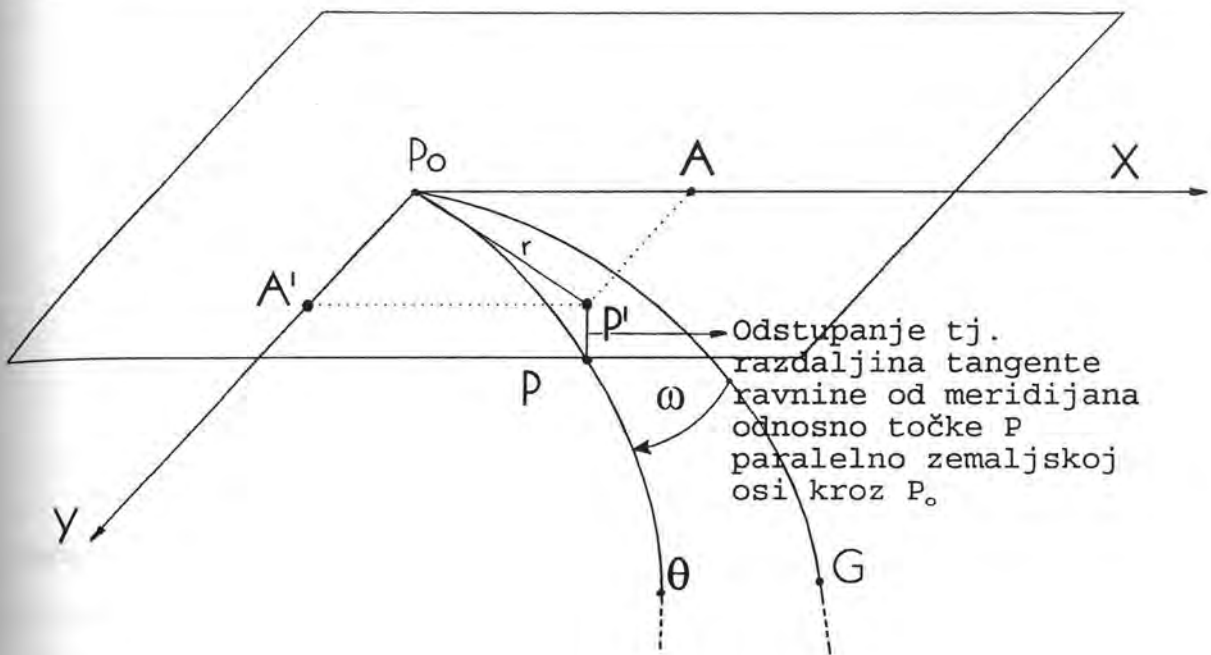
### 3.3.1.1. Određivanje pravokutnih koordinata Zemaljskog trenutnog pola

Međunarodna služba širine sa šest međunarodnih postaja na sjevernoj i dvije postaje na južnoj hemisferi iz neprekidnog određivanja geografskih širina izračunava pravokutne koordinate Zemaljskog pola za svaki deseti dio godine i tako određuje putanju trenutnog Zemaljskog pola (polhodija) oko jednog njegovog srednjeg položaja tj. srednjeg položaja koji bi pol zauzimao da nije periodičnog kretanja Zemaljske rotacijske osi u njenoj masi.

Iz promjena geografskih širina određenih po Talcotovoj metodi sustavnim motrenjima na međunarodnim postajama i nakon njihovog izravnivanja lančanom metodom, te nakon eliminiranja utjecaja raznih poznatih sustavnih pogrešaka, dobivaju se za svaki mjesec vrijednosti osmotrene geografske širine za svaku postaju  $\theta$ , a zatim se nakon 14 mjeseci definira srednja geografska širina  $\varphi_0$  za tu postaju. Na taj način se određuje promjena geografske širine za tu postaju:

$$\Delta\varphi_{\theta} = \varphi_{\theta} - \varphi_0 \text{-----}(12)$$

Pravokutne koordinate  $(x, y)$  Zemaljskog pola na osnovu osmotrenih promjena geografskih širina  $\Delta\varphi_{\theta}$  mogu se odrediti metodom Kostinskog.



Slika 18. Određivanje pravokutnih koordinata Zemaljskog pola  $(x, y)$  iz osmotrenih promjena geografskih širina  $\Delta\varphi_0$  na međunarodnim postajama

$\sphericalangle P'P_0x = \omega$  (tangenti kut za sferni kut  $\omega$ )

aproksimacija  $P_0P' \approx P_0P = r$

- $P_0$  - Srednji položaj Zemaljskog pola,  
 $P'$  - Trenutni položaj Zemaljskog pola,  
 $\widehat{P_0G}$  - Meridijan Greenwech,  
 $\widehat{P_0\theta}$  - Srednji meridijan postaje  $\theta$ ,  
 $\widehat{P'\theta}$  - Trenutni meridijan postaje  $\theta$ ,  
 $r, \omega$  - polarne koordinate trenutnog Zemaljskog pola u odnosu na srednji Zemaljski pol.

Kroz  $P_0$  se položi tangenta ravnina na Zemaljsku površinu. Definira se Descartov pravokutni koordinatni sustav  $xP_0y$  u toj ravnini sa x osi kao tangentom na meridijan Greenwech i y osi zapadno od nje. Kako tangenta ravnina ne sadrži  $P_0P' = r$  što je vidljivo iz slike 18, u točkama 3.3.1.1. i 3.3.1.2. prikazano je aproksimativno izvođenje.

Iz trokuta  $P_0P'\theta$  na osnovu poučka o cosinusu stranice sljedi:

$$\cos(90^\circ - \varphi_\theta) = \cos(90^\circ - \varphi_0) \cos r + \sin(90^\circ - \varphi_0) \sin r \cos(\omega - \lambda_\theta) \text{-----} (13)$$

Zbog vrlo male udaljenosti trenutnog Zemaljskog pola od srednjeg Zemaljskog pola može se aproksimirati,

$\cos r \cong 1$ ,  $\sin r \cong \tan r \cong r$ , pa izraz (13) postaje:

$$\sin \varphi_\theta = \sin \varphi_0 + r \cos \varphi_0 \cos(\omega - \lambda_\theta) \text{-----} (14)$$

Sređivanjem izraza (14) dobije se:

$$\sin \varphi_\theta = \sin \varphi_0 + r \cos \varphi_0 \cos \omega \cos \lambda_\theta + r \sin \omega \sin \lambda_\theta \cos \varphi_0 \text{-----} (15)$$

Iz pravokutnog trokuta  $P_0AP'$ s dovoljnom točnošću mogu se odrediti pravokutne koordinate trenutnog Zemaljskog pola:



$$x = r \cos \omega ; y = r \sin \omega \text{-----}(16)$$

Ako se uvrste vrijednosti za x i y u jednadžbu (15) nakon dijeljenja s  $\cos \varphi_0$  dobiva se:

$$\sin \varphi_\theta / \cos \varphi_0 = \tan \varphi_0 + x \cos \lambda_\theta + y \sin \lambda_\theta \text{-----}(17)$$

Kako se kutne vrijednosti  $\varphi_\theta$  i  $\varphi_0$  u stvarnosti malo razlikuju s dovoljnom se točnošću se može aproksimirati:

$$\begin{aligned} \sin \varphi_\theta / \cos \varphi_0 &\approx \sin \varphi_\theta / \cos \varphi_\theta = \tan \varphi_\theta ; \tan \varphi_\theta - \tan \varphi_0 \approx \varphi_\theta - \varphi_0 = \Delta \varphi_\theta \\ \Delta \varphi_\theta &= x \cos \lambda_\theta + y \sin \lambda_\theta \text{-----}(18) \end{aligned}$$

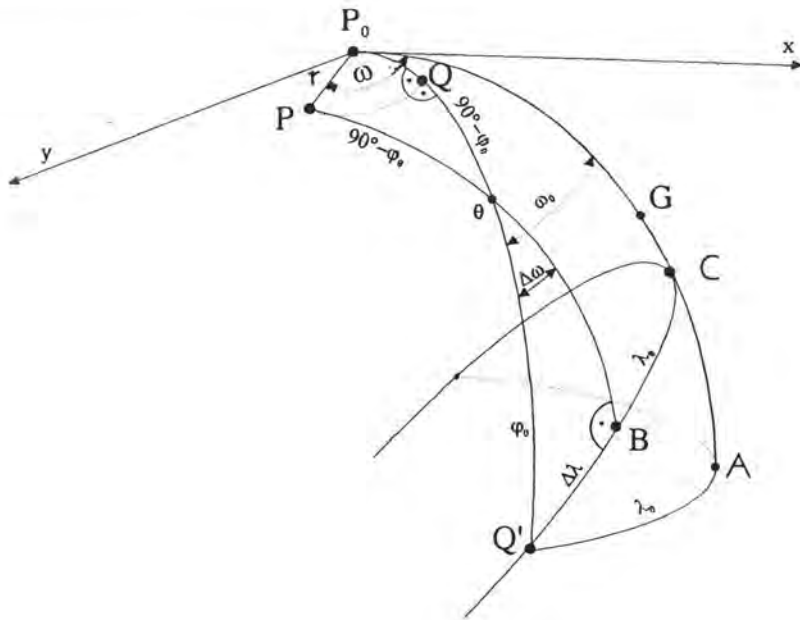
Ovih jednadžbi u svakom mjesecu ima koliko i osmatračkih postaja i po metodi najmanjih kvadrata mogu se odrediti koordinate Zemaljskog pola.

Za praktične potrebe predložene "laserske navigacije" mogu se koristiti podaci "Brze međunarodne službe širine" koja u vrlo kratkim vremenskim razmacima određuje pravokutne koordinate pola (x, y) i dostavlja ih zainteresiranim korisnicima.

### 3.3.1.2. Utjecaj pomicanja Zemaljskih polova na geografske koordinate i azimut pravca

Koristeći pravokutne koordinate (x, y) trenutnog Zemaljskog pola može se pomoću jednadžbe (18) s mjerene trenutne geografske širine  $\varphi_\theta$  preći na stalnu srednju širinu  $\varphi_0$ .

Utjecaj pomicanja Zemaljskih polova na geografsku dužinu i azimut pravca analizirat će se pomoću slike 20.



Slika 19. Utjecaj pomicanja Zemaljskih polova na geografsku dužinu i azimut pravca ( $\Delta\omega$ )

Iz pravokutnog sfernog trokuta  $P_0QP$  sljedi:

$$\begin{aligned} \cos(90^\circ - PQ) &= \sin r \sin(\omega - \lambda_\theta) \\ \sin PQ &= r \sin(\omega - \lambda_\theta) \text{-----(19)} \end{aligned}$$

Uvrstivši  $x = r \cos \omega$ ,  $y = r \sin \omega$  i sređivanjem izraza (19) dobije se:

$$\sin PQ = y \cos \lambda_\theta - x \sin \lambda_\theta \text{-----(20)}$$

Iz pravokutnog sfernog trokuta  $PQ\theta$  sljedi:

$$\begin{aligned} \cos(90^\circ - PQ) &= \sin(90^\circ - \varphi_\theta) \sin \Delta\omega \\ \sin PQ &= \cos \varphi_\theta \sin \Delta\omega \text{-----(21)} \end{aligned}$$

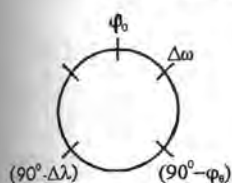
Izjednačenjem izraza (20) i (21) dobije se:

$$y \cos \lambda_{\theta} - x \sin \lambda_{\theta} = \cos \varphi_{\theta} \sin \Delta \omega \text{-----(22)}$$

Sređivanjem jednadžbe (22) dobije se jednadžba pomoću koje se iskazuje utjecaj pomicanja Zemaljskog pola na azimut pravca:

$$\Delta \omega = \sin^{-1}[(y \cos \lambda_{\theta} - x \sin \lambda_{\theta}) / \cos \varphi_{\theta}] \text{-----(23)}$$

Iz pravokutnog sfernog trokuta  $\Theta Q'B$  sljede:



$$\cos(90^{\circ} - \Delta \lambda) = \sin \varphi_0 \sin \Delta \omega$$

$$\sin \Delta \lambda = \sin \varphi_0 \sin \Delta \omega \text{-----(24)}$$

$$\Delta \lambda = \lambda_0 - \lambda_{\theta} \text{-----(25)}$$

Utjecaj pomicanja Zemaljskog pola na geografsku dužinu može se iskazati pomoću sljedeće jednadžbe:

$$\Delta \lambda = \sin^{-1}[(y \cos \lambda_{\theta} - x \sin \lambda_{\theta}) \cdot \sin \varphi_0 / \cos \varphi_{\theta}] \text{-----(26)}$$

U izrazima (23) i (26) uzeta je trenutna geografska dužina  $\lambda_{\theta}$  koja se dobiva iz mjerenja umjesto srednje  $\lambda_0$ , no to nema značajnog utjecaja na točnost metode.

Dakle mjerenjem vrijednosti ( $\varphi_{\theta}$ ,  $\lambda_{\theta}$  i  $\omega$ ) prelazi se na srednje ( $\varphi_0$ ,  $\lambda_0$ ,  $\omega_0$ ) oslobođene periodičnog pomicanja Zemaljskih polova pomoću sljedećih izraza:

$$\varphi_0 = \varphi_{\theta} - (x \cos \lambda_{\theta} + y \sin \lambda_{\theta}) \text{-----(27)}$$

$$\lambda_0 = \lambda_{\theta} + [(y \cos \lambda_{\theta} - x \sin \lambda_{\theta}) \cdot \sin \varphi_0 / \cos \varphi_{\theta}] \text{-----(28)}$$

$$\omega_0 = \omega - [(y \cos \lambda_{\theta} - x \sin \lambda_{\theta}) / \cos \varphi_{\theta}] \text{-----(29)}$$

### 3.3.2. Pojava sekularnog pomicanja Zemaljskih polova

Mogućnost sekularnog pomicanja Zemaljskih polova potvrđuju praktična i teorijska istraživanja. Prema Checiniu srednje godišnje pomicanje Zemaljskog pola je  $0,0018''$  u pravcu geografske dužine  $37,8^{\circ} W$ , što znači da je stoljetno pomicanje pola vrlo malo. Kako na polu kutu od  $1''$  odgovara približno 31 metar, to bi godišnje pomicanje pola bilo oko 56 mm u smjeru prema Grenlandu. Zbog zanemari-vo malog utjecaja na pozicioniranje pomoću predloženog teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava ova se pojava neće detaljnije analizirati.

### 3.3.3. Pojava pomicanja Zemaljskih kontinenata

Na osnovi paleontoloških i paleoklimatskih podataka austrijski geofizičar B. Gutenberg je 1927. godine sastavio približne karte Zemaljskih kontinenata u raznim geološkim periodima iz kojih se vidi približno pomicanje kontinenata u odnosu na Zemaljsku rotacijsku os i polove.

To pomicanje kontinenata u odnosu na Zemaljsku rotacijsku os i polove za nekoliko stotina milijuna godina iznosi nekoliko tisuća kilometara, ali je prosječna brzina ovog pomicanja oko 1 cm godišnje. Zbog tako male vrijednosti ni ova se pojava neće detaljnije analizirati jer je njen utjecaj na pozicioniranje pomoću predloženog teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava zanemariv.

### 3.3.4. Relativistički efekt

Kako je nominalni domet predloženog teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava 30 000 m to je učinak relativističkog efekta na pozicioniranje zanemariv, te se neće detaljnije analizirati.

### 3.4. Matematička obrada "kutne metode" pozicioniranja pomoću predloženog teorijskog modela LNS-a

"Kutna metoda" pozicioniranja pomoću predloženog modela LNS-a bazira se na sljedećim elementima:

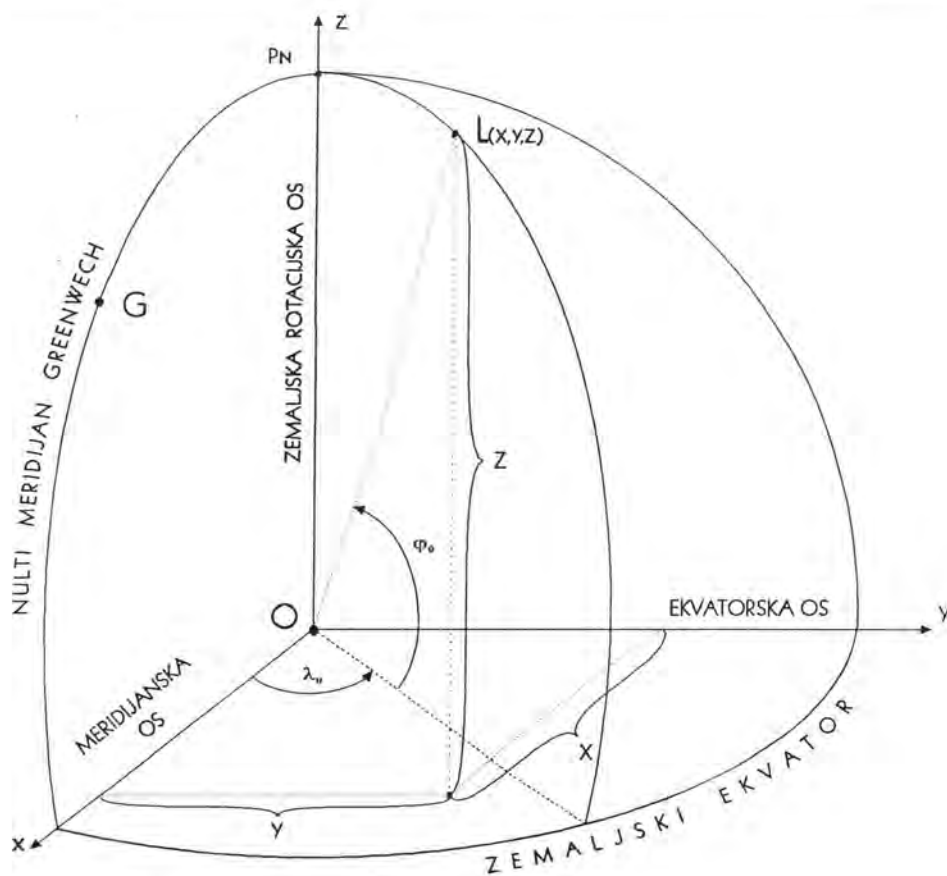
- Cartesiusovim koordinatama laserskog svjetionika
- kutovima  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ .

Funkcija laserskog svjetionika je da pomoću "stepping" motora osigura precizno i točno emitiranje gore navedenih parametara u obliku moduliranih optičkih signala pomoću laserskog snopa definiranog kutom divergencije u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini. "Istovremenim" prijemom moduliranih optičkih signala s najmanje dva laserska svjetionika moguće je odrediti koordinate pozicije plovnog objekta.

Treba napomenuti da elektronski navigacijski sustavi koji koriste frekvencije ispod 3 MHz ne mogu zadovoljiti uvjete visoke točnosti pozicioniranja ponajviše zbog utjecaja prostornih valova i velike širine pojasa koja čak i uz točnost mjerenja jedne stotinke njene širine daje pogrešku od nekoliko metara.

Kako je u osnovi terestrička navigacija obalna plovidba, za numeričku obradu "kutne metode" pozicioniranja pomoću predloženog teorijskog modela LNS-a koristi se Legendreov poučak tj. laserska zraka koja se uz površinu Zemlje kreće po ortodromi u matematičkoj obradi se aproksimira pravcem (prosječna zakrivljenost Zemaljske površine iznosi oko 24,384 cm po nautičkoj milji).

Također za numeričko određivanje koordinata pozicije plovnog objekta klasični geografski koordinatni sustav zamjenjuje se Cartesiusovim prostornim pravokutnim koordinatnim sustavom u kojem se kutne vrijednosti geografske širine i dužine pozicije kopnenog laserskog svjetionika i njegova nadmorska visina izražavaju kao koordinate  $(x, y, z)$ .



Slika 20. Prostorni pravokutni Cartesiusov koordinatni sustav

U odabranom Cartesiusovom koordinatnom sustavu aplikatna os  $z$  se podudara sa srednjim položajem rotacijske osi Zemlje, apscisna os  $x$  je velika os meridijanske elipse nultog meridijana Greenwech, a ordinatna os  $y$  leži u ravnini ekvatora i okomita je na prve dvije osi. Između apsolutnih gografskih koordinata  $(\varphi_0, \lambda_0)$  točke  $L$  i odgovarajućih Cartesiusovih koordinata  $(x, y, z)$  vrijede sljedeći odnosi:

$$x = \frac{a \cdot \cos \varphi_0 \cdot \cos \lambda_0}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi_0)^{1/2}} \text{-----} (30)$$

$$y = \frac{a \cdot \cos \varphi_0 \cdot \sin \lambda_0}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi_0)^{1/2}} \text{-----} (31)$$

$$z = \frac{a \cdot (1 - e^2) \cdot \sin \varphi_0}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi_0)^{1/2}} \quad \text{-----} \quad (32)$$

gdje je:

a - duža poluos referentnog dvoosnog rotacijskog elipsoida

b - kraća poluos referentnog dvoosnog rotacijskog elipsoida

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$$

- ekscentritet Zemaljskog dvoosnog rotacijskog elipsoida

Autor	God.	Ekvatorska poluos a[m]	Meridijanska poluos b [m]	Spljoštenost Zemlje $f = 1:[a/(a-b)]$
Delambre	1800	6375653	6356564	1 : 334,0
Bessel	1841	6377397,155	6356078,963	1 : 299,1528
Clarke	1880	6378249,145	6356514,87	1 : 293,465
Airy		6377563,396	6356256,91	1 : 299,325
Everest		6377276,345	6356075,413	1 : 300,8017
Krassovskiy	1938	6378245	6356863,019	1 : 298,3
Hough		6378270	6356794,343	1 : 297
Geodetski referentni sustav	1967	6378160	6356774,719	1 : 298,25
Fisher	1968	6378150	6356768,337	1 : 298,3
Međunarodni elipsoid		6378388	6356911,946	1 : 297
WGS - 72	1972	6378135	6356750,52	1 : 298,26
WGS - 84	1984	6378137	6356752,3142	1 : 298,257223563

Tablica 1. Dimenzije referentnih zemaljskih dvoosnih rotacijskih elipsoida prema raznim autorima

Izvor: Iz različitih izvora priredio autor

Za predloženi teorijski model laserskog navigacijskog sustava preporuča se uporaba WGS - 84.

Za prijelaz iz Cartesiusovih koordinata u geografske koordinate mogu se koristiti sljedeće jednadžbe:

$$\varphi_0 = \arctan \frac{z}{(1 - e^2)(x^2 + y^2)^{1/2}} \text{-----(33)}$$

$$\lambda_0 = \arctan x/y \text{-----(34)}$$



Dakle, u brodski mikroprocesor unose se Cartesiusove koordinate  $(x, y, z)$  laserskog svjetionika-predajnika.

### 3.4.1. Određivanje koordinata plovnog objekta pomoću dva laserska svjetionika

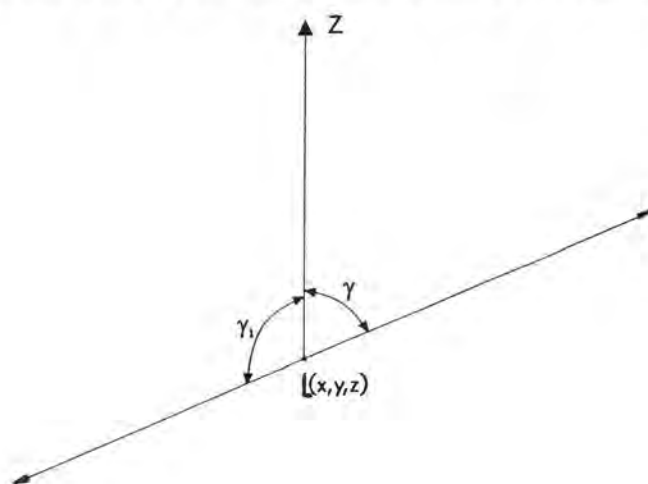
Na kolektorsku antenu laserskog prijmnika plovnog objekta trebaju "istovremeno" stići signali (Cartesiusove koordinate i kutevi  $\theta, \alpha, \beta$ ) s najmanje dva laserska svjetionika-predajnika.

Kutevi  $\alpha, \beta$  i  $\gamma$  su kutevi koje centralna os laserske zrake emitirane iz laserskog svjetionika zatvara s osima  $x, y, z$  Cartesiusovog koordinatnog sustava.

Na osnovi poznate vrijednosti kuteva  $\alpha$  i  $\beta$ , kut  $\gamma$  se može izračunati pomoću jednadžbe:

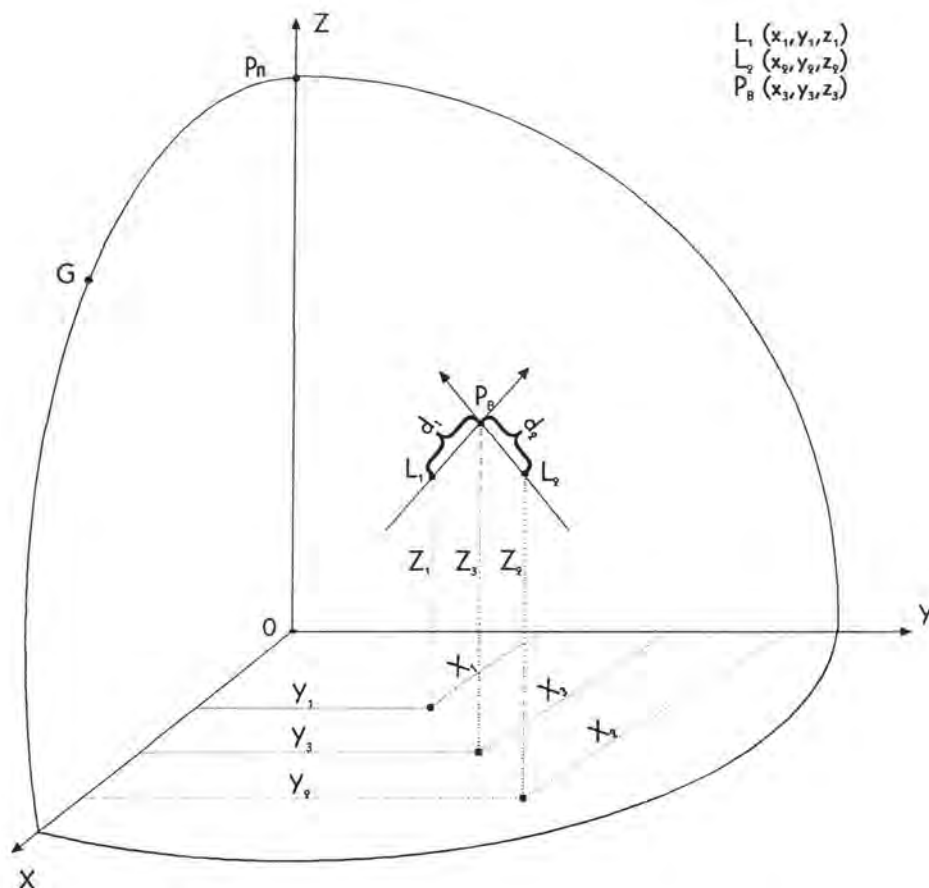
$$\cos \gamma = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta} \text{ ----- (35)}$$

Ako se izračunava kut  $\gamma$ , ostaje neodređen samo predznak cosinusa što znači samo neodređenost smjera, a ne pravca jer prema sljedećoj slici vrijedi:



$$\cos \gamma_1 = \cos(180^\circ - \gamma) = -\cos \gamma$$

Dakle negativan predznak bilo kojeg cosinusa smjera pokazuje da dotični kut leži u drugom ili trećem kvadrantu.



Slika 21. Određivanje koordinata plovnog objekta pomoću dva laserska svjetionika

Ako na kolektorsku antenu laserskog prijarnika plovnog objekta stignu "istovremeno" signali iz dva laserska svjetionika  $L_1$  i  $L_2$  problem se svodi na određivanje koordinata presjeka ( $P_B$ ) pravca koji prolazi točkom  $L_1$  (centralna os laserskog snopa prvog laserskog svjetionika),  $x_3 - x_1/a_1 = y_3 - y_1/b_1 = z_3 - z_1/c_1$  i pravca koji prolazi točkom  $L_2$  (centralna os laserskog snopa drugog laserskog svjetionika),  $x_3 - x_2/a_2 = y_3 - y_2/b_2 = z_3 - z_2/c_2$  uz pretpostavku da se ti pravci sijeku tj. da nisu paralelni, ni mimosmjerni.

Uvedene veličine  $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$  su koeficijenti smjera pravca koji su redom proporcionalni s cosinusima kutova  $\alpha, \beta, \gamma$  što ih ti pravci zatvaraju s koordinatnim osima  $x, y, z$ .

Pravci su međusobno paralelni ako su njihovi koeficijenti smjera proporcionalni ili jednaki tj. ako je ispunjen uvjet:  $a_1/a_2 = b_1/b_2 = c_1/c_2$  što se u slučaju pozicioniranja pomoću dva laserska svjetionika ne može desiti.

Problem određivanja koordinata pozicije plovnog objekta pomoću dva laserska svjetionika može se riješiti na više načina;

#### a) I NAČIN:

Uvođenjem homogenih nepoznanica  $u = x_3/z$  i  $v = y_3/z$  gdje je  $z \neq 0$  jednačbe pravca se mogu pisati u parametarskom obliku:

$$\begin{aligned}x_3 &= a_1 u + x_1 \\y_3 &= b_1 u + y_1 \text{ -----(36)} \\z_3 &= c_1 u + z_1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x_3 &= a_2 v + x_2 \\y_3 &= b_2 v + y_2 \text{ -----(37)} \\z_3 &= c_2 v + z_2\end{aligned}$$

Ako se pravci sijeku, tj. ako je ispunjen uvjet:

$$- \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & x_1 - x_2 \\ b_1 & b_2 & y_1 - y_2 \\ c_1 & c_2 & z_1 - z_2 \end{vmatrix} = 0 \text{ -----(38)}$$

ili

$$\begin{vmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 \\ a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{vmatrix} = 0 \text{ -----(39)}$$

tada je:

$$\begin{aligned} a_1 u + x_1 &= a_2 v + x_2 \\ b_1 u + y_1 &= b_2 v + y_2 \end{aligned} \text{-----(40)}$$

$$c_1 u + z_1 = c_2 v + z_2$$

odnosno sređeno,

$$a_1 u - a_2 v = x_2 - x_1 \text{-----(41)}$$

$$b_1 u - b_2 v = y_2 - y_1 \text{-----(42)}$$

$$c_1 u - c_2 v = z_2 - z_1 \text{-----(43)}$$

Ako se pomnoži prva jednađžba s  $(b_2 - c_2)$  druga s  $(c_2 - a_2)$  i treća s  $(a_2 - b_2)$ , te se zbroje tako dobivene jednađžbe dobije se sljedeće:

$$[a_1(b_2 - c_2) + b_1(c_2 - a_2) + c_1(a_2 - b_2)]u = (x_2 - x_1)(b_2 - c_2) + (y_2 - y_1)(c_2 - a_2) + (z_2 - z_1)(a_2 - b_2) \text{---(44)}$$

odakle je:

$$u = \frac{(x_2 - x_1)(b_2 - c_2) + (y_2 - y_1)(c_2 - a_2) + (z_2 - z_1)(a_2 - b_2)}{a_1(b_2 - c_2) + b_1(c_2 - a_2) + c_1(a_2 - b_2)} \text{-----(45)}$$

odnosno:

$$u = \frac{\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{vmatrix}} \text{.....(46)}$$

Nazivnik nije jednak nuli jer pravci po pretpostavci nisu paralelni ni mimo-smjerni. Cartesiusove koordinate pozicije plovnog objekta bit će dakle  $(x_3, y_3, z_3)$ :

$$x_3 = a_1 u + x_1 \text{ -----(47)}$$

$$y_3 = b_1 u + y_1 \text{ -----(48)}$$

$$z_3 = c_1 u + z_1 \text{ -----(49)}$$

gdje se u izračunava pomoću jednadžbi (45) ili (46).

### b) II NAČIN:

Iz jednadžbi pravca koji prolazi točkom  $L_1$  i pravca koji prolazi točkom  $L_2$  mogu se dobiti tri sustava jednadžbi za određivanje koordinata presjecišta navedenih pravaca tj. pozicije plovnog objekta  $P_B(x_3, y_3, z_3)$ :

$$b_1(x_3 - x_1) = a_1(y_3 - y_1)$$

$$\text{I sustav jednadžbi -----(50)}$$

$$b_2(x_3 - x_2) = a_2(y_3 - y_2)$$

$$c_1(y_3 - y_1) = b_1(z_3 - z_1)$$

$$\text{II sustav jednadžbi -----(51)}$$

$$c_2(y_3 - y_2) = b_2(z_3 - z_2)$$

$$a_1(z_3 - z_1) = c_1(x_3 - x_1)$$

$$\text{III sustav jednadžbi -----(52)}$$

$$a_2(z_3 - z_2) = c_2(x_3 - x_2)$$

Iz prvog od tih sustava jednadžbi sređivanjem se dobije:

$$b_1 x_3 - a_1 y_3 = b_1 x_1 - a_1 y_1 \text{ -----(53)}$$

$$b_2 x_3 - a_2 y_3 = b_2 x_2 - a_2 y_2 \text{ -----(54)}$$

odakle je:

$$x_3 = \frac{a_2(b_1x_1 - a_1y_1) - a_1(b_2x_2 - a_2y_2)}{(a_2b_1 - b_2a_1)} \quad (55)$$

Analogno se dobiju i ostale dvije koordinate:

$$y_3 = \frac{b_2(c_1y_1 - b_2z_1) - b_1(c_2y_2 - b_2z_2)}{(b_2c_1 - c_2b_1)} \quad (56)$$

$$z_3 = \frac{c_2(a_1z_1 - c_2x_1) - c_1(a_1z_1 - c_2x_2)}{(c_2a_1 - a_2c_1)} \quad (57)$$

Programom mikroprocesora treba biti određeno osrednjivanje izračunatih koordinata pozicije plovnog objekta u odnosu na unaprijed definiranu točnost pozicioniranja tj. u odnosu na veličinu radijusa kružnice jednake vjerojatnosti (CEP - Circle of Equivalent Probability) u iznosu od  $(n \cdot \text{radijus CEP})$  gdje je  $n = 1, 2, 3$ , čime se ostvaruje odgovarajuća vjerojatnost pozicioniranja (%).

### 3.5. Utjecaj valjanja i posrtanja na pozicioniranje pomoću predloženog teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava

Teoretski u trenutku određivanja koordinata pozicije plovnog objekta pomoću dva laserska svjetionika os rotacije kolektorske antene plovnog objekta trebala bi biti uspravna (kut nagiba oko vertikalne i horizontalne ravnine =  $0^\circ$ ).

Valjanje broda tj. nagnjanje oko vertikalne osi uzrokuje "šetanje" osi rotacije kolektorske antene laserskog prijarnika plovnog objekta. Uz nagib broda oko vertikalne osi od  $\Omega$  radijana i azimut objekta od  $\omega$  radijana javlja se pogreška u mjerenju kuta u iznosu:

$$k_1 = -[\Omega^2 \cdot \sin\omega \cdot \cos\omega / 2] \text{ -----(58)}$$

Kako je kolektorska antena na određenoj visini  $l$  iznad osi valjanja broda, javlja se paralaksa s pogreškom u mjerenju kuta od:

$$k_2 = l \cdot \sin\Omega \cdot \cos\omega / d \text{ -----(59)}$$

gdje je:

$d$  - trenutna udaljenost od brodske kolektorske antene do laserskog svjetionika

Pogreška kvantizacije kuta tj. pretvorba analognih veličina u digitalne je zanemariva.

### 3.6. Laserski svjetionik

U terestričkoj navigaciji od naročitog su značaja pomorska svjetla. To su navigacijske oznake koje mogu biti čuvane i nečuvane. Čuvana pomorska svjetla obično čine svjetionici i brodovi svjetionici, a nečuvana su obalna svjetla, lučka svjetla i svjetleće plutače. Uvođenjem pojma "laserska navigacija" u nautičku znanost svjetionici se uvjetno mogu podijeliti na klasične i laserske.

Klasični svjetionici emitiraju vidljive nekoherentne svjetlosne valove različitih frekvencija, a laserski svjetionici nevidljive laserske svjetlosne valove.

Svjetlo predstavlja elektromagnetski val vrlo visokih frekvencija i njegova uporaba u vidu "laserske navigacije" je logičan nastavak razvoja visoko-sofisticiranih pomorskih navigacijskih sustava. Također laseri kao predajnici kod laserskih svjetionika imaju mnogo veću širinu frekvencijskog opsega i mogućnost smanjenja divergencije zračenja u odnosu na klasične svjetionike.

### 3.6.1. Predajnik

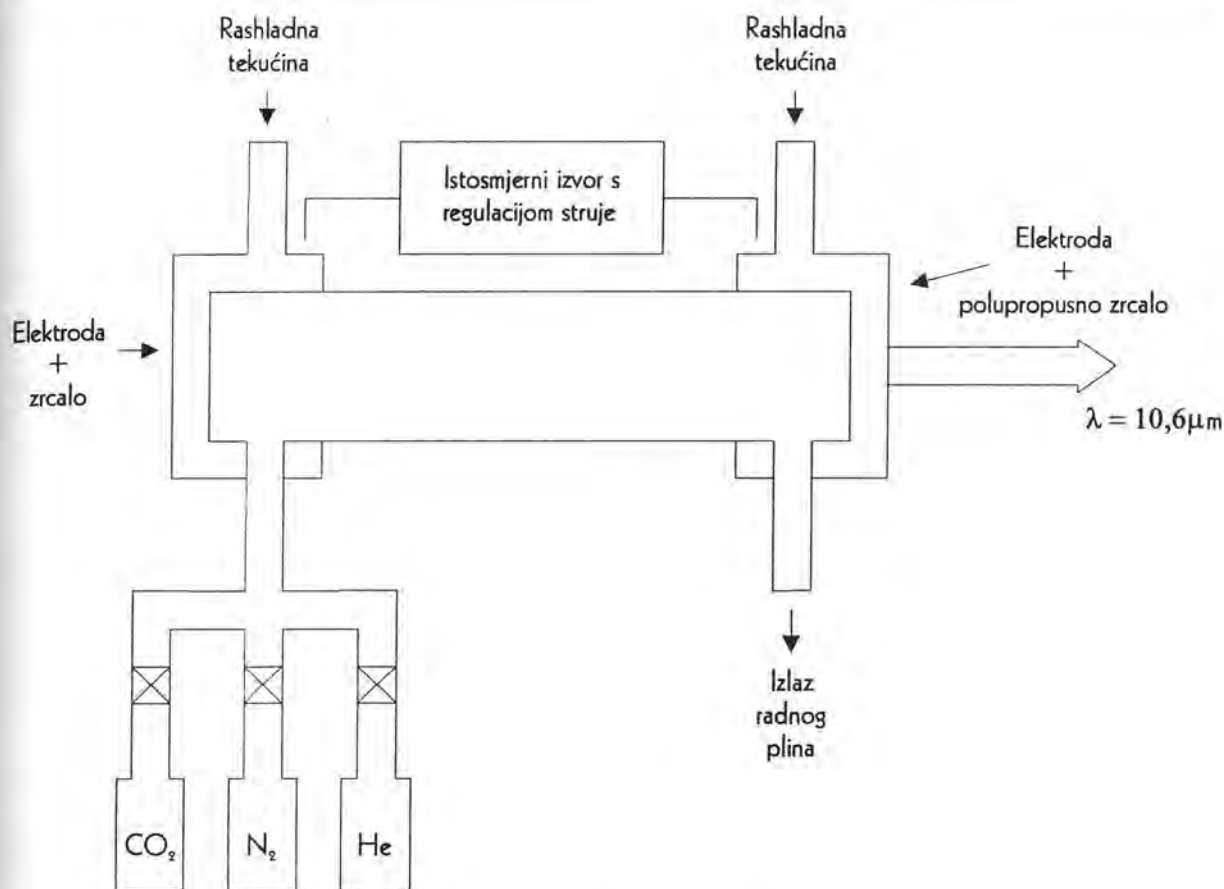
Kao predajnik i izvor svjetlosti u predloženom teorijskom modelu LNS-a za vođenje "laserske navigacije", na osnovu provedenog istraživanja u ovom radu naznačena je primjenjivost molekularnog lasera na bazi  $\text{CO}_2$ , valne duljine  $10,6\mu\text{m}$ .

Potrebnu izlaznu snagu  $\text{CO}_2$  lasera determiniraju sljedeći elementi:

- minimalna snaga signala koja treba stići do brodskog detektora na maksimalnom dometu LNS-a, a koja osigurava uspješan i pouzdan prijem laserskog signala,
- ukupni gubici u atmosferi prilikom kretanja laserskog snopa od predajnika do prijarnika u najtežim vremenskim uvjetima.

Uzimajući u obzir navedene elemente proizlazi da je za rad predloženog modela LNS-a potreban molekularni  $\text{CO}_2$  laser snage 40 W. Kod ove vrste lasera ostvaruje se relativno visok stupanj efikasnosti pretvorbe energije pumpanja u korisnu lasersku energiju ( $> 20\%$ ).





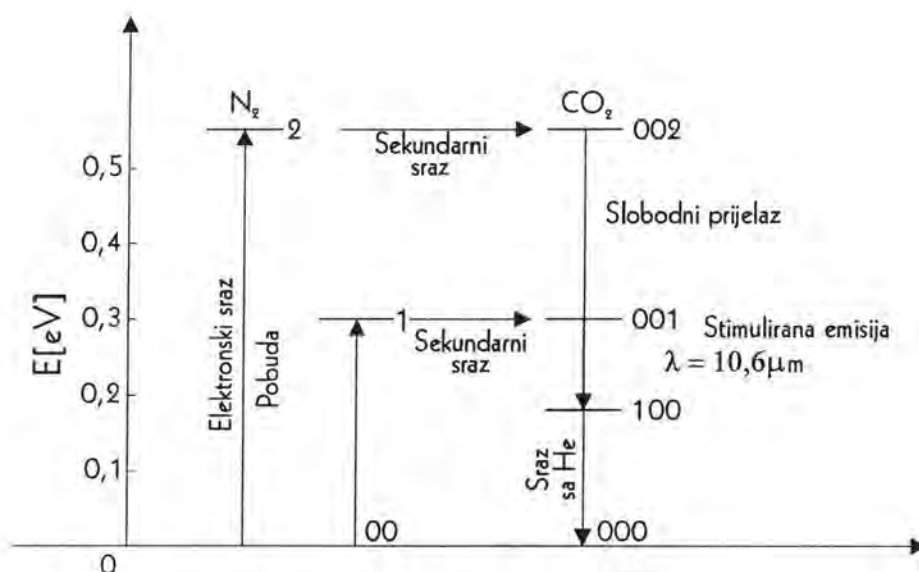
Slika 22. Blok shema  $\text{CO}_2$  lasera

Laserska cijev se napaja s laserskim medijem koji se dobiva miješanjem plinova ugljičnog dioksida, dušika i helija u određenom omjeru. Ugljični dioksid služi kao laserski materijal, a dušik i helij potiču određene procese. Sustav cijevi omogućuje cirkulaciju mješavine plina u određenom omjeru. Pumpanje se ostvaruje pomoću izboja između elektroda na krajevima cijevi. Izboj se napaja istosmjernim naponom iz mreže. Zbog negativne impedantne karakteristike potrebna je strujna regulacija u strujnom krugu. Međutim izboj se osim pomoću jednosmjerne struje može ostvariti i pomoću izmjenične struje, visokofrekventne struje ili snažnim strujnim impulsima. Na jednom kraju cijevi je zrcalo koje u potpunosti reflektira, a drugo zrcalo je djelomično propusno radi ispuštanja dijela energije iz laserskog rezonatora. Radi temperaturne stabilizacije cjelokupnog sustava potrebno je dodatno hlađenje rashladnom tekućinom. Da bi se ostvarila konstantna (stabilna) valna

duljina emitiranja zrcala su postavljena na solidnu bazu odvojena od aktivnog dijela koji onda služi samo kao pojačalo, a s dodatkom zrcala dobije se laserski oscilator.

Današnji  $\text{CO}_2$  laseri imaju integrirani volumen mješavine plina.

Zbog O-C-O konfiguracije molekula ugljičnog dioksida postoje tri osnovna oscilacijska stanja atomske jezgre: simetrične (000), deformacijske (001) i asimetrične (002) oscilacije. Kod molekule dušika postoji samo simetrična oscilacija. Na taj način se za razne razine i vrste pobuđenosti mogu prikazati razine i pripadajuće energije u elektronvoltima.



Slika 23. Energetska razina  $\text{CO}_2$  lasera

Kod  $\text{CO}_2$  lasera iskorištava se energetski prijelaz asimetričnog oscilirajućeg stanja 001 u simetrično oscilatorno stanje 100. Razlici ovih energetskih stanja odgovara valna duljina od  $10,6\mu\text{m}$ .

Da bi se postiglo pobuđivanje potrebno je povećati populaciju razine 001 kao preduvjet za pojačavanje inducirane emisije laserskog zračenja. Kako su molekule u mješavini plina električki neutralne, izravno pobuđivanje može se postići pomoću  $\text{N}_2$  molekule. Iz slike je vidljivo da su razine kod  $\text{N}_2$  i  $\text{CO}_2$  energetski jednake pa se energija iz metastabilnog stanja  $\text{N}_2$  molekule pomoću sekundarnog sraza prenosi na 001 razinu od molekule  $\text{CO}_2$ . Tako se postiže učinkovito pobuđivanje energetske

razine 001 kod  $\text{CO}_2$  od  $\text{N}_2$  molekula kao i prijelazom sa razine 002 unutar iste molekule.

Helij u laserskoj cijevi (rezonatoru) omogućuje brzi energetski prijelaz 100 u osnovno stanje 000 nakon sudara ugljičnog dioksida i helija. Također budući da helij ima odličnu toplinsku vodljivost on omogućava hlađenje cijevi iznutra. Pouzdan rad lasera zahtijeva strogu kontrolu struje za održavanje izboja, veličine tlaka u cijevi, odnos mješavine plinova i njihovu brzinu strujanja kroz laserski rezonator.

Treba istaći činjenicu da direktna modulacija lasera ima incidentni efekt na frekvenciju i spektralnu širinu frekvencijskog opsega svjetla. Kako bi se eliminirala ova nepoželjna pojava kao i ograničenja u širini frekvencijskog opsega kod direktne modulacije mogu se koristiti vanjski modulatori koji mogu biti:

- direkcionni razdjelnici kod kojih se razdiobom snage u dvije grane svjetlovoda upravlja električnim poljem ili što je povoljnije,
- interferometri kod kojih se za modulaciju intenziteta koriste fazni modulatori.

Pouzdanost i vrijeme trajanja (života) komponenti sustava "laserske navigacije" su od posebnog značaja u procesu eksploatacije. Pouzdanost laserskog predajnika se može definirati kao vjerojatnost očuvanja njegovih prvobitnih karakteristika. U praktičnoj eksploataciji mogu se javiti dva tipa kvarova: katastrofični i degradacija u svojstvima. Problem katastrofičnog kvara se kod projektiranja može smanjiti redukcijom, a degradacija u svojstvima se može smanjiti ako se sustav projektira tako da struje pobude budu manje od maksimalnih, preporučenih od proizvođača i ako se mikrotemperatura sklopa održava u povoljnim granicama. Današnji  $\text{CO}_2$  laseri imaju tipičnu pouzdanost od  $10^4$  sati, ali već postoje sistemi koji imaju radni vijek i do  $10^5$  sati.

### 3.6.2. Karakteristike laserskog svjetionika

Relevantne karakteristike laserskog svjetionika se mogu svrstati u tri grupe:

- navigacijske karakteristike
- geometrijske karakteristike
- način rada

### 3.6.2.1. Navigacijske karakteristike

Navigacijske karakteristike svjetionika omogućavaju njegovu identifikaciju, a time i mogućnost pozicioniranja pomoću njega.

Kod klasičnog svjetionika postižu se brojem leća (broj bljeskova u grupi) i brzinom rotacije sustava leća oko fokusa (izvora svjetla) što definira period svjetla. Potpuno su definirane pomoću sljedećih elemenata: broj svjetala i njihov međusobni položaj boja, vrsta, period svjetljenja, intenzitet i domet svjetla.

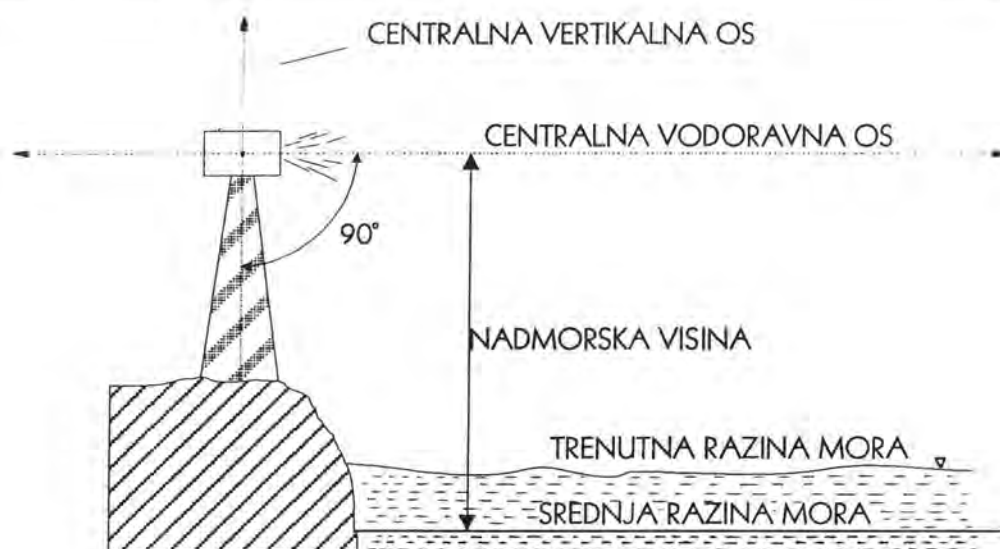
Kod laserskog svjetionika postižu se odgovarajućom kutnom brzinom rotacije laserskog predajnika i modulacijom laserske zrake. Potpuno su definirane pomoću slijedećih elemenata: kodiranim znakom raspoznavanja ili ispravljenim Cartesiusovim koordinatama predajnika i kutevima ( $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ).

Okretanje laserskog snopa predajnika po zadanom kutu određenog sektora u horizontalnoj ravnini može se izvesti pomoću "stepping" motora čime se ostvaruje visoka preciznost i pouzdanost u radu.

### 3.6.2.2. Geometrijske karakteristike

Klasični svjetionici se mogu montirati na fiksne (nepokretne) objekte i na brodove svjetionike, dok bi laserski svjetionik valjalo montirati samo na fiksne tj. strogo nepokretne objekte kao npr. rtove, grebene, obalne točke itd.

Geometrijske karakteristike klasičnog svjetionika definirane su njegovom nadmorskom visinom što ujedno određuje njegov svjetlosni i geografski domet. Također centralna vodoravna os klasičnog svjetionika paralelna je s ravninom horizonta, a centralna vertikalna os je okomita na ravninu horizonta.



Slika 24. Geometrijske veličine klasičnog svjetionika

Geometrijske karakteristike laserskog svjetionika definirane su njegovom nadmorskom visinom, kutom između centralne laserske osi i centralne vertikalne osi te kutom divergencije laserske zrake. Prilikom određivanja nadmorske visine laserskog svjetionika polazi se od teorijske pretpostavke da je laserski domet laserskog svjetionika veći od njegovog geografskog dometa. Pod uvjetom da je refrakcija ista kao i za svjetlosne zrake pri normalnim atmosferskim uvjetima: tlak zraka 1013 hPa, temperatura +10°C, relativna vlažnost zraka 60%, geografski domet laserskog svjetionika se može odrediti pomoću jednadžbe:

$$dg = 2,08(\sqrt{vl. svj} + \sqrt{vl. ant}) \text{-----} (60)$$

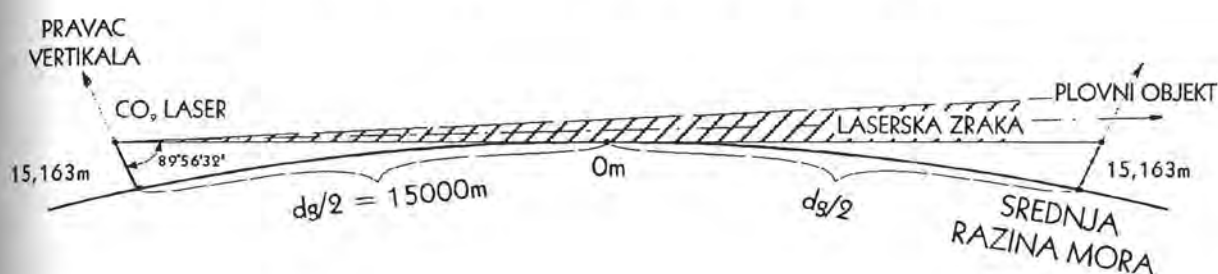
gdje je:

- dg = geografski domet laserskog svjetionika u nautičkim miljama  
 vl.svj = nadmorska visina centralne laserske osi laserskog svjetionika u metrima  
 vl.ant = nadmorska visina centralne vodoravne osi laserske antene (kolektora) na plovnom objektu u metrima

U ovom radu nadmorska visina se računa od srednje razine mora. Uzevši u obzir srednju zakrivljenost površine Zemlje u iznosu od 24,384 cm po nautičkoj milji, u teorijskom modelu LNS-a zadani nominalni geografski domet laserskog svjetionika treba biti 30 000 m  $\cong$  16,198704 M pa se može izračunati sljedeće:

$$vl.svj = (dg/2,08 \cdot 2)^2 = 15,16260716 \cong 15,163 \text{ m}$$

$$vl.ant = (dg/2,08 \cdot 2)^2 = 15,16260716 \cong 15,163 \text{ m}$$



Slika 25. Geografski domet laserskog svjetionika

Na osnovu iznijetog sljedi da kod predloženog teorijskog modela LNS-a treba biti ispunjen uvjet:

$$vl.svj = 15,163 \text{ m}$$

$$vl.ant \geq 15,163 \text{ m} < 165,163 \text{ m}$$

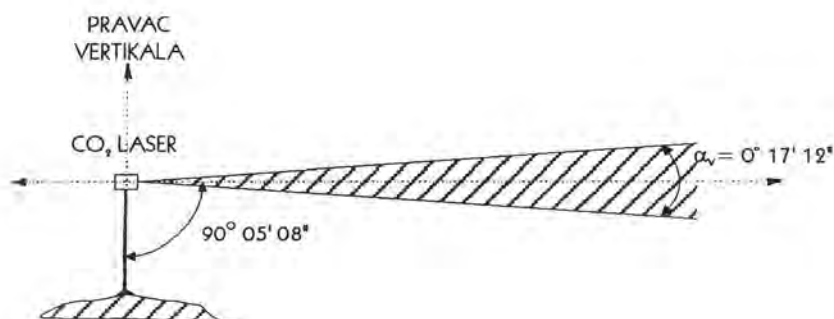
Dakle centralna laserska os laserskog svjetionika treba biti na nadmorskoj visini od najmanje 15,163 m, a centralna vodoravna os laserske antene (kolektora) plovnog objekta treba biti na nadmorskoj visini od najmanje 15,163 m.

Ako je kut divergencije laserske zrake:

- vertikalno  $\alpha_v = 0^{\circ}17'12''$

- horizontalno  $\alpha_H = 0^{\circ}11'28''$

tada kut između centralne laserske osi i centralne vertikalne osi laserskog svjetionika treba biti  $90^{\circ}05'08''$



Slika 26. Geometrija centralnih osi laserskog svjetionika

Dakle centralna laserska os laserskog svjetionika treba biti izdignuta iznad ravnine horizonta za kut  $0^{\circ}05'08''$ .

### 3.6.2.3. Način rada

Međusobni raspored laserskih svjetionika ovisi o konfiguraciji obale, a naročito o obliku obalne linije. Konfiguracija obale također određuje opseg kutnog sektora emitiranja za svaki konkretni laserski svjetionik. S obzirom na unaprijed definiran cilj vođenja "laserske navigacije" bilo bi potrebno za svako određeno konkretno geografsko obalno područje formirati optimalnu mrežu rasporeda laserskih svjetionika. Svi laserski svjetionici na određenom obalnom području mogu raditi neovisno jedan od drugoga tj. nije potrebna sinhronizacija rada kao kod nekih navigacijskih hiperboličkih sustava. Smjer rotacije laserskog svjetionika treba odrediti u svakom konkretnom slučaju, ali je brzina rotacije laserskog snopa kod svih laserskih svjetionika konstantna. Horizontalni razmak između dva laserska svjetionika treba biti unutar maksimalnog projektiranog dometa.

Preporuča se uspostava jedinstvenog kompjuterskog sustava nadzora i upravljanja svim laserskim svjetionicima na određenom geografskom području

uspostavljanjem jednog centra i odgovarajućeg broja podcentara, npr. za morski akvatorij Republike Hrvatske;

- centar: Split
- podcentri: Pula, Rijeka, Zadar, Ploče, Dubrovnik

Centar treba s podcentrima biti povezan kompjuterskom mrežom. Funkcija centra je da nadzire rad čitavog sustava laserskih svjetionika, a iz podcentara bi se trebalo daljinski upravljati svim laserskim svjetionicima na području koje taj podcentar pokriva.

Za kontrolu ispravnog rada laserskih svjetionika preporuča se uspostaviti nekoliko fiksnih prijamnika s poznatom pozicijom, koji bi primali signale iz laserskih svjetionika, izračunavali koordinate svoje pozicije te uspoređivali izračunatu sa stvarnom pozicijom. U slučaju bilo kakve pogreške ili odstupanja koja su izvan dozvoljenih odmah bi alarmirali centar i podcentar. Na taj način bi se ispravnost rada LNS-a neprekidno automatski kontrolirala.

### 3.6.3. Postupak kod izgradnje (uspostavljanja) laserskog svjetionika

Potrebno je izraditi elaborat kojim se ocjenjuje opravdanost obilježavanja neke nove opasnosti na određenom plovnom putu ili poboljšanja stanja u smislu kvalitetnijeg i pouzdanijeg površinskog pozicioniranja na tom plovnom putu. U tom smislu valja izvršiti snimanja na terenu i procjenu situacije posvećujući najveću pažnju:

- opasnostima na plovnom putu kako prirodnim (hridi, plićine, ...) tako i onima koje je postavio čovjek,
- dubini mora, morskim mijenama, jačini i smjeru struja te vremenskim prilikama (vjetrovi, magla, ...),
- obimu, intenzitetu i vrsti prometa brodova,



- pokrivanju, pouzdanosti i preciznosti već postojećih navigacijskih sustava i pomagala,
- pokrivanju, pouzdanosti i preciznosti koja će se postići uspostavljanjem laserskih svjetionika, itd.

Može se uspostaviti samo jedna vrsta (laserski svjetionici - LNS) ili više istovrsnih objekata (klasični svjetionici) odnosno mješavina sustava objekata sigurnosti plovidbe i navigacijskih pomagala. Na osnovu toga treba izraditi prijedlog rješenja koji se dostavlja nadležnoj Lučkoj kapetaniji. Nakon dobivene suglasnosti od strane nadležne Lučke kapetanije pristupa se izradi kompletne projektno-tehničke dokumentacije koja objedinjuje sve elemente, pokazatelje i parametre: nautičko-tehničke, hidrograđevinske, financijske itd.

### 3.7. Laserski prijamnik plovnog objekta

Osnovna funkcija laserskog prijamnika je fotodetekcija, filtriranje i obrada laserskog signala. Osjetljivost prijamnika ograničena je parametrima fotodetektora koji pretvara svjetlost u električni signal i šumom koji nastaje u pretpojačalu električnog signala. Kao fotodetektor se mogu koristiti: fotootpori, fotodiode, fototranzistori, vakumske fotoćelije i fotomultiplikatori. Fotodetektor su poluvodičke diode na koje upada laserska zraka. Upadni svjetlosni val u poluvodiču predstavlja snop fotona s određenom energijom. Ako je fotonska energija veća od energetske praga u poluvodičkom materijalu fotoni mogu osloboditi elektrone iz kristalne rešetke stvarajući elektrone u poluvodiču. U reverzno polariziranoj diodi električno polje u slobodnom području izazvat će pomak nosioca naboja, stvarajući struju koja se može pojačati u pojačalu prijamnika. Ovako stvorena struja je osnova fotodetekcije u poluvodiču. Sam proces pretvaranja fotona u elektrone ima statistički (šumni) karakter što ujedno određuje i granicu osjetljivosti detektora. Ukupna količina generiranih elektrona  $n$ , može se odrediti Poissonovom raspodjelom jer fotoni

uzajamno ne djeluju, a vjerojatnost foto-detekcije fotona statistički ne ovisi od broja ranije detektiranih fotona tj.:

$$P(n=K) = \frac{1}{K!} \left( \frac{\eta E}{hf} \right)^K \cdot e^{-\frac{\eta E}{hf}} \quad (61)$$

gdje je:

$P(n=K)$  - vjerojatnost da će se u vremenskom intervalu duljine  $T$  pojaviti  $K$  elektrona

$E$  - energija svjetlosti koja pada na detektor

$\eta$  - kvantni izlaz detektora tj. dio svjetlosne snage koju efektivno apsorbira detektor

Kvantni izlaz detektora se može prikazati sljedećim odnosom:

$$\eta = \text{broj elektrona na kontaktima fotodetektora} / \text{broj fotona koji padaju na fotodetektor} \quad (62)$$

$hf$  - energija fotona

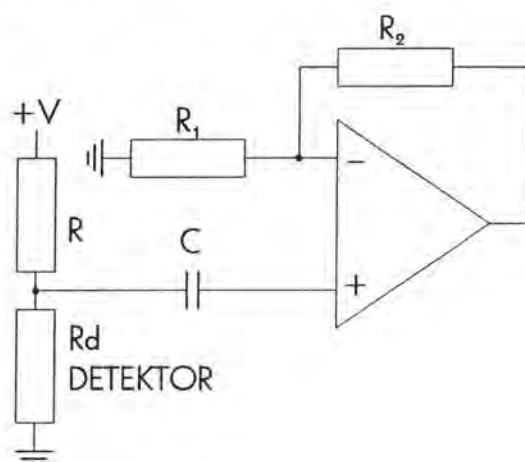
$S$  kvantnim izlazom povezana je i apsolutna osjetljivost prijamnika ( $S$ ) koja se može definirati kao:

$$S = \text{broj elektrona u jedinici vremena} / \text{snaga padajućih fotona} \quad (A/W) \quad (63)$$

### 3.7.1. Osnovne karakteristike laserskog prijamnika

Danas najosjetljiviji prijamnik radi pri nivou ulazne svjetlosne snage od oko 1 nW što stvara struje od nekoliko nA. Kod predloženog teorijskog modela LNS-a ulazna svjetlosna snaga je oko 15,6  $\mu\text{W}$  što je sasvim dovoljno za pouzdan rad sustava. Na plovnom objektu se preporuča uporaba fotodetektora npr. tipa PCI - 2TE - n, TE hlađenje, IR fotokonduktor koji je optički podešen sa visoko-refraktivnim indeksom CdZnTe hemisferičnih ili hiperhemisferičnih leća. Visoke performance, stabilnost i pouzdanost u radu osigurava ugrađeni semikonduktor (HgCdZnTe) i visoko kvalitetna obrada površine. Takav je kompletan uređaj proizvođača BSA Technology inc., Torrance, Ca., USA, koji podrazumijeva čitav komplet osnovnih elemenata

zajedno s kvadratnim ćelijama, specijalnim učvršćivačima, konektorima, optičkim okvirima i optičkim filterima. Za pouzdan rad oni trebaju biti korišteni zajedno s pretpojačalima odgovarajućeg frekventnog opsega. Konstantna struja napajanja detektora ostvaruje se preko otpornika R koji treba imati otpor najmanje pet puta veći od otpora detektora  $R_d$ .



Slika 27. Funkcionalni radni spoj

Ostale važnije tehničke karakteristike predloženog detektora su:

Detektivnost na $\lambda_p$	$> 2 \cdot 10^9 \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$
Detektivnost na $\lambda_{op}$	$7 \cdot 10^8 \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$
Prijemljivost x širina na $\lambda_p$	$> 150 \text{ Vmm}/\text{W}$
Prijemljivost x širina na $\lambda_{op}$	$> 50 \text{ Vmm}/\text{W}$
Vrijeme odziva	$< 30 \text{ nsek}$
Pločna otpornost	$80-160 \Omega/\text{SQR}$
Aktivna površina (duljina x širina)	$20\text{mm} \times 20\text{mm}$
Kutno polje	$42^\circ-60^\circ$
Radna temperatura	$220^\circ\text{K}-230^\circ\text{K}$

### 3.8. Opažanja pomoću predloženog teorijskog modela LNS-a

Domet predloženog teorijskog modela LNS-a za vođenje terestričke navigacije može varirati u granicama od 10 do 20 M. Direktno ovisi o dva elementa:

- depresiji horizonta odnosno zakrivljenosti Zemaljske površine
- gustoći snage laserskog snopa

Za prikaz teorijskog modela LNS-a odabran je reprezentativni uzorak nominalnog dometa  $\approx 16$  M i gustoće snage laserske zrake na tom dometu od  $\approx 0,0266 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  čime se osigurava pouzdan rad sustava.

Kod predloženog modela LNS-a mogu se razlikovati dvije osnovne metode opažanja:

- statička metoda
- kinematička metoda

Kod statičke metode laserski prijatelj plovnog objekta za vrijeme trajanja opažanja miruje tj. brzina kretanja plovnog objekta je nula (slučaj usidreni brod, kvar pogonskog stroja, itd.)

Kod kinematičke metode laserski prijatelj plovnog objekta se za vrijeme trajanja opažanja zajedno s plovnim objektom giba. Opažanja omogućavaju jednostruko određivanja koordinata točaka svakih 90 sekundi ili svaku 1 sekundu.

#### 3.8.1. Točnost pozicioniranja pomoću predloženog teorijskog modela LNS-a

Točnost određivanja koordinata pozicija plovnog objekta pomoću predloženog teorijskog modela LNS-a ovisi o nizu faktora: o točnosti kuteva ( $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ) udaljenosti laserski svjetionik-predajnik, konfiguraciji obale, hidro-meteorologijskim prilikama,

vremenskim uvjetima, stanju atmosfere itd. Da bi se dobila pouzdana slika o točnosti pozicioniranja pomoću LNS-a bilo bi potrebno izvršiti dovoljan broj praktičnih mjerenja na terenu, no pri dobrim vremenskim uvjetima okvirno se mogu očekivati sljedeće vrijednosti<sup>6</sup>:

- na dometu do 30 000 ft	$\cong 9144$ m
točnost udaljenosti	$\leq \pm 0,3048$ m
točnost kuta	$\leq \pm 0,1$ mrad
- Na dometu do 60 000 ft	$\cong 18\,288$ m
točnost udaljenosti	$\leq \pm 0,6096$ m
točnost kuta	$\leq \pm 0,1$ mrad
- na dometu do 100 000 ft	$\cong 30\,480$ m
točnost udaljenosti	$\leq \pm 1,524$ m
točnost kuta	$\leq \pm 0,3$ mrad

Kod praktičkih ispitivanja, za ocjenu točnosti pozicioniranja pomoću predloženog teorijskog modela LNS-a može se primijeniti modificirani kriterij<sup>7</sup> PDOP (POSITION DILUTION OF PRECISION tj. POLOŽAJNO RASLOJAVANJE ODREĐENOSTI), koji odgovara tragu kovarijacione matrice za određivanje koordinata pozicije plovnog objekta. Što je manji PDOP bolja je geometrija pozicioniranja. Iz koordinata pozicije plovnog objekta i laserskih svjetionika-predajnika može se izračunati DOP-faktor (DOP = DILUTION OF PRECISION tj. RASTAPANJE ODREĐENOSTI). Množenjem standardnih devijacija dobivenih kuteva pomoću kodiranih signala od laserskog pre-

<sup>6</sup> A. V. Jelalian: Laser Radar Systems, Boston-London, Artech House, 1992., str. 148

<sup>7</sup> Goad C.C.: Precise relative position determination using GPS carrier phase measurements in a nondifference mode, Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the GPS, Rockville, Maryland, vol I, 1985.

dajnika s DOP faktorom daljnjom obradom dobiju se standardne devijacije traženih navigacijskih veličina i to:

GDOP	- Geometrical dilution of precision tj. geometrijsko raslojavanje određenosti
PDOP	- Position dilution of precision tj. položajno raslojavanje određenosti
HDOP	- Horizontal dilution of precision tj. horizontalno raslojavanje određenosti
VDOP	- Vertical dilution of precision tj. vertikalno raslojavanje određenosti
TDOP	- Time dilution of precision tj. vremensko raslojavanje određenosti

$$GDOP = \sqrt{(PDOP)^2 + (TDOP)^2} \text{ ----- (64)}$$

Ako se s  $\delta_k$  označi standardna devijacija očitanih kuteva na laserskom prijarniku plovnog objekta tada vrijedi sljedeće:

$\delta_k \cdot GDOP$  = standardna devijacija ukupnog rješenja

$\delta_k \cdot PDOP$  = standardna devijacija trodimenzionalnog pozicioniranja

$\delta_k \cdot HDOP$  = standardna devijacija dvodimenzionalnog pozicioniranja

### 3.9. Rasprostiranje laserske zrake kroz atmosferu

Ključni problem predloženog teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava predstavlja rasprostiranje laserske zrake kroz atmosferu, naime svjetlosni elektromagnetski valovi su vrlo osjetljivi u odnosu na onečišćenja u atmosferi i na poje-

dine elemente koji su sastavni dijelovi u atmosferi. U osnovi molekule vode, ozona i ugljičnog dioksida prigušuju svjetlo uslijed apsorpcije i Rayleigh-ova<sup>8</sup> raspršivanja svjetla. Također turbulencije u atmosferi dovode do znatnog prigušenja svjetla. Gubici svjetlosti u atmosferi ovise o sljedećim elementima:

- prigušenje uslijed molekularne apsorpcije
- prigušenje uslijed raspršenja na čvrstim česticama i kapljicama
- prigušenje uslijed atmosferske turbulencije

### 3.9.1. Prigušenje uslijed molekularne apsorpcije

Nastaje zbog prisustva vodene pare i različitih plinova koji su sastavni dio atmosfere. Najveći gubici nastaju zbog vodene pare, ugljičnog dioksida i ozona dok znatno manji gubici nastaju zbog metana, dušika, kisika, argona, ugljičnog monoksida, dušičnog monoksida itd. Do molekularne apsorpcije dolazi zbog kvantno-mehaničke rezonacije. U teorijskim radovima obično se daje eksperimentalna zavisnost apsorpcije od valne duljine  $\lambda$  ili prozračnost u funkciji od  $\lambda$ .

Sadržaj vodene pare ovisi o geografskom području tj. o poziciji i vremenu motrenja i kreće se u okviru u granicama od 0,001 % u jedinici volumena zraka do zasićenja. Sadržaj CO<sub>2</sub> je prilično stabilan i iznosi oko 0,03 % u jedinici volumena zraka, međutim u velikim industrijskim mjestima ova koncentracija može naglo porasti. Ozon je dosta neravnomjerno raspoređen po visini i dostiže maksimalnu koncentraciju na visini od otprilike 30 km, koja iznosi približno 0,001 %.

Gubici svjetlosne energije laserske zrake uslijed apsorpcije u vodenoj pari ovise o koncentraciji molekula H<sub>2</sub>O i o veličini kondenziranih kapljica. Kapljice vode u oblacima imaju promjere u granicama od 0,001 mm do 1 mm s najvjerojatnijom vrijednošću od 5  $\mu$ m do 10  $\mu$ m. Promjeri kapljica kiše imaju najvjerojatnije vrijednosti

---

<sup>8</sup> John Williams Strutt Rayleigh (1842 - 1919)

od 0,1 mm do 1 mm. Gubici uslijed apsorpcije u vodenoj pari ovise o veličini kapljica i valnoj duljini svjetlosti. Treba istaći da kapljice vode u atmosferi nisu uvijek čiste već često sadrže i razne primjese, pa se takve kapljice uvjetno mogu nazvati nečiste kapljice. Navedene kapljice kao i čvrste čestice u atmosferi mogu se nazvati aerosoli. Za nečiste kapljice promjera manjeg od mikrometra apsorpcija upadne laserske zrake odvija se po zakonu  $1/\lambda^2$ . Kod kapljica veličine reda  $5 \mu\text{m}$ , apsorpcija raste sa smanjenjem  $\lambda$ , dok se za kapljice reda nekoliko desetina mikrometra apsorpcija mijenja s valnom duljinom po zakonu  $1/\lambda$ . Za valne duljine od  $12,9 \mu\text{m}$  do  $17,1 \mu\text{m}$  apsorpcija je velika zbog  $\text{CO}_2$ . U višim slojevima atmosfere gubici uslijed apsorpcije bitno zavise od koncentracije ozona, dok uz površinu mora to nije slučaj.

### 3.9.2. Prigušenje uslijed raspršenja na čvrstim česticama i kapljicama

Ako zraka svjetlosti pada na sitne čestice uključujući i molekule, atome i elektrone tada te čestice emitiraju sekundarnu svjetlost, naime tada se pojavljuje raspršenje svjetlosti odnosno gubitak svjetlosne energije u atmosferi. Mogu se razlikovati dvije vrste raspršenja: koherentno i nekoherentno. Pri koherentnom raspršenju između upadne (primarne) svjetlosti i sekundarne svjetlosti ne postoji razlika u fazi ili frekvenciji, dok kod nekoherentnog raspršenja (npr. luminescencije, Comptonovog efekta itd.) dolazi do promjene faze i frekvencije. Za ovaj rad analizirat će se samo koherentno raspršenje pri kojem dolazi samo do promjene intenziteta svjetlosti koja prolazi kroz promatranu sredinu. Uvjetno rečeno mogu se pojaviti dva oblika koherentnog raspršenja:

- Rayleigh-ovo rasipanje
- Mie-ovo rasipanje

Ako do raspršenja svjetlosti dolazi na česticama čiji je promjer manji od valne duljine svjetlosti javlja se Rayleigh-ovo rasipanje.



Ako je promjer čestice na kojoj se vrši raspršenje svjetlosti veći od valne dužine svjetlosti javlja se Mie-ovo rasipanje.

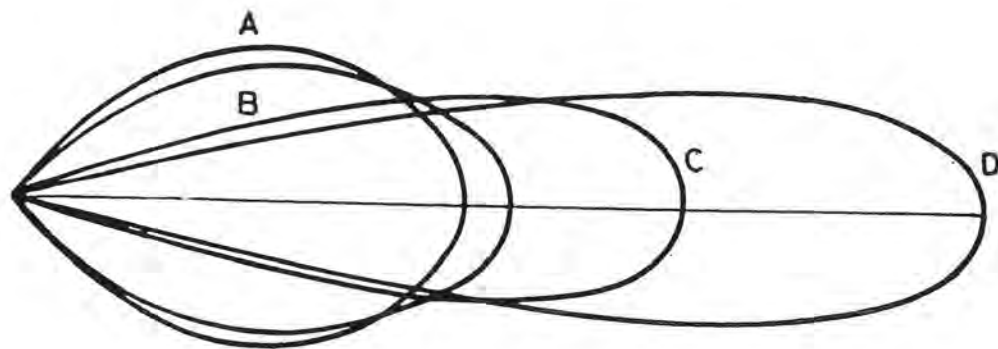
Kod Rayleigh-ovog rasipanja rasijavanje svjetlosti ne javlja se na pojedinim molekulama već na fluktuacijama njihove gustoće ili koncentracije u malim volumenima. Intenzitet  $I$  raspršene svjetlosti obrnuto je proporcionalan valnoj dužini svjetlosti na četvrtu potenciju tj.

$$I \sim 1/\lambda^4 \text{-----(65)}$$

što znači da bijela svjetlost koja prolazi kroz mutnu sredinu mijenja boju. U raspršenoj svjetlosti prevladava kratkovalna (plavoljubičasta) svjetlost, a u prolaznoj dugovalna (žutocrvena), tipičan slučaj je primjer plave boje neba i žutocrvene boje izlazećeg ili zalazećeg Sunca.

Da bi se prikazala prostorna karakteristika raspršenja svjetlosti može se koristiti indikatrisa raspršenja  $f(\theta)$ , koja se određuje odnosom intenziteta zračenja u određenom smjeru  $I(\theta)$  i ukupne energije zračenja.

Na sljedećoj slici prikazana je indikatrisa molekularnog raspršenja.



Slika 28. Indikatrisa molekularnog raspršenja,  $f(\theta)$ , (A) i njeni oblici ako  $r/\lambda$  raste (B, C, D)

Izvor: Milatović, D.: Optoelektronika, Sarajevo, Svjetlost, 1989., str. 145

Slabljenje svjetlosti zbog molekularnog raspršenja u plinovima ovisi o indeksu loma svjetlosti plinova, koncentraciji molekula i o ostalim elementima.

U sljedećoj tablici prikazani su rezultati prigušenja svjetlosti usljed molekularnog raspršenja po kilometru ( $G$ ), u funkciji valne duljine svjetlosti ( $\lambda$ ).

$\lambda(\mu\text{m})$	0,3	0,4	0,5	0,65	1,06	10,6
$G(1/\text{km})$	$1,45 \cdot 10^{-1}$	$4,30 \cdot 10^{-2}$	$1,72 \cdot 10^{-2}$	$5,89 \cdot 10^{-3}$	$8,46 \cdot 10^{-4}$	$8,46 \cdot 10^{-8}$

Tablica 2. Prigušenje svjetlosti usljed molekularnog raspršenja

Izvor: Milatović, D.: Optoelektronika, Sarajevo, Svjetlost, 1989, str. 145.

Kao što se iz tablice vidi gubici usljed raspršenja na valnoj duljini od  $10,6 \mu\text{m}$  na horizontalnoj udaljenosti od 30 km su zanemarivo mali.

Mie-ova teorija<sup>9</sup> rasipanja svjetlosti može se primijeniti i na male čestice čiji je promjer manji od valne duljine svjetlosti kao i na čestice čiji je promjer veći od valne duljine svjetlosti. U prvom slučaju rezultati su vrlo bliski rezultatima Rayleigh-ovog rasipanja. U drugom slučaju dobivaju se rezultati rasipanja svjetlosti na aerosolima.

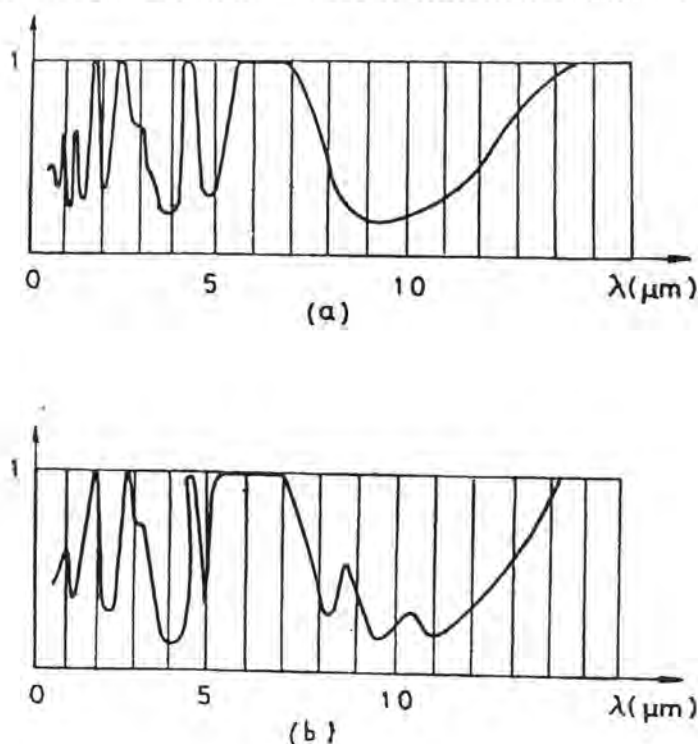
Mie-ova teorija polazi od intenziteta raspršene svjetlosti  $i(\theta)$  u smjeru koji određuje kut ( $\theta$ ) na samo jednoj čestici koja se osvetljava svjetlošću proizvoljne polarizacije jediničnog intenziteta. Intenzitet svjetlosti izražava se kompleksnim jednadžbama pomoću parametara  $\theta/\lambda$ , indeksa loma svjetlosti čestice u odnosu na sredinu  $n$ , polumjera čestice  $r$  i parametra  $p = 2\pi r/\lambda$ . Ako se analizira rasipanje na česticama koje istovremeno imaju i određeni koeficijent apsorpcije potrebno je uvesti i kompleksni indeks loma svjetlosti. Na osnovu iznijetog proizlazi da odnos  $r/\lambda$  bitno utječe na indikatrixu molekularnog raspršenja. Za "lasersku navigaciju" je povoljnije što je veći odnos  $r/\lambda$  jer je tada lepeza izduženija.

<sup>9</sup> The Optical Scatter Channel, Proceedings of the IEEE, No 10, 1970, str. 1547-1563.

### 3.9.3. Prigušenje usljed atmosfere turbulencije

Nastaje kada se u atmosferi miješaju tople i hladne zračne mase. Miješanjem tih masa javljaju se lokalne promjene: temperature zraka, vlažnosti zraka, gustoće zraka, indeksa loma itd. Zbog toga laserska zraka koja prolazi kroz turbulentnu atmosferu se raspršuje, tako da se usljed turbulentnog kretanja zraka stvaraju nehomogenosti u atmosferi, pri čemu udaljenost točaka u kojima se parametri zraka za određeni iznos mijenjaju može iznositi od nekoliko milimetara do nekoliko stotina metara. Kako su gubici usljed turbulencije zraka veličine koje se stalno mijenjaju, nemoguće ih je prikazati u nekoj egzaktnoj formi.

U praksi su izvedeni mnogobrojni eksperimenti na osnovu kojih su dobiveni podaci o prozračnosti atmosfere pri određenim meteorološkim uvjetima. Na sljedećoj slici prikazane su relativne apsorpcije svjetlosti u zraku za razne valne duljine svjetlosti po horizontali i vertikali pri standardnim meteorološkim uvjetima.



Slika 29. Eksperimentalno dobiveni grafikoni u normiranom obliku za gubitke u atmosferi pri različitim valnim duljinama i standardnim meteorološkim uvjetima po horizontali (a) i po vertikali (b) Izvor: Milatović, D.: Optoelektronika, Sarajevo, Svjetlost, 1989., str. 146

Grafikoni su prikazani u normiranom obliku, tj. maksimalna apsorpcija (gubici) u zraku normirani su sa 100% ili 1, a pri različitim valnim duljinama ucrtane su relativne vrijednosti apsorpcije svjetlosti.

Iz grafikona se vidi da ovisno o valnoj duljini svjetlosti, u atmosferi postoje područja s minimalnim prigušenjem svjetlosti, odnosno s minimalnim gubicima. To su sljedeća područja:

$$\lambda = 1,00 \text{ do } 1,07 \mu\text{m},$$

$$\lambda = 1,18 \text{ do } 1,23 \mu\text{m},$$

$$\lambda = 1,58 \text{ do } 1,70 \mu\text{m},$$

$$\lambda = 2,18 \text{ do } 2,30 \mu\text{m},$$

$$\lambda = 3,50 \text{ do } 4,00 \mu\text{m},$$

$$\lambda = 9,00 \text{ do } 11,0 \mu\text{m}.$$

Ukupni gubici za valnu duljinu  $\lambda = 0,63 \mu\text{m}$  se približno mogu izračunati pomoću empirijske jednadžbe:

$$Gu(\lambda) = 3,91 F(\lambda)/s \text{ -----(66)}$$

gdje je:

$$F(\lambda) = (0,55/\lambda)^a \text{ -----(67)}$$

$$a = 0,585 s^{1/3} \text{ -----(68)}$$

s - vidljivost u atmosferi u km

$\lambda$  - valna duljina svjetlosti u  $\mu\text{m}$

$Gu(\lambda)$  - ukupni gubici u db/km

Eksperimentima je utvrđeno<sup>10</sup> da u čistoj atmosferi (vidljivost veća od 10 km) pri najkraćim valnim duljinama vidljive svjetlosti ukupni gubici iznose  $< 1 \text{ db/km}$ , dok na valnoj duljini od  $10,6 \mu\text{m}$  ukupni gubici iznose  $< 0,04 \text{ db/km}$ . U pojedinim radovi-

<sup>10</sup> Milatović, D.: Optoelektronika, Sarajevo, Svjetlost, 1989, str. 147

ma<sup>11</sup> se u posljednjem slučaju navodi podatak  $G_u < 0,4$  db/km što se objašnjava apsorpcijom u plinovima. Ako je vidljivost u atmosferi od 2 km do 10 km tada se okvirno javljaju ovi gubici:

za  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$  i  $s = 6$  do  $7$  km;  $G_u < 0,064$  db/km

za  $\lambda = 1 \mu\text{m}$  i  $s = 6$  do  $7$  km;  $G_u < 1,1$  db/km

za  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$  i  $s = 3$  do  $4$  km;  $G_u < 0,13$  db/km

za  $\lambda = 1 \mu\text{m}$  i  $s = 3$  do  $4$  km;  $G_u < 2,3$  db/km

Očigledno je da pri  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$  su ukupni gubici znatno manji od ostalih valnih duljina, te je stoga za rad teorijskog modela LNS-a naznačena primjenjivost valne duljine od  $10,6 \mu\text{m}$ .

---

<sup>11</sup> Lawrence, R.S. i (dr.): Measurements of Atmospheric Turbulence Relevant to Optical Propagation, Journal of the Optical Society of America, vol. 66, 1970., str. 826-830

#### 4. OPASNOSTI PRI UPORABI PREDLOŽENOG TEORIJSKOG MODELA LASERSKOG NAVIGACIJSKOG SUSTAVA

Ako bi bio upotrebljavan neodgovorno i nestručno, laser predstavlja potencijalni rizik za osoblje i okolinu. Rizici mogu biti električni, oštećenje očiju, kože, udisanje otrovnih para kod CO<sub>2</sub> lasera, mogućnost mikrobiološke kontaminacije te opasnost od požara.

Električna oštećenja posljedica su vrlo visokog napona napajanja i zato svi električni vodovi moraju biti dobro izolirani. Također zbog velikih električnih snaga i visokog napajanja laser mora biti standardne kvalitete tj. proizveden od profesionalne ustaljene firme poznate po kvaliteti svojih proizvoda.

Oštećenje kože zavisi od jakosti energije lasera, a može biti od fotosenzitivne reakcije do nekroze. Snaga Sunčeva zračenja je i do 1500 W/m<sup>2</sup>, što iznosi 150 mW/cm<sup>2</sup>. Na udaljenosti od 100 metara od laserskog svjetionika-predajnika gustoća snage zračenja bila bi 23,9 mW/cm<sup>2</sup>. Budući da je laserski snop moduliran i ima kutnu rotaciju stvarna srednja gustoća snage je mnogo puta manja iz čega se može zaključiti da ne postoji opasnost od oštećenja kože.

Oči su organi koji mogu najteže stradati kod primjene lasera. U slučaju da se laserska zraka usmjeri na ljudsko oko može doći do oštećenja kornea, retine kao i svih ostalih struktura oka što zavisi od količine energije koja je primljena.

Istraživanja u vezi s kancerogenim djelovanjem lasera dosad nisu dala pozitivne rezultate. Dokazana je mikrobiološka kontaminacija na mjestu uporabe laserske energije jer laserska energija ubija sve mikrobiološke organizme na mjestu njena djelovanja.

Inhalacijom dima nakon spaljivanja tkiva, posebno CO<sub>2</sub> laserom nije dokazano toksično niti kancerogeno djelovanje. Kod predloženog teorijskog modela LNS-a zbog relativno malih gustoća snaga laserske zrake opasnost od požara ne postoji.

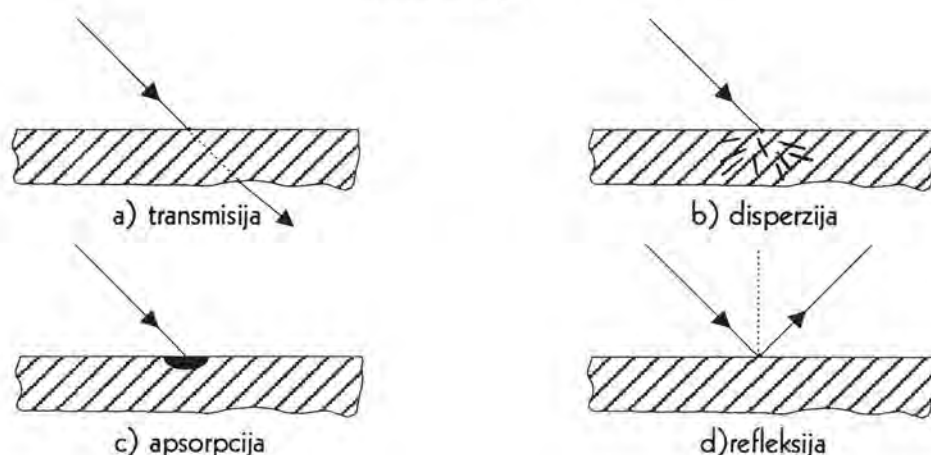
#### 4.1. Interakcija elektromagnetskog laserskog zračenja i bioloških struktura (tkiva)

Uporaba elektromagnetske energije u medicini, prometu itd. djeluje na postojeći simbiotski odnos između tvari i radijacije. Čovjek srednje mase sastoji se od otprilike  $30 \cdot 10^{28}$  osnovnih čestica koje su u stalnom kretanju zbog izmjene energije u prostoru koji je oko  $10^{24}$  puta veći od volumena same materije. U tom ogromnom odnosu prostora, materije i energije javlja se i primjena lasera u pomorskoj površinskoj navigaciji.

Pod interakcijom se u ovom radu podrazumijeva međudjelovanje laserske zrake i bioloških struktura tj. tkiva. Interakcija laserske zrake i nebioloških struktura se zbog relativno male snage laserske zrake ne analizira.

Pri interakciji laserskog zračenja s tkivom mogu se pojaviti sljedeći procesi:

- a) transmisija
- b) disperzija
- c) apsorpcija
- d) refleksija



Slika 30. Tipovi interakcije tkiva i laserske zrake

- a) Transmisija - je slobodno prolaženje laserske zrake kroz tkivo bez gubitka energije uz neznatnu promjenu smjera zrake. Kako organsko tkivo optički ima slabu transparentnost ne javlja se čista transmisija.
- b) Disperzija - je rasipanje energije zrake u interaktivnom volumenu tkiva. To se dešava u nehomogenim sredinama gdje laserska zraka nailazi na različiti indeks loma prilikom prodiranja kroz organsku materiju.
- c) Apsorpcija - je pretvaranje energije laserske zrake u drugi oblik energije u organskoj sredini interakcije. Energija laserske zrake koja se apsorbira u tkivu može se pretvoriti u toplinsku energiju što može izazvati koagulaciju i vaporizaciju. Učinak je upravo proporcionalan s količinom energije koja se apsorbira. Neapsorbirani dio može dalje penetrirati, reflektirati se ili rasipati se. Duljina ekstinicije tj. vrijednost udaljenosti koja je potrebna da bi se apsorbiralo 90% ulazeće energije kod CO<sub>2</sub> lasera iznosi 0,3 mm. Međutim potrebna gustoća snage na jedinicu površine da bi došlo do bilo kojeg od gore navedenih učinaka je mnogo desetaka puta veća od predviđene snage lasera u ovoj disertaciji.
- d) Refleksija - je odbijanje laserske zrake s površine tkiva ili druge materije. Ona se javlja u slučaju kada zraka naiđe na znatnu promjenu indeksa loma, odnosno pod kutovima totalne refleksije.

#### 4.2. Djelovanje laserske zrake na tkivo

Laserska zraka koja djeluje na tkivo može izazvati sljedeće učinke:

- fotokemijski učinak
- toplinski učinak
- ionizacijski učinak



#### 4.2.1. Fotokemijski učinak

Izaziva kemijsko-metaboličke promjene u tkivu, a to je ujedno i baza na kojoj se temelji laserska biostimulacija u laserskoj fotomedicini. To je uglavnom kod kraćih valnih duljina  $\lambda \leq 1 \mu\text{m}$ .

#### 4.2.2. Toplinski učinak

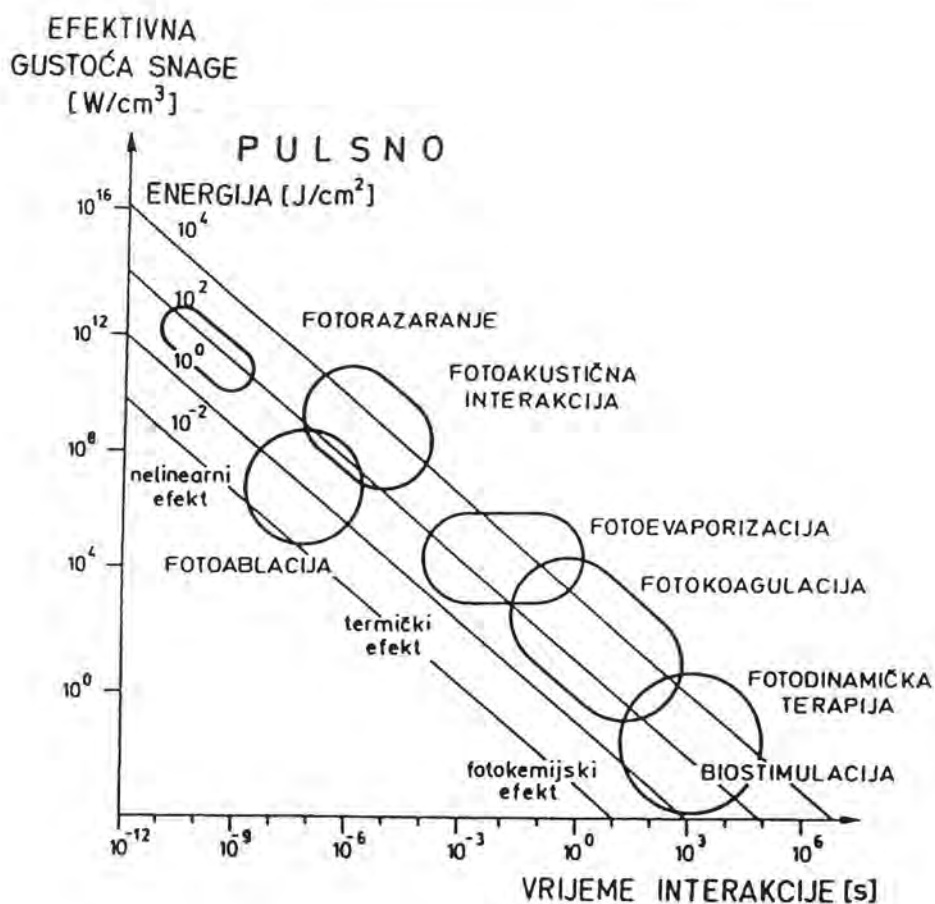
Nastaje kao rezultat apsorpcije energije laserske zrake u tkivu uz povećanje temperature u interaktivnom volumenu čime se ostvaruju uvjeti za koagulaciju, vaporizaciju ili karbonizaciju tkiva. Od  $37^{\circ}\text{C}$  do  $60^{\circ}\text{C}$  termički učinak je reverzibilan i to je područje nedestruktivne interakcije tkiva. Iznad  $60^{\circ}\text{C}$  do  $300^{\circ}\text{C}$  je područje destruktivne interakcije koje koristi laserska kirurgija. Ova vrsta učinka osim efektivne gustoće snage u interaktivnom volumenu ovisi i o vremenu izlaganja tkiva utjecaju laserskog zračenja.

Ovaj učinak je moguć ali kod  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$  bile bi potrebne znatno veće gustoće snage od onih koje su predložene u ovoj disertaciji, jer tkivo nema veliku apsorpciju i grijao bi se veliki volumen tkiva u odnosu na valnu duljinu zračenja.

#### 4.2.3. Ionizacijski učinak

Postiže se izlaganjem tkiva vrlo velikim gustoćama laserske energije pulzacijskim načinom rada. Tada se javljaju nelinearni ionizacijski učinci koji izazivaju razaranja strukture tkiva.

Sljedeća slika prikazuje zone ostvarivanja raznih učinaka laserske zrake na tkivo.



Slika 31. Djelovanje laserske zrake na tkivo

Izvor: Negovetić, L. i (dr.): *Laser u kirurgiji glave i vrata, Školska knjiga, Zagreb, str. 53, 1990.*

Kod uporabe predloženog teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava mogu se pojaviti sljedeći učinci:

- na udaljenosti do 1 metra od laserskog predajnika termički efekt odnosno fotokoagulacija i fotoevaporizacija tkiva,
- na udaljenosti do 10 metara od laserskog predajnika fotokemijski efekt odnosno biostimulacija tkiva.

Na osnovu iznijetog može se zaključiti da su zone opasnosti za ljudsko tkivo u rasponu udaljenosti od laserskog predajnika do 10 metara, što znači da u tom ras-

ponu ljudsko tkivo ne smije doći u doticaj s laserskom zrakom, dok na ostalim udaljenostima nema posebnih medicinskih opasnosti za ljudsko tkivo.

U nastavku obradit će se još neki važniji problemi koji se mogu pojaviti pri uporabi predloženog teorijskog modela LNS-a.

#### 4.2.4. Kemijsko-metaboličke promjene tkiva

Svjetlo na živi organizam zasigurno djeluje metabolički, što se može evidentirati u vidu fotosinteze, produkciji vitamina D ili sunčanju. Metabolički učinci su u tim slučajevima rezultat djelovanja određenog zračenja djelovanjem vrlo niske doze energije. Određena tkiva mogu biti i fotosenzibilizirana dodatkom posebnih kemijskih sredstava tzv. fotosenzibilizirajućih agensa-kromofora. Npr. koža je osjetljiva na sunčevo svjetlo, no nakon primjene tetraciklina postaje još osjetljivija i lako dolazi do opekotina. Također očito je da određena tkiva reagiraju na određene valne duljine na specifičan način.

Može se konstatirati da valna duljina od  $10,6 \mu\text{m}$  na udaljenosti od 10 metara od laserskog predajnika ne izaziva nikakve kemijsko-metaboličke promjene na normalnom zdravom tkivu.

#### 4.2.5. Toplinsko djelovanje laserske zrake

Uočeno je, naravno s izvjesnim odstupanjima da određena energija u dodiru s tkivom izaziva manje-više isto patohistološke promjene, bez obzira na valnu duljinu izvora. Rasprava koja slijedi odnosi se na  $\text{CO}_2$  laser i primjenu energije na tkivo. Obradit će se osnovni fizikalni parametri neophodni za razumijevanje toplinskog djelovanja laserskog zračenja.

##### a) Gustoća energije

Toplinsko djelovanje laserskog zračenja na tkivo upravo je proporcionalno s gustoćom energije koja se može definirati kao energija po jedinici površine tkiva (npr. ako se djeluje snagom od 10 W na površinu od  $1 \text{ cm}^2$  u trajanju od 1 sekunde,

na tkivo površine  $1 \text{ cm}^2$  prenese se energija od 10 J). Vrlo važan parametar je i tzv. "spot size" tj. geometrijski oblik poprečnog presjeka prostornog uzorka projicirane energije. Najčešće se može aproksimirati s Gaussovom distribucijom u  $\text{TEM}_{00}$  modu. Kod serijskih  $\text{CO}_2$  lasera najmanji spot kružnog poprečnog presjeka iznosi od 100 do  $500 \mu\text{m}$ . Kod predloženog teorijskog modela LNS-a "spot size" je vrlo velik već na udaljenostima većim od 20 metara od laserskog predajnika, upravo iz razloga dobivanja gustoće energije na što većoj površini čime se minimizira i uklanja toplinski učinak laserskog zračenja na tkivo.

#### **b) Valna duljina laserske zrake**

S medicinsko stanovišta to je jedan od najvažnijih parametara kod uporabe laserskog elektromagnetskog zračenja za vođenje "laserske navigacije", jer određuje koja tkiva će u kolikoj mjeri apsorbirati zračenje i gdje će se postići određeni učinci na tkivu. Do danas najviše istraživani sastojci živih bića su voda i hemoglobin. Apsorpcijski maksimum za vodu je u području spektra od 2900 do 10 000 nm. Maksimum spektralne apsorpcije hemoglobina je kod 400 nm i kod 577 nm. Za melanin maksimalna apsorpcija je kod 400 nm. Kako predloženi model LNS-a radi na valnoj duljini od  $10,6 \mu\text{m}$  to je apsorpcija laserske energije u živa bića relativno niska.

#### **c) Pulsacije laserskih zraka**

To je također važan parametar na osnovu kojeg se može ustanoviti mogućnost termalne destrukcije tkiva. Fizikalno gledano radi se o količini dovodenja laserske energije na tkivo u određenom vremenu. Tri elementa određuju krajnju razinu energije pulsirane zrake:

- amplituda vršne snage ("peak power")
- ponavljanje impulsa
- trajanje impulsa

Treba istaći da vršna snaga kod impulsa može dostići i peterostruku vrijednost od kontinuirane snage značenja. To se može postići ako se laseri moduliraju

interno tj. unutar rezonatora. Kod predloženog modela laserskog navigacijskog sustava predviđena je snaga laserskog predajnika od 40 W. Kad se laserska zraka pulsira to se bazira na "On-Off" principu te vršna snaga stalno iznosi 40 W čime je izbjegnuta mogućnost povećanja snage kod odašiljanja impulsa.

Vrijedi pravilo da što više vremena prođe između impulsa to je manje širenje topline na okolna tkiva. Brza apsorpcija topline u tkivu daje uvijek iste promjene i ovisna je o energiji dovedenoj do površine tkiva (npr. kratki impuls trajanja 2 do 3 sekunde u izlaznoj snazi od 40 do 50 W stvara sloj nekroze debljine 3 do 4 mm).

TEMPERATURA	UČINAK
37° DO 55° C	Kemijsko-metabolički učinak
> 55° do 60°C	zavarivanje tkiva
> 60° do 100°C	denaturacija proteina
više od 100°C	vrenje, isparavanje, eksplozija

*Tablica 3. Okvirni odnos temperatura - učinak laserske zrake  
Izvor: Iz različitih izvora sakupio autor*

#### d) Netoplinska mehanička destrukcija

Javlja se samo kod lasera vrlo velike snage. Laser koji razara tkivo je EXCI-MER LASER koji se sastoji iz plinovitog medija (npr. argonov fluoroid ili kriptonov fluoroid) koji djeluje pomoću električnog pražnjenja. Učinak koji se javlja je fotorazaranje tj. kidanje atoma udarima velikih doza energije. Emitirana laserska zraka izaziva ionizaciju stanica tkiva koje se odvoje od podloge (fotoablacija). Kod predloženog teorijskog modela LNS-a se taj učinak ne može pojaviti.

### 4.3. Djelovanje laserske zrake na ljudsko oko

Prosječno ljudsko oko vidi dvije točke koje se nalaze od oka pod kutom od jedne minute kao jednu točku. To odgovara duljini jasnog viđenja (25 cm) od 0,07 mm, dakle pomoću razmjernika ne može se izvršiti čitanje na karti točnije od 0,1

mm. Dužina u prirodi koja odgovara 0,1 mm na pomorskoj navigacijskoj karti je krajnja granica točnosti razmjera karte, iz čega proizlazi da npr. za standardnu navigacijsku kartu razmjera 1:100 000 ona iznosi  $\pm 10$  m.

U granicama fiziološke tolerancije ljudsko oko prima svjetlosne zrake bez oštećenja, dok zrake većeg intenziteta dovode do patoloških promjena (npr. nakon direktnog gledanja u sunčeve zrake mogu se stvoriti ožiljci na mrežnici).

Također apsorpcija laserskih zraka nije jednaka u svim strukturama oka. Rožnica, leća i staklovina apsorbiraju oko 5% energije, dok melanin u pigmentnom epitelu mrežnice apsorbira znatno više energije.

Zrake zelenog, zeleno-žutog, narančastog, crvenog i plavo-zelenog dijela spektra mogu izazvati fotokoagulaciju, no sve strukture oka nisu jednako osjetljive na boje raznih valnih duljina, a prema radovima nekih američkih autora, žuta zraka ima najveći učinak na krvnim žilama, narančasta na žilnici i mrežnici itd. Općenito, svjetlost djelovanjem na osjetljive ćelije mrežnice preko senzorskih centara moždanih hemisfera stimulira ili inhibira aktivnost kore velikog mozga, a time i čitav organizam.

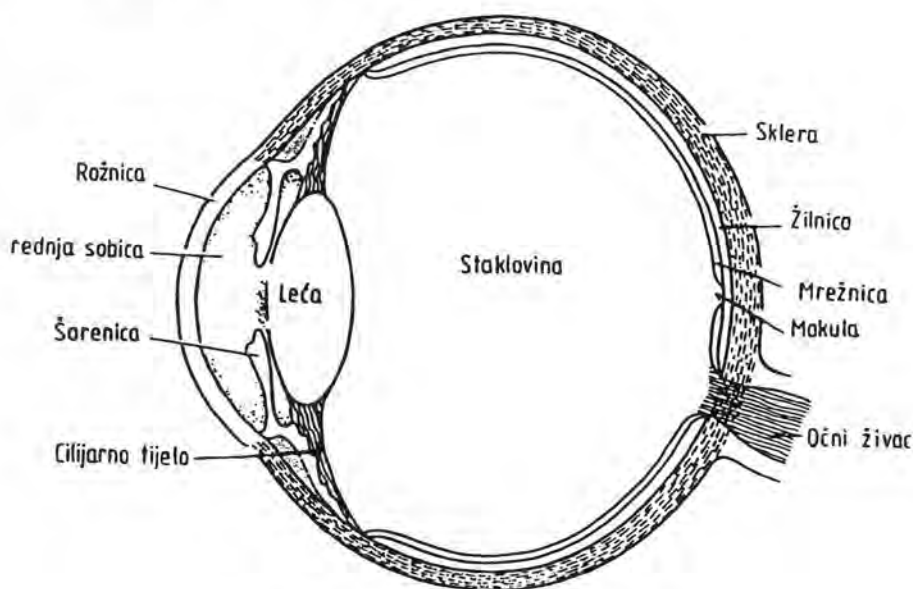
Oko je vrlo osjetljiv organ, ali postoji fiziološka granica njegovih mogućnosti. Oko je sposobno da registrira zrake valne duljine od približno 360 do 760 nm. Pod izuzetnim prilikama mogu se registrirati zrake valne duljine od 310 do 812 nm što sve ukupno čini otprilike trećinu Sunčeva spektra. Valne duljine iznad i ispod navedenog oko ne registrira. Baktericidno djelovanje imaju zrake valne duljine od 250 do 270 milimikrona. Valnu duljinu od 10,6  $\mu\text{m}$  oko ne može registrirati.

Oko razlikuje predmete na osnovi razlike u sjaju između predmeta i pozadine. Radi vizualne percepcije okoline potreban je umjeren sjaj od 2000 do 3000  $\text{cd}/\text{m}^2$ . Najvažnije fiziološke karakteristike oka su:

- Kontrastna osjetljivost oka što je sposobnost oka da razlikuje sjajnost graničnih površina. Ona ovisi od uvjeta osvjetljenja određenog detalja i sjajnosti na koje se oko prethodno prilagodilo. Maksimalna kontrastna osjetljivost postiže

se sjajnošću pozadine u granicama od 100 do 3200 cd/m<sup>2</sup>. Preko toga ona se snižava.

- Stabilnost jasnog vida predstavlja odnos duljine jasnog razlikovanja detalja od nejasnog u vremenskom trajanju od 1 minute. Povećanjem osvjetljenosti raste i stabilnost jasnog vida.
- Oštrina vida je sposobnost razlikovanja detalja koja zavisi od veličine detalja.
- Brzina vizualne percepcije je brzina razlikovanja osvijetljenih predmeta i detalja i raste s porastom osvjetljenosti.
- Sposobnost adaptacije - je prilagođavanje promjeni osvjetljenosti i sjajnosti predmeta. Puna adaptacija na sumrak iznosi 50 minuta, a na svjetlost iz mraka od 3 do 10 minuta. To su okvirne vrijednosti jer ovaj proces zavisi od osjetljivosti štapića i čepića u mrežnici.
- Akomodacija je jasno viđenje predmeta na različitim udaljenostima. Ona ovisi o osjetljivosti i stanju vida.



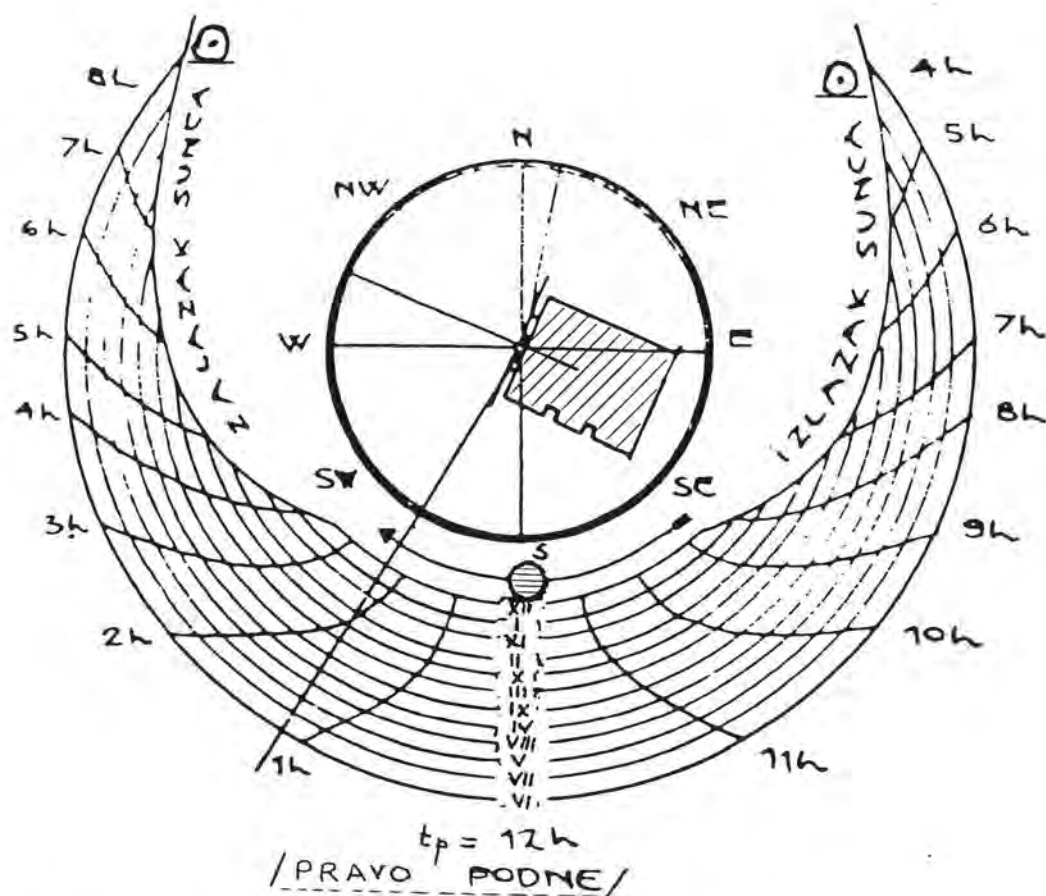
Slika 32. Presjek ljudskog oka

Kod predloženog teorijskog modela LNS-a laserski zraci prolaze kroz rožnicu, zjenicu, prednju sobicu, šarenicu, leću i staklovinu. Apsorpcija zraka kroz ove strukture je minimalna, dok je u pigmentnom epitelu mrežnice nešto veća.

Interesantna je komparacija djelovanja svjetlosne zrake žarulje snage 150 W i laserske zrake predloženog teorijskog modela LNS-a na ljudsko oko. Kod žarulje se oko 30 W snage pretvara u optičko svjetlo, a na udaljenosti od 1 metra od izvora svjetla u staklovinu oka stiže oko  $10 \mu\text{W}$  snage.

Kod predloženog teorijskog modela LNS-a, snage 40 W, na udaljenosti od 100 metara od laserskog svjetionika-predajnika gustoća snage laserskog isijavanja iznosi  $P_d \cong 23,9 \text{ mW/cm}^2$ . Površina prosječnog otvora oka iznosi približno  $0,1 \text{ cm}^2$ , što znači da u staklovinu oka stiže oko 2,4 mW snage, međutim zbog rotacije i modulacije laserskog snopa stvarna snaga je nekoliko desetaka puta manja. Stoga slijedi zaključak da laserska zraka već na udaljenosti od 100 metara od laserskog svjetionika ne utječe niti na jednu od prethodno navedenih fizioloških karakteristika oka.

Također je indikativna komparacija djelovanja sunčeve svjetlosti i laserske zrake predloženog teorijskog modela LNS-a na ljudsko tijelo.



Slika 33. Aproximacija obasjavanja sunca u raznim periodima dana i godine



Sunce obasjava ljudsko tijelo s gustoćom snage do  $150 \text{ mW/cm}^2$ .

Teorijskim proračunom isijavanja gustoće snage predloženog teorijskog modela LNS-a, laserski svjetionik-predajnik na raznim kontrolnim udaljenostima mogu se dobiti indikativni podaci na osnovu kojih se mogu donijeti odgovarajući zaključci.

Prostor po horizontu oko laserskog svjetionika-predajnika u smjeru emitiranja podijeljen je u šest kontrolnih grupa definiranih sljedećim intervalima horizontalnih udaljenosti;

a) INTERVAL  $l = 1 \text{ m do } 9 \text{ m}$

$$Pd = \frac{10}{(l^2 \cdot \sin \alpha_v / 2 \cdot \sin \frac{\alpha_H}{2} \cdot 10^4)} \text{-----} (69)$$

$$\alpha_v/2 = 0^\circ 08' 36'' \quad ; \quad \alpha_H/2 = 0^\circ 05' 44''$$

$$l = 1 \text{ m} \quad Pd = 421,0170486 \text{ W/cm}^2$$

$$l = 2 \text{ m} \quad Pd = 59,921515 \text{ W/cm}^2$$

$$l = 3 \text{ m} \quad Pd = 26,63178445 \text{ W/cm}^2$$

$$l = 4 \text{ m} \quad Pd = 14,98037875 \text{ W/cm}^2$$

$$l = 5 \text{ m} \quad Pd = 9,5874424 \text{ W/cm}^2$$

$$l = 6 \text{ m} \quad Pd = 6,65794611 \text{ W/cm}^2$$

$$l = 7 \text{ m} \quad Pd = 4,891552245 \text{ W/cm}^2$$

$$l = 8 \text{ m} \quad Pd = 3,745094688 \text{ W/cm}^2$$

$$l = 9 \text{ m} \quad Pd = 2,959087161 \text{ W/cm}^2$$

b) INTERVAL  $l = 10 \text{ m do } 90 \text{ m}$

$$Pd = \frac{10}{(l^2 \cdot \sin \frac{\alpha_v}{2} \cdot \sin \frac{\alpha_H}{2} \cdot 10^4)} \text{-----} (70)$$

$l = 10 \text{ m}$	$P_d =$	$2,3968606 \text{ W/cm}^2$
$l = 20 \text{ m}$	$P_d =$	$599,21515 \text{ mW/cm}^2$
$l = 30 \text{ m}$	$P_d =$	$266,3178445 \text{ mW/cm}^2$
$l = 40 \text{ m}$	$P_d =$	$149,8037875 \text{ mW/cm}^2$
$l = 50 \text{ m}$	$P_d =$	$95,874424 \text{ mW/cm}^2$
$l = 60 \text{ m}$	$P_d =$	$66,5794611 \text{ mW/cm}^2$
$l = 70 \text{ m}$	$P_d =$	$48,91552245 \text{ mW/cm}^2$
$l = 80 \text{ m}$	$P_d =$	$37,45094688 \text{ mW/cm}^2$
$l = 90 \text{ m}$	$P_d =$	$29,59087161 \text{ mW/cm}^2$

c) INTERVAL  $l = 100\text{m}$  do  $190 \text{ m}$

$$P_d = \frac{P}{(4 \cdot l^2 \cdot \sin \frac{\alpha_v}{2} \cdot \sin \frac{\alpha_H}{2} \cdot 10^4)} \text{-----(71)}$$

$l = 100 \text{ m}$	$P = 39,88 \text{ W}$	$P_d =$	$23,89670018 \text{ mW/cm}^2$
$l = 110 \text{ m}$	$P = 39,868 \text{ W}$	$P_d =$	$19,74339636 \text{ mW/cm}^2$
$l = 120 \text{ m}$	$P = 39,856 \text{ W}$	$P_d =$	$16,58494376 \text{ mW/cm}^2$
$l = 130 \text{ m}$	$P = 39,844 \text{ W}$	$P_d =$	$14,12729493 \text{ mW/cm}^2$
$l = 140 \text{ m}$	$P = 39,823 \text{ W}$	$P_d =$	$12,17751931 \text{ mW/cm}^2$
$l = 150 \text{ m}$	$P = 39,82 \text{ W}$	$P_d =$	$10,60477657 \text{ mW/cm}^2$
$l = 160 \text{ m}$	$P = 39,808 \text{ W}$	$P_d =$	$9,317795583 \text{ mW/cm}^2$
$l = 170 \text{ m}$	$P = 39,796 \text{ W}$	$P_d =$	$8,251337754 \text{ mW/cm}^2$
$l = 180 \text{ m}$	$P = 39,784 \text{ W}$	$P_d =$	$7,357770225 \text{ mW/cm}^2$
$l = 190 \text{ m}$	$P = 39,772 \text{ W}$	$P_d =$	$6,60165788 \text{ mW/cm}^2$

d) INTERVAL  $l = 200 \text{ m}$  do  $900 \text{ m}$

$$Pd = \frac{P}{(4 \cdot l^2 \cdot \sin \frac{\alpha_V}{2} \cdot \sin \frac{\alpha_H}{2} \cdot 10^4)} \text{-----(72)}$$

$l = 200 \text{ m}$ , $P = 39,76 \text{ W}$ ;	$Pd = 5,956198591 \text{ mW/cm}^2$
$l = 300 \text{ m}$ , $P = 39,64 \text{ W}$ ;	$Pd = 2,639209839 \text{ mW/cm}^2$
$l = 350 \text{ m}$ , $P = 39,58 \text{ W}$ ;	$Pd = 1,936076379 \text{ mW/cm}^2$
$l = 400 \text{ m}$ , $P = 39,52 \text{ W}$ ;	$Pd = 1,480061421 \text{ mW/cm}^2$
$l = 500 \text{ m}$ , $P = 39,40 \text{ W}$ ;	$Pd = 0,9443630764 \text{ mW/cm}^2$
$l = 600 \text{ m}$ , $P = 39,28 \text{ W}$ ;	$Pd = 0,6538103081 \text{ mW/cm}^2$
$l = 700 \text{ m}$ , $P = 39,16 \text{ W}$ ;	$Pd = 0,4788829648 \text{ mW/cm}^2$
$l = 800 \text{ m}$ , $P = 39,04 \text{ W}$ ;	$Pd = 0,3655212415 \text{ mW/cm}^2$
$l = 900 \text{ m}$ , $P = 38,92 \text{ W}$ ;	$Pd = 0,2879191807 \text{ mW/cm}^2$

e) INTERVAL  $l = 1000 \text{ m}$  do  $3000 \text{ m}$

$$Pd = \frac{P}{(4 \cdot l^2 \cdot \sin \frac{\alpha_V}{2} \cdot \sin \frac{\alpha_H}{2} \cdot 10^4)} \text{-----(73)}$$

$l = 1000 \text{ m}$ , $P = 38,8 \text{ W}$ ;	$Pd = 0,2324954782 \text{ mW/cm}^2$
$l = 2000 \text{ m}$ , $P = 37,6 \text{ W}$ ;	$Pd = 0,0563262241 \text{ mW/cm}^2$
$l = 3000 \text{ m}$ , $P = 36,4 \text{ W}$ ;	$Pd = 0,02423492385 \text{ mW/cm}^2$

f) INTERVAL  $l = 6000 \text{ m}$  do  $30\,000 \text{ m}$

$$Pd = \frac{P}{(4 \cdot l^2 \cdot \sin \frac{\alpha_v}{2} \cdot \sin \frac{\alpha_H}{2} \cdot 10^4)} \quad \text{-----} \quad (74)$$

$l = 6000\text{m}, P = 32,8 \text{ W} ;$	$Pd = 5,459515811 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
$l = 9000\text{m}, P = 29,2 \text{ W} ;$	$Pd = 2,160133627 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
$l = 12000\text{m}, P = 25,6 \text{ W} ;$	$Pd = 1,065271378 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
$l = 15000\text{m}, P = 22,0 \text{ W} ;$	$Pd = 0,5858992578 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
$l = 18000\text{m}, P = 18,4 \text{ W} ;$	$Pd = 0,3402950235 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
$l = 21000\text{m}, P = 14,8 \text{ W} ;$	$Pd = 0,2010971479 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
$l = 24000\text{m}, P = 11,2 \text{ W} ;$	$Pd = 0,1165140569 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
$l = 27000\text{m}, P = 7,6 \text{ W} ;$	$Pd = 0,06246961783 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
$l = 30000\text{m}, P = 4,0 \text{ W} ;$	$Pd = 0,02663178445 \mu\text{W}/\text{cm}^2$

U teorijskom proračunu uporabljen je model linearnog prosječnog opadanja snage laserskog signala. Također u ovim teorijskim proračunima nije uzeta u obzir modulacija i kutna rotacija laserske zrake što rezultira time da je stvarna srednja snaga nekoliko puta manja.

Na osnovu svega što je dosad predloženo može se konstatirati sljedeće:

- opasna zona..... < 150 m od laserskog svjetionika
- granična udaljenost..... ~ 150 m od laserskog svjetionika
- sigurna udaljenost..... > 200 m od laserskog svjetionika
- apsolutno bezopasna udaljenost..... > 500 m od laserskog svjetionika

Dakle laserski svjetionik-predajnik treba biti tako postavljen da ljudski organizam ne može doći u područje njegova zračenja na udaljenosti manjoj od 200 metara.

ra. Ako se uzme u obzir kutna rotacija i modulacija laserske zrake onda je sigurna udaljenost iznad 100 metara.

#### 4.4. Utjecaj laserskih isijavanja

U točno doziranim iznosima UHF energija daje korisne efekte kao npr. dijatermija (terapijska metoda zagrijavanja tkiva ispod kože), mikrovalna pećnica, zagrijavanje materijala pri termičkoj obradi i slično.

Neprekidno izlaganje organizma mikrovalnoj radijaciji može podići temperaturu tijela ili zagrijati samo određene dijelove organizma. Porast temperature tijela od  $1^{\circ}\text{C}$  je opasan, a dugotrajnije zagrijavanje mikrovalnom radijacijom može biti pogubno. Ako osoba osijeća nelagodu znak je da je tijelo izloženo radijaciji.

Dokazano je da tijelo apsorbira oko 50% emitirane energije na frekvencijama ispod 400 MHz i iznad 3000 MHz. Između 1000 MHz i 3000MHz tijelo može apsorbirati svu energiju. Kod predloženog teorijskog modela LNS-a apsorpcija laserskog isijavanja u ljudsko tijelo na sigurnoj udaljenosti od laserskog svjetionika je unutar dozvoljenih granica.

Eksperimentalno je ustanovljeno da je maksimalna dozvoljena gustoća emitirane snage  $10 \text{ mW/cm}^2$ . Povremena isijavanja većih gustoća snage ljudski organizam će podnijeti bez ozbiljnih oštećenja. Trajna isijavanja gustoće snage manje od  $1 \text{ mW/cm}^2$  u organizmu ne stvaraju nikakve promjene, dakle isijavanje laserske zrake predloženog teorijskog modela LNS-a na udaljenostima većim od 500 m od laserskog svjetionika je potpuno bezopasna za ljudski organizam, odnosno većim od 100 m, ako se uzme u obzir kutna rotacija i modulacija laserske zrake.

## 5. ZAKLJUČAK

- 5.1. Pomorsku površinsku navigaciju druge polovice XX stoljeća karakterizira intenzivan razvoj sofisticiranih navigacijskih sustava i kvalitativno usavršavanje autonomnih navigacijskih sredstava u skladu s razvojem znanosti, tehnike i potreba suvremenog plovljenja na moru.
- 5.2. Najviši domet u navigacijskim znanostima postignut je u području elektronske navigacije. Sredstva i metode elektronske navigacije potvrdila su svoju neprocijenjivu vrijednost u miru i ratu, a njihov daljnji trend razvoja usmjeren je k povećanju točnosti i pouzdanosti pozicioniranja, kompleksnijem i potpunijem prekrivanju svjetskih mora i oceana alternativnim sustavima, uvođenju u rad novih sustava posebno specijalne namjene i povećanju stupnja automatizacije u plovidbi brada čime "pomorski plovidbeni poduhvat" s visokim rizicima postaje "klasični rutinski prijevoz" s znatno nižim stupnjem rizika.
- 5.3. Pri tom je sve izraženija pojava specijalnih navigacijskih sustava malog dometa za vođenje obalne tj. terestričke navigacije čiji je osnovni nedostatak nemogućnost univerzalne primjene tj. nemogućnost standardizacije tih sustava jer rade na različitim frekvencijama, koriste različitu opremu, metode, sredstva itd.
- 5.4. Model "laserske navigacije" predložen u ovom radu karakterizira upravo mogućnost standardizacije i mogućnost univerzalne primjene na svim morima svijeta.
- 5.5. Klasični pomorski svjetionik ostaje i dalje čvrsta osnova za vođenje klasične terestričke navigacije. Predloženi "laserski svjetionik" postaje ishodište za

vođenje "laserske navigacije" čime dobiva znatno sofisticiraniju i kvalitetniju ulogu i mjesto u sklopu terestričke navigacije. Također omogućuje značajno podizanje nivoa sigurnosti u pomorskoj obalnoj plovidbi.

- 5.6. Točne koordinate pozicije plovnog objekta na moru ne mogu se odrediti niti jednom metodom niti jednim postojećim navigacijskim sustavom, ali stalna potreba za pronalaženjem boljeg, uspješnijeg i preciznijeg načina pozicioniranja je ogromna pokretačka snaga koja pridonosi napretku pomorske površinske navigacije. Osnovni cilj je formirati autonomni navigacijski sustav koji će biti što točniji i pouzdaniji, a pozicija broda što češća.
- 5.7. Laseri pružaju dosada možda najrevolucionarnije mogućnosti primjene svjetlosne energije u pomorskoj obalnoj tj. terestričkoj navigaciji za potrebe pozicioniranja plovnog objekta u pomorskom prometu. Od raznoraznih vrsta potrebno je odabrati odgovarajući laser koji će udovoljiti kompleksnim zahtjevima pozicioniranja u terestričkoj navigaciji. Laseri na bazi čvrstih tijela nisu pogodni za uporabu u svrhe pozicioniranja u obalnoj navigaciji jer zahtijevaju veće impulsne snage, rade na nepovoljnim valnim duljinama i imaju malu termičku stabilnost u odnosu na temperaturu okolnog ambijenta. Laseri na bazi tekućina također nisu pogodni za uporabu zbog toksičnosti neorganskih spojeva, vremenske nestabilnosti otopine i relativno velike vrijednosti termooptičkog koeficijenta tako da divergencija laserske zrake iznosi čak nekoliko stupnjeva što je nepovoljno. Zbog raznoraznih razloga atipični laseri (laseri na F centrima, laseri na bazi slobodnih elektrona, excimer laseri, ...) također nisu pogodni za uporabu u pomorskoj površinskoj navigaciji.
- 5.8. Za uporabu u terestričkoj navigaciji u ovom radu naznačena je primjenjivost plinskog lasera i to molekularnog lasera na bazi CO<sub>2</sub> zbog sljedećih osnovnih razloga:
  - rade na valnoj duljini od 10,6 μm, a meteorološki uvjeti u atmosferi koji dozvoljavaju rad na toj valnoj duljini su vrlo česti. Najveći problem "laserske navigacije" predstavlja gušenje laserske zrake zbog meteoro-

loških uvjeta atmosfere, pa istraživanja trebaju biti usmjerena upravo na iznalaženje valnih duljina sa što manjim gušenjem. U ovom radu je za potrebe vođenja "laserske navigacije" naznačena primjenjivost valne duljine od  $10,6 \mu\text{m}$ ,

- pri valnoj duljini od  $10,6 \mu\text{m}$  apsorpcija laserske energije u vodu i hemoglobin je relativno niska,
- valnu duljinu od  $10,6 \mu\text{m}$  ljudsko oko ne može registrirati, pa laserska zraka ne ometa okolinu ni ostale vrste prometa (zračni, kopneni, ...),
- laserska snaga koja se ostvaruje proporcionalna je volumenu plina,
- za ovu vrstu lasera nije potreban glomazan izvor napajanja .

5.9. Odabirom odgovarajućeg lasera i odgovarajuće valne duljine laserske zrake u navigacijsku znanost se može uvesti pojam "laserska navigacija" što se može definirati kao proces vođenja broda odnosno plovnog objekta pomoću laserskih zraka na udaljenostima do 20 M od obale. Za potrebe "laserske navigacije" predložen je teorijski model laserskog navigacijskog sustava (LNS) čije su osnovne komponente:

- laserski svjetionik-predajnik
- laserski prijamnik plovnog objekta

5.10. Za uspostavljanje modela LNS-a valja definirati sljedeće osnovne parametre:

- maksimalni radni domet sustava,
- minimalnu površinu pravokutnog presjeka laserskog snopa na nominalnom radnom dometu sustava,
- divergenciju laserske zrake u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini ( $\alpha_H$ ,  $\alpha_V$ ),
- kontinuiranu izlaznu snagu lasera, što s unaprijed definiranom površinom poprečnog presjeka laserskog snopa određuje gustoću snage na raznim dometima LNS-a,
- minimalnu površinu kolektora laserskog prijamnika plovnog objekta,



- kutni opseg, tj. kružni sektor i kutnu brzinu rotacije laserskog predajnika u horizontalnoj ravnini,
- mod rada i optičku modulaciju laserske zrake,
- kutnu brzinu rotacije detektorskog sustava prijarnika plovnog objekta u horizontalnoj ravnini, te broj i raspored prijarnika,
- tehničke karakteristike prijarnika (IR detektora),
- navigacijsko-geometrijske karakteristike i način rada laserskog svjetionika,
- optimalnu mrežu površinskog rasporeda laserskih svjetionika na određenom geografskom području.

- 5.11. Predloženim modelom LNS-a postigla bi se frekvencija pozicioniranja svakih 90 sekundi, odnosno u drugoj varijanti ugradnjom detektora u kuglu germanija koji bi služio kao sabirna leća postigla bi se frekvencija pozicioniranja svaku jednu sekundu. Za sada je jedini problem dužina života odgovarajućeg CO<sub>2</sub> lasera koja danas iznosi oko 4000 sati, ali već postoje laboratorijski CO<sub>2</sub> laseri kojima je dužina života i do 10 godina.
- 5.12. Pozicioniranje pomoću predloženog teorijskog modela LNS-a valja osloboditi utjecaja fizikalnih pojava koje mijenjaju koordinate fiksnih Zemaljskih pozicija kao što je pojava periodičnog i sekularnog pomicanja Zemaljskih polova, jer se "laserska navigacija" bazira upravo na što točnijim koordinatama laserskih svjetionika-predajnika, koji moraju biti postavljeni isključivo na fiksnim (nepokretnim) točkama na površini Zemlje i što točnijim kutevima  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ .
- 5.13. Za pozicioniranje pomoću predloženog teorijskog modela laserskog navigacijskog sustava u radu je razrađena "kutna metoda".
- 5.14. "Kutnom metodom" i uporabom analitičke geometrije prostora moguće je odrediti koordinate pozicije plovnog objekta pomoću najmanje dva laserska svjetionika. Pri tom programom brodskog mikroprocesora treba biti određeno osrednjavanje izračunatih koordinata pozicije plovnog objekta u odnosu na unaprijed definiranu točnost pozicioniranja tj. u odnosu na unaprijed definira-

nu vrijednost radijusa kružnice jednake vjerojatnosti čime se ostvaruje odgovarajuća vjerojatnost pozicioniranja.

- 5.15. Preporuča se uspostava jedinstvenog kompjuterskog sustava nadzora i upravljanja svim laserskim svjetionicima na određenom geografskom području uspostavljanjem jednog centra i odgovarajućeg broja podcentara. Centar treba s podcentrima biti povezan kompjuterskom mrežom. Funkcija centra je da nadzire rad čitavog sustava laserskih svjetionika, a iz podcentara bi se trebalo daljinski upravljati svim laserskim svjetionicima na području koje taj podcentar pokriva.
- 5.16. Za kontrolu ispravnog rada laserskih svjetionika preporuča se uspostaviti nekoliko fiksnih prijamnika s poznatom pozicijom (određenom točnim geodetskim metodama), koji bi kontinuirano primali signale iz laserskih svjetionika, izračunavali koordinate svoje pozicije te uspoređivali izračunatu sa stvarnom pozicijom. U slučaju bilo kakve pogreške ili odstupanja koja su izvan dozvoljenih granica odmah bi alarmirali centar i podcentar. Na taj način bi se ispravnost rada predloženog modela LNS-a neprekidno automatski kontrolirala.
- 5.17. Za teorijsku obradu točnosti pozicioniranja pomoću predloženog modela LNS-a može se primijeniti modificirani kriterij PDOP tj. modificirani kriterij položajnog raslojavanja određenosti koji odgovara tragu kovarijacione matrice za određivanje koordinata pozicije plovnog objekta.
- 5.18. Bilo bi moguće izdati obalne navigacijske karte područja s ugrađenim laserskim svjetionicima koje bi se mogle postaviti na "plotter" (spojen s LNS-om), koji bi crtao tj. označavao putanju broda ili plovnog objekta, tako da bi svaki put kada bi elektronski dio sustava LNS-a izračunao koordinate pozicije broda, označio točku na karti. Dobiveni niz točaka u određenom vremenskom intervalu predstavljao bi kurs broda, što bi npr. u slučaju sudara, nasukavanja itd., moglo poslužiti kao sudska dokumentacija. Navedeno bi se moglo izvesti i na elektronskim navigacijskim kartama. Razrada ovog dijela moguće aplikacije modela LNS-a je izvan obujma ovog rada i taj dio bi trebalo posebno analizirati i razraditi.

- 5.19. Pri praktičnoj uporabi predloženog teorijskog modela LNS-a postoje potencijalne opasnosti za osoblje i okolinu o kojima valja voditi računa. Rizici mogu biti električni, oštećenje očiju, kože (tkiva), mogućnost mikrobiološke kontaminacije te opasnost od požara. Kod predloženog teorijskog modela LNS-a zbog relativno male gustoće snage laserske zrake opasnost od požara na udaljenosti od 200 m od laserskog svjetionika je nemoguća.
- 5.20. Kod uporabe predloženog modela LNS-a na tkivu se mogu pojaviti sljedeći učinci:
- na udaljenosti do 1 m od laserskog predajnika termički efekt odnosno fotokoagulacija i fotoevaporizacija tkiva,
  - na udaljenosti do 10m od laserskog predajnika fotokemijski efekt odnosno biostimulacija tkiva.

Na osnovu iznijetog zone opasnosti za ljudsko tkivo su u rasponu udaljenosti od laserskog predajnika do 10 metara, što znači da u tom rasponu udaljenosti ljudsko tkivo ne smije doći u dodir s laserskom zrakom.

- 5.21. Ljudsko oko je najosjetljivije na djelovanje laserske zrake. Na osnovu teorijskog proračuna isijavanja gustoće snage predloženog modela LNS-a, ne uzevši u obzir kutnu rotaciju i modulaciju laserske zrake proizlazi sljedeće:
- granična udaljenost . . . . . iznad 150 m od laserskog svjetionika
  - sigurna udaljenost . . . . . iznad 200 m od laserskog svjetionika
  - apsolutno bezopasna udaljenost . . . iznad 500 m od laserskog svjetionika

Ako se uzme u obzir modulacija i kutna rotacija laserske zrake, stvarna srednja gustoća snage laserske zrake je znatno manja i u tom slučaju sigurna udaljenost za ljudsko oko je već na 100 metara od laserskog svjetionika.

- 5.22. Ekonomska problematika tj. troškovnik izgradnje i uspostavljanja predloženog modela LNS-a u ovom radu nije analizirana iz razloga što je čitav problem

uvodnja "laserske navigacije" u terestričku navigaciju razrađivan samo na teorijskim osnovama.

- 5.23. Maksimalni domet predloženog teorijskog modela LNS-a determiniraju dva elementa:
- depresija horizonta, odnosno zakrivljenost zemaljske površine i
  - gustoća snage laserskog snopa.
- 5.24. Projektiranje predloženog modela LNS-a je izuzetno složen i kompliciran proces, sastavljen iz više faza koje su iterativno povezane i isprepletene u vremenu, a zahtijeva interdisciplinarni stručni rad.
- 5.25. U ovoj doktorskoj disertaciji istraženi su samo oni elementi koji osiguravaju bezopasnu uporabu predloženog modela LNS-a i koji su od značaja za proces pozicioniranja tj. određivanja koordinata pozicije plovnog objekta u obalnoj navigaciji bez detaljnih konstrukcijskih pojedinosti, odnosno predložen je teorijski model LNS-a s posebnim osvrtom samo na najvažnija pitanja problematike unapređenja terestričke navigacije u okviru znanstvenog područja tehnologije prometa, znanstvene discipline navigacija u pomorskom prometu.

## ŽIVOTOPIS

Rođen sam 24. siječnja 1957. godine u Rijeci. Državljanin sam Republike Hrvatske. Nakon završenog osnovnog obrazovanja maturirao sam na TŠC - Tehnička škola Rijeka i stekao zvanje tehničara brodstrojarske struke. Potom sam godinu dana radio u tvornici motora i traktora "Torpedo" Rijeka na poslovima tehničke kontrole pri proizvodnji kućišta motora s unutarnjim izgaranjem na radnom mjestu preuzimnog kontrolora. Godine 1978. diplomirao sam na VPŠ - Rijeka nautički odjel i stekao zvanje inženjera pomorskog prometa. Od 05. 01. 1979. godine do 05. 01. 1980. godine odslužio sam vojni rok dijelom u Puli, a dijelom u Splitu u ratnoj mornarici. Godine 1980. zaposlio sam se u poduzeću "Jugolinija" ("Croatia Line") u svojstvu kadeta. Istekom pripravničkog kadetskog staža pri Lučkoj kapetaniji Rijeka položio sam stručni ispit i stekao zvanje poručnika trgovačke mornarice i zvanje pomorskog radio-telefoniste s općom ovlasti. Nakon propisanog plovidbenog staža u svojstvu časnika palube pri LK Rijeka položio sam stručni ispit i stekao zvanje kapetan duge plovidbe. Posjedujem 13 specijalističkih pomorskih ovlaštenja u skladu sa STCW Konvencijom (ARPA, RO, Firefighting cert., Search and Rescue cert., Handling life saving appl. cert., Tanker Safety cert., Crude oil wash. cert., Inert gas cert., Chemical tankers cert., LNG cert., LPG cert., First aid, GMDSS cert.) izdano od strane LK Rijeka i Pomorski fakultet - Rijeka. Također sam položio 1989. godine poseban stručni ispit za obavljanje poslova vanjskotrgovinskog prometa pri Privrednoj Komori Republike Hrvatske u Zagrebu.

Tijekom ukrcaja na brodovima trgovačke mornarice (sedam godina plovidbenog staža) obavljao sam poslove i radne zadatke III, II i I časnika palube na brodovima raznih tipova i namjena u kategoriji duge plovidbe.

Na taj način stekao sam praktično iskustvo u vođenju astronomske i terestričke navigacije, u krcanju i slaganju tereta, rukovanju klasičnim (konvencionalnim) tehnologijama kao i u radu s novim tehnologijama pomorskog prijevoza (kontejneri, RO/RO), u rukovanju i prijevozu određenih opasnih tereta (prijevoz nuklearnog goriva, prijevoz streljiva i eksploziva, upaljivih materija, zaraznih, korozivnih, toksičnih tvari). Pored toga stekao sam i određeno praktično iskustvo u:

manevriranju brodom (kako klasičnom uz pomoć tegljača tako i brodovima opremljenim pramčanim porivnikom i pitch propelerom), rukovanju raznim tipovima uređaja za satelitsku i hiperboličnu navigaciju (INS "Racal-Decca 2000"), Loran C, Omega, Transit, Decca, ...), radu s faksimilom (meteorološke karte), rukovanju raznim vrstama radara s pravim i relativnim pokazivanjem (Kelvin Hughes, Raytheon, Krupp-Atlas, Decca, ...), dubinomjerima (Simrad, ...), brzinomjerima (Sperry, ...), dakle ukratko u svim poslovima vezanim za obavljanje procesa navigacije u pomorskom prometu (nautička grupa poslova).

Sudjelovao sam u preuzimanju brodova novogradnji (nadzor nad gradnjom broda u brodogradilištu) i odvođenju broda u rezalište (priprema i nasukanje broda).

Godine 1986. diplomirao sam na nautičkom odjelu Fakulteta za pomorstvo i saobraćaj u Rijeci i stekao stručni naziv diplomirani inženjer za pomorski promet. Tijekom četverogodišnjeg studija ostvario sam srednju ocjenu 4,1. Aktivno se služim engleskim i talijanskim jezikom.

Dana 01. 02. 1989. godine primljen sam u stalni radni odnos na Fakultetu za pomorstvo i saobraćaj u Rijeci u svojstvu asistenta tehničke znanstvene oblasti, znanstvenog područja tehnologije prometa za znanstvenu disciplinu navigacija u pomorskom prometu.

Na Fakultetu za pomorstvo i saobraćaj u Rijeci završio sam program postdiplomskog studija "Multimed. alni transport" u trajanju od četiri semestra (srednja ocjena 4,2) i obranio sam 05. veljače 1992. godine magistarski rad pod naslovom "Prilog rješavanju problematike morske kontejnerske transportne tehnologije". Dana 30. ožujka 1992. godine na FPS u Rijeci izabran sam u znanstvenoistraživačko zvanje znanstvenog asistenta tehničke znanstvene oblasti, znanstvenog područja tehnologije prometa za znanstvenu disciplinu "Navigacija u pomorskom prometu". U okviru toga na Nautičkom odjelu izvodim vježbe iz predmeta Astronomska navigacija I i II, Rukovanje i prijevoz tereta te Terestrička navigacija II. Kao nastavnik sudjelujem u izvođenju nastave na specijalističkim tečajevima ARPA i RO, Sigurnost na tankerima za prijevoz kemikalija, Traganje, spašavanje i opstanak na moru te Rukovanje sredstvima za spašavanje. Povremeno sam angažiran pri Lučkoj kapetaniji Rijeka kao ispitivač kod polaganja stručnih ispita za ovlasti: Rukovanje sredstvima za spašavanje, Traganje, spašavanje i opstanak na moru, LPG, LNG, Kemijski tankeri, Kapetan duge plovidbe (Navigacija).

Dana 01. travnja 1993. godine na Pomorskom fakultetu u Rijeci izabran sam u nastavno zvanje predavača znanstvenog područja tehnologije prometa za znanstvenu disciplinu "navigacija u pomorskom prometu". U okviru toga na nautičkom odjelu izvodim predavanja iz predmeta "Terestrička navigacija I".

Koautor sam izvornog znanstvenog rada "Progon plovnog objekta zbog kaznenog djela - kriminalistički, pravni i navigacijsko-tehnologijski aspekti" kojim su postavljene osnove navigacijske kriminalistike u Republici Hrvatskoj.

---

**LITERATURA**

1. Adler, C. F.: Modern Geometry, New York, McGraw Hill, 1958.
2. Appleyard, F. i (dr.): Marine Electronic Navigation, London, Routledge & Kegan Paul, 1970.
3. Artin, E.: Geometric Algebra, New York, Interscience Publishers, 1964.
4. Asher, P. W.: Newest ultrastructural findings after use of a CO<sub>2</sub> laser on CNS tissue, Wien, Acta Neurochir. suppl. 28:572-581, 1979.
5. Asher, P. W. i (dr.): Microscopic and Endoscopies surgery with the CO<sub>2</sub> laser, Wrightm Bristol, 298 - 314, 1982.
6. Ashjaee, J.: Precision survey with Astech XII, the all in one, all in view, Suneyvale, Astech Inc., 1990.
7. Barton, D. K.: Low Angle Radar Tracking, proc. IEEE, vol. 62., 1974.
8. Barton, D. K.: Radar system Analysis, Dedham Mass., Artech House, 1976.
9. Beck, G. E.: Navigation Systems, London, Van Nostrand Reinhold, 1971.
10. Benković, F. i (dr.): Terestrička i elektronska navigacija, Split, Hidrografski institut ratne mornarice, 1986.
11. Bilajbegović, A. i (dr.): Osnovni geodetski radovi - suvremene metode GPS, Zagreb, Tehnička knjiga, 1991.



12. Borčić, B.: Matematičkakartografija (kartografskeprojekcije), Zagreb, Tehnička knjiga, 1955.
13. Bowditch, N.: American Practical Navigator, Washington, Defense Mapping Agency, Hydrographic Center, vol. I, 1984.
14. Braff, R. i (dr.): Radionavigation system integrity and Reliability, proc. of the IEEE, vol. 71., No 10, 1983.
15. Broksmejer, Č. F.: Sistemi inercijalnoj navigaciji, Moskva, Sudostrojemije, 1967.
16. Burke, L. P. i (dr.): Thermal effects of the CO<sub>2</sub> and NdYag laser on the CNS, Laser Med. surg. 5: 67-71, 1985.
17. Cotter, H. C.: Coastal Navigator, London, Hollis & Carter, 1964.
18. Cruickshank, J. M. i (dr.): Field Measurements with a Coherent Transversely Excited Atmospheric CO<sub>2</sub> laser radar, SPIE, vol. 415, 1983.
19. Davis, R.K., Simpson G.T.: Safety with the carbon dioxide laser, Otolaryngologic clinics of the North America, 16: 801-814, 1983.
20. Decker, B. L.: World geodetic System 1984, Austin-Texas, proc. of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, vol. I, str. 69-88, 1986.
21. Dutton, B.: Navigation and nautical Astronomy, Annapolis-Maryland, United States Naval Institute, 1957.
22. Eichler, J., Lenz, J.: Laser applications in medicine and biology, A bibliography, Appl. optics 16:27, 1977.
23. Fell, P. J.: Geodetic Positioning using a Global Positioning system of satellites, Ohio State University, Department of Geodetic Science, 1980.
24. Ford, I. E.: The Infrastructure Requirements for a Marine Information Management System, Fredericton, New

- 
- Brunswick, University of New Brunswick, technical report No 150, str. 81 - 108, 1990.
25. Frank, R. L.: Current Developments in Loran-C, proc. of the IEEE, vol. 71, No 10, 1983.
26. Freed, C.: Ultrastable CO<sub>2</sub> Lasers, The Lincoln Laboratory Journal, vol. 3, No 3, str. 479-499, Fall, 1990.
27. Gabor, D.: Laser Speckle and its Elimination, IBM Journal Research and Development, str. 509-514, 1970.
28. Gnedenko, B. V.: The Theory of Probability, Moscow, Mir Publishers, 1988.
29. Goad, C. C.: Precise relative position determination using Global Positioning System carrier phase measurement in a nondifference mode, Rockville-Maryland, proc. of the First International Symposium on Precise Positioning with the GPS, vol. I, str. 347 - 356, 1985.
30. Goldman, L.,  
Rockvell, R. J.: Lasers in medicine, New York-London-Paris, Gordon & Breach, 1971.
31. Goldstein, I. i (dr.): Heterodyne Measurements of Light Propagation Through Atmospheric Turbulence, proc. IEEE, vol. 53, str. 1172 -1180, 1965.
32. Groten, E. R., Straub, R.: GPS - Techniques Applied to Geodesy and Surveying, Darmstadt, proc. of the International GPS - Workshop, 1988.
33. Hall, W. M.: General Radar Equation, Raytheon Report, 1989.
34. Hammerschmidt, U.: Loran - C, Hansa 113, Jahrgang, No 9, 1976.
35. Harvey, J. H.: Communications Electronics, New York, vol. 54, No 21, 1981.

- 
36. Heiferman, K. S. i (dr.): Dural welding with CO<sub>2</sub> laser, *Lasers in surg. med.* 6 : 207, abstr. 135, 1986.
37. Hillenkamp, F.: Interaction between laser radiation and biological systems, New York, Plenum Press, str. 37-68, 1980.
38. Householder, A. S.: The Theory of Matrices in Numerical Analysis, New York, Blaisdell Publishing Co., 1953.
39. Institute of Navigation: Global Positioning System, Papers published in Navigation, The Institute of Navigation, Washington, volume III, 1986.
- 40 Ivanović, G.,  
Stanivuković, D.: Pouzdanost tehničkih sistema, Beograd, Mašinski fakultet, 1983.
41. Jakobović, Z.: Leksikon mjernih jedinica, Zagreb, Školska knjiga, 1988.
42. Jelalian, A. V.: Laser Radar Systems, Boston-London, Artech House, 1992.
43. Kachelmyer, A. L. i (dr.): Effect of Atmospheric Distortion of Carbon Dioxide Laser Radar Waveforms, SPIE, vol. 783, 1987.
44. King, R.W. i (dr.): Surveying with GPS, Bonn, Ferd. Dümmler Verlag, 1987.
45. Klepczynski, W. J.: Modern Navigatin Systems and their Relation to Timekeeping, proc. of the IEEE, vol. 71, No 10, 1983.
46. Konjević, N.: Uvod u kvantnu elektroniku, Beograd, Naučna knjiga, 1981.
47. Krakiwsky, E. J. i (dr.): GPS orbit improvement and precise positioning, Rockville-Maryland, proc. of the First International symposium on Precise Positioning with the GPS, vol. I, str. 73 -86, 1985.

- 
48. Krasavcev, B. I.: Morehodnaja astronomija, Moskva, Transport, 1978.
49. Kurepa, S.: Uvod u linearnu algebru, Zagreb, Školska knjiga, 1990.
50. Lawrence, R. S. i (dr.): Measurements of Atmospheric Turbulence Relevant to Optical Propagation, Journal of the Optical Society of America, vol. 66, str 826-830, 1970.
51. L'Esperance, F.A. Jr.: The effects of laser radiation on the retinal vasculature, Arch. Ophthalmol. 74 : 752 -759, 1965.
52. Lipschutz, M. M.: Differential Geometry, New York, McGraw Hill Book Co., 1969.
53. Maitland, A., Dunn, H. M.: Laser Physics, Amsterdam-London, North Holland Publishing Co., 1969.
54. Maloney, S. E.: Dutton's Navigation and Piloting Annapolis, Maryland, Naval Institute Press, 1983.
55. Marcuse, D.: Theory of Dielectric Waveguides, New York, Academic Press, 1974.
56. McCormic, M. P.: Simultaneous Multiple Wavelength Laser Radar Measurement of the Lower Atmosphere, Brighton, Electro-optics International Conference, 1971.
57. Measures, R. M.: Laser Remote Sensing, New York, John Wiley and Sons, 1984.
58. Mihalek, R. J.: Projective Geometry and Algebraic Structures, New York, Academic Press, 1972.
59. Milatović, D.: Optoelektronika, Sarajevo, Svjetlost, 1989.
60. Milne, P. H.: Underwater Positioning Systems, London, E. F. N. Spon, 1983.
61. Moritz, H., Mueller, I. I.: Earth rotation, Theory and observation, New York, Ungar Publishing Company, str. 489 - 596, 1987.

- 
62. Moody, A. B.: Navigation Afloat, London, Hollis & Carter, 1980.
63. Muller, J. G.: Optical Instrumentation for Biomedical Laser Applications, SPIE, vol. 658, 1986.
64. Negovetić, L. i (dr.): Laser u kirurgiji glave i vrata, Zagreb, Tehnička knjiga, 1990.
65. Newcomber, K. E.: Computers for Navigation, proc. of the IEEE, vol. 71, No 10, 1983.
66. Palman, D.: Projektivna geometrija, Zagreb, Školska knjiga, 1984.
67. Patel, K. F., Hicks, J. N.: Prevention of fire hazards associated with the use of CO<sub>2</sub> lasers, Anest analg. 60 : 885, 1981.
68. Pauše, Ž.: Vjerojatnost, informacije, stohastički procesi, Zagreb, Školska knjiga, 1978.
69. Pejović, T.: Matematička analiza, Beograd, Građevinska knjiga, V tom, 1970.
70. Peyton, D. R.: An Investigation into Acceleration Determination for Airbone Gravimetry using the GPS, University of New Brunswick, Frederiction, New Brunswick, Tehnical report No 149, str. 80 - 101, 1990.
71. Poehler, T. O.: Diverse detectors meet optical-sensing needs, Laser fours World, A4 - A5, 1989.
72. Rašajski, B.: Analitička geometrija, Beograd, Građevinska knjiga, 1968.
73. Remondi, B. W.: Performing centimeter-level in seconds with GPS carrier phase: initial results. Navigation: Journal of the Institute of Navigation, vol. 32, No 4, 1985/1986, str. 386 - 400.
74. Rhodes, K. Ch.: Excimer lasers, Berlin, Springer-Verlag, 1979.

- 
75. Riggle, G. C. i (dr.): Laser effects on normal and tumor tissue, New York, Plenum Publishing Corp., vol. 1, str. 36 - 65, 1971.
76. Rogoff, M.: Computer and Navigation, proc. of the IEEE, vol. 71, No 10, 1983.
77. Ross, M.: Laser Applications, New York, Academic Press, vol. 3, 1977.
78. Ross, M.: Laser Receivers, New York, John Willey & Sons, 1966.
79. Ruljkov, D. I.: Navigacija i locija, Moskva, Transport, 1973.
80. Seeber, G.: Present State of the DOENAV-campaign, Beitrag für International GPS - Workshop in Darmstadt, 1988.
81. Schwarz, K. P. i (dr.): The use of GPS in exploration geophysics - a comparison of kinematic models, Calgary, University of Calgary, 1987.
82. Shapiro, J. H.: The Target - Reflectivity Theory for Coherent Laser Radars, App. opt., vol. 21, 1982.
83. Shapiro, J. H.: Precise Comparison of Experimental and Theoretical SNR's in CO<sub>2</sub> laser Heterodyne Systems: Comments, Appl. opt., vol. 24, No 9, 1985.
84. Skolnik, M. J.: Theoretical Accuracy of Radar Measurements, IRE Transactions on Aeronautical and Navigational Electronics, 1989.
85. Sonnenberg, G. J.: Radar and Electronic Navigation, Cambridge, Butteworths, 1988.
86. Stansell, A. T.: The Transit Navigation Satellite System, USA, 1978.
87. Stansell, A. T.: Civil GPS from a Future Perspective, proc. of the IEEE vol. 71, No 10, 1983.

- 
88. Stern, R. H. i (dr): Ultrastructural observations of pulsed CO<sub>2</sub> laser effects, *J. Dent Res.*, 51:455-460, 1972.
89. Sušanjan, J.: Instrumenti elektroničke navigacije 1, Rijeka, FPS, 1992.
90. Sušanjan, J.: Instrumenti elektroničke navigacije 2, Rijeka, FPS, 1991.
91. Svelto, O.: Principles of Lasers, New York-London, Plenum Press, 1976.
92. Ševarlić, B., Brkić, Z.: Opšta astronomija, Beograd, Naučna knjiga, 1981.
93. Tamir, T.: Integrated optics, Berlin-Heidelberg-New York, Springer-Verlag, 1975.
94. Tetley, L., Calcutt, D.: Electronic Aids to Navigation, London, Edward Arnold, 1986.
95. Tićac, A., Čišić, D.: Laserske satelitske brodske komunikacije, Rijeka, Pomorski Zbornik, knjiga 30, 1992.
96. Tiznado, E. i (dr.): Experimental CO<sub>2</sub> laser brain lesions and intracranial dynamics, Part 1., *Neurosurg.* 16:5-8, 1985.
97. Tujaka, S.: Microprocessor based SBL hydroacoustic navigation system using BPSK signals, *Esex, European Conference on underwater acoustics*, str. 114-117, 1992.
98. Tynge, L.: Structures, Parameters and Transission Proprietes of Optical Fibers, *proc. of the IEEE*, vol. 68, 1980.
99. Vujnović, V.: *Astronomija 1*, Zagreb, Školska knjiga, 1990.
100. Vukadinović, V. S.: Elementi teorije verovatnoća i matematičke statistike, Beograd, Privredni pregled, 1978.
101. Vukčević, Lj.: Vazduhoplovna, radio, radarska i inercijalna navigacija, Naučna knjiga, Beograd, 1978.

- 
102. Wegner, W.: Die Wirtschaftlichkeit des Omega Navigations Systems, Hansa 112., Jahrgang, No 9, 1976.
103. Wells, D.: Guide to GPS positioning, Fredericton, Canadian GPS Associates, 1987.
104. Wolfe, W. L.,  
Zissis, G. J.: The Infrared Handbook, Washington, U.S. Government Printing Office, 1979.
105. Wylie, F. J.: The use of radar at sea, London, Hollis & Carter, 1976.
106. Yariv, A.: Quantum Electronics, New York-London-Sydney-Toronto, John Wiley & Sons Inc., 1975.
107. Yariv, A.: Introduction to Optical Electronics, New York, Holt Reinhart and Winston, 1976.
108. Žarinac-Frančula, B.: Diferencijalna Geometrija, Zagreb, Školska knjiga, 1990.



**A CONTRIBUTION TO THE IMPROVEMENT  
OF PILOTING BY THE LASER SYSTEM**

*Doctoral dissertation*

SUMMARY

The doctoral dissertation includes three thematic units.

The introductory section defines the issues of research and anticipates its scientific contribution viewing the possible application of its outcome.

The first chapter deals with the physical fundamentals of laser navigation examining the electromagnetic spectrum and describing the properties of laser radiation and wavelength with particular reference to the general property as well as to the energy of radiation.

By analyzing the various types of laser molecular-type laser based on CO<sub>2</sub> is offered as the most suitable choice for the laser navigational system. The selection and synchronization of modes are also discussed in this chapter.

The second chapter deals with the navigational issue of establishing the theoretical model of the laser navigational system to be employed in piloting. The author introduces here some ideas that represent a genuine contribution to the improvement in the science of navigation.

This section describes the maritime navigation system including the analysis and outline of their main technical features. In addition, the chapter deals with electronic

---

navigation introducing the brand-new idea of "laser navigation". The theory-based model of laser navigational system (LNS) is offered for consideration.

An "angle method" of fixing the position by means of the LNS model with two laser lighthouses has been devised and mathematically elaborated.

This chapter also gives a full analysis of the physical phenomena having an influence on the alternation of the coordinates of terrestrial position and affecting the procedure of position-fixing by the LNS model (periodical shifting of the earth's poles, secular shifting of the earth's poles, shifting of the earth's continents, etc.). The influence of rolling and pitching of the vessel on position-fixing by means of the LNS model has been also taken into account. The author introduces the notion of "laser lighthouse" and gives a description of its mode of operation along with the laser transmitter and its navigational and geometrical characteristics.

In addition the chapter deals with the procedure of erecting, i.e. establishing the "laser lighthouse" describing the basic features of the laser receiver on board the vessel. Two basic methods of observation by means of the LNS model are presented here.

Regarding the evaluation of accuracy of fixing the position by means of the LNS model the modified criteria PDOP is suggested.

The last section of this chapter deals with the spreading out of the laser beams through the atmosphere and analyzes the phenomenon of attenuation caused by molecular absorption, turbulence of atmosphere and laser beam dispersion due to the impact with solid particles and droplets.

The third chapter takes into account the potential hazards of employing the LNS model. It describes the interaction of electromagnetic laser radiation and biological organism (tissue) pointing out the action of the laser beams on tissue and describing the photochemical, thermal and ionization effect. The chemometabolic alternations of the tissue and the action of the laser beams on human eyes as the potential most vulnerable human organs are also discussed in the chapter along with a brief analysis of the effects of laser radiation on human body.

---

On the basis of theoretical calculations the following points are considered in this chapter: area of risk, distance limit, safe distance of the laser lighthouse located on a horizontal plane.

In the ending section of the work the author draws out all relevant conclusions resulting from his research.

---

D (PF - Sveučilište u Rijeci)      UDK 629.7.05.:656.61.052:621.3.038.8(043.3)

## **1. PRILOG UNAPREĐENJU TERESTRIČKE NAVIGACIJE LASERSKIM SUSTAVOM**

2. Serđo Kos

**3. POMORSKI FAKULTET  
RIJEKA, REPUBLIKA HRVATSKA**

Ključne riječi:

- laser
- laserska navigacija
- laserski navigacijski sustav