

# Određivanje pozicije broda pomoću Sunca u razmaku vremena

---

**Jakšetić, Vid**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*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:187:390354>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-20**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**VID JAKŠETIĆ**

**ODREĐIVANJE POZICIJE BRODA POMOĆU SUNCA U  
RAZMAKU VREMENA**

**ZAVRŠNI RAD**

**Rijeka, 2023.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**ODREĐIVANJE POZICIJE BRODA POMOĆU SUNCA U RAZMAKU  
VREMENA  
DETERMINING THE POSITION OF THE SHIP USING THE SUN IN  
THE TIME INTERVAL (RUNNING FIX)**

**ZAVRŠNI RAD**

Kolegij: Astronomska navigacija

Mentor: doc. dr. sc. Đani Šabalja

Student: Vid Jakšetić

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112079380

**Rijeka, studeni 2023.**

Student/studentica: Vid Jakšetić

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112079380

### IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom  
Određivanje pozicije broda pomoću Sunca u razmaku vremena  
(naslov završnog rada)


izradio/la samostalno pod mentorstvom  
doc. dr. sc. Danija Šabalje  
(prof. dr. sc. / izv. prof. dr. sc. / doc dr. sc Ime i Prezime)

te komentorstvom \_\_\_\_\_

stručnjaka/stručnjakinje iz tvrtke \_\_\_\_\_  
(naziv tvrtke).

U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezao/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student/studentica



\_\_\_\_\_  
(potpis)

Ime i prezime studenta/studentice: Vid Jakšetić

Student/studentica: Vid Jakšetić

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112079380

IZJAVA STUDENTA – AUTORA  
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student/studentica - autor



---

(potpis)

## SAŽETAK

Nebeska navigacija predstavlja korištenje promatranih položaja nebeskih tijela za određivanje položaja plovila. U svakom trenutku neko nebesko tijelo, najčešće Sunce, nalazi se u zenitu bilo kojeg određenog mjesta na površini zemlje. Iz ovih informacija može se iscrtati linija položaja. Navigator zatim koristi sekstant za mjerenje visine nebeskog objekta i bilježi tu visinu, s pomoću koje procjenjuje svoj položaj. Visina i smjer koji bi nebesko tijelo imalo na tom položaju izračunavaju se ili uzimaju iz tablica. Iz ovih informacija i iz razlike između opažene i izračunate visine nebeskog objekta, može se izračunati položaj plovila. Određivanje pozicije broda metodama astronomske navigacije predstavlja vrlo staru vještinu koja se koristila sve do dolaska suvremen tehnologija koja omogućava vrlo precizno određivanje položaja. Koriste se različite metode, ovisno o potrebama, a Sunce je najčešći nebeski objekt koji služi za određivanje položaja.

Ključne riječi: pomorstvo, navigacija, Sunce, astronomska navigacija, određivanje položaja broda.

## **SUMMARY**

Celestial navigation is the use of observed positions of celestial bodies to determine the position of the vessel. At any moment, a celestial body, most often the sun, is at the zenith of any particular place on the earth's surface. A position line can be drawn from this information. The navigator then uses a sextant to measure the altitude of the celestial object and records that altitude, which he uses to estimate his position. The altitude and direction that the celestial body would have at that position are calculated or taken from tables. From this information and from the difference between the observed and calculated height of the celestial object, the position of the vessel can be calculated. Determining a ship's position using astronomical navigation methods is a historical skill that was used until the arrival of modern technology that enables very precise position determination. Different methods are used, depending on the needs, and the sun is the most common celestial object used to determine the position.

Key words: seafaring, navigation, sun, astronomical navigation, position determination.

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2. OPĆENITO O ASTRONOMSKOJ NAVIGACIJI</b>	<b>2</b>
2.1. Astronomska navigacija.....	2
2.2. Povijesni razvoj i primjena.....	3
<b>3. ODREĐIVANJE POZICIJE BRODA METODAMA ASTRONOMSKE NAVIGACIJE</b>	<b>6</b>
3.1. Definiranje određivanja pozicije broda s pomoću Sunca.....	6
3.2. Računanje geografske pozicije.....	10
3.2.1. Izravne metode.....	10
3.2.2. Neizravne metode.....	13
3.3. Utjecaj vremenskog razmaka na preciznost.....	13
<b>4. POSTUPAK ODREĐIVANJA POZICIJE SA DVA OPAŽANJA SUNCA U RAZMAKU VREMENA</b>	<b>16</b>
4.1. Opis korištenog instrumenata (sekstant).....	16
4.2. Azimut.....	17
4.3. Priprema mjerenja.....	19
<b>5. BUDUĆNOST NAVIGACIJE</b>	<b>26</b>
5.1. Pomorska navigacija i e-navigacija.....	26
5.2. Prednosti i ograničenja pomorske navigacije.....	27
<b>ZAKLJUČAK</b>	<b>29</b>
<b>LITERATURA</b>	<b>31</b>
<b>POPIS SLIKA</b>	<b>32</b>



## 1. UVOD

Astronomska navigacija praksa je određivanja položaja plovila s pomoću zvijezda i drugih nebeskih tijela koja omogućuje navigatoru da točno odrede svoj stvarni trenutni fizički položaj na moru bez oslanjanja isključivo na procijenjene položajne izračune. Nebeska navigacija se izvodi bez korištenja satelitske navigacije ili drugih sličnih suvremenih elektroničkih ili digitalnih sredstava za pozicioniranje. Astronomska navigacija koristi vremenski mjerena kutna mjerenja, koja se obično uzimaju između nebeskog tijela (npr. Sunca, Mjeseca, planeta ili zvijezde) i vidljivog horizonta.

Astronomska navigacija također može iskoristiti prednosti mjerenja između nebeskih tijela bez pozivanja na Zemljin horizont, kao kada se Mjesec i druga odabrana tijela koriste u praksi zvanj lunarij ili metoda lunarne udaljenosti, koja se koristi za određivanje točnog vremena kada je vrijeme nepoznato. Problem istraživanja proizlazi iz nedovoljnog poznavanja i korištenja astronomske navigacije, stoga je predmet istraživanja određivanje pozicije broda metodama astronomske navigacije. Objekt istraživanja je važnost i utjecaj poznavanja određivanja pozicije broda kroz astronomsku navigaciju. Provedeno istraživanje u ovom radu ima za svrhu dokazati hipotezu istraživanja koja se odnosi na potrebu praktičnog poznavanja izračuna, metoda i načina određivanja položaja plovila kroz astronomsku navigaciju. Metode istraživanja korištene prilikom izrade ovog rada su metoda analize, sinteze, komparacije, povijesna metoda, deskriptivna metoda, metoda apstrakcije, konkretizacije i metoda kompilacije.

Istraživanje je podijeljeno u nekoliko poglavlja. U prvom poglavlju Uvod, predstavlja se tema istraživanja, problem, predmet, objekt i hipoteza istraživanja, te korištene metode. Drugo poglavlje Općenito o astronomskoj navigaciji, prikazuje astronomsku navigaciju, te njezin povijesni razvoj i primjenu. Poglavlje Određivanje pozicije broda metodama astronomske navigacije definira određivanje pozicije broda s pomoću Sunca, računanje geografske pozicije kroz izravnu i neizravnu metodu, te utjecaj vremenskog razmaka na preciznost. Poglavlje Postupak određivanja pozicije s dva opažanja Sunca u razmaku vremena opisuje korišteni instrument sekstant, azimut i prikazuje pripremu mjerenja. Poglavlje Budućnost navigacije, prikazuje pomorsku navigaciju i e-navigaciju, kao i prednosti i ograničenja pomorske navigacije. Poglavlje Zaključak, daje sintezu istraživanja.

## 2. OPĆENITO O ASTRONOMSKOJ NAVIGACIJI

### 2.1. Astronomska navigacija

Metode astronomske navigacije skup su matematičkih zakonitosti koje, iz pravilne izmjene položaja nebeskih tijela, omogućuju orijentaciju na otvorenom moru. Ne može se točno odrediti kad su se metode astronomske orijentacije počele koristiti u pomorskoj navigacijskoj praksi. Prije uvođenja kompasa na brodove, ljudi su plovili samo na kratkim udaljenostima u blizini obale. Ipak, orijentaciju s pomoću nebeskih tijela spominje već Homer u Odiseji u 14. stoljeću prije Krista (Klarin, 1996., str. 45.). Grčki astronom Piteja opisuje putovanje iz Sredozemlja do Škotske četvrtom stoljeću prije Krista i spominje orijentaciju s pomoću Sunca (Klarin, 1996., str. 46.).

Johann Miller<sup>1</sup>, poznatiji kao Regiomontanus u 15. stoljeću, najzaslužniji je što su astronomska mjerenja počela primjenjivati u pomorskoj navigacijskoj praksi (Klarin, 1996., str. 46.). On je izračunao efemeride kojima su se koristili Bartolomeu Dias, Vasco da Gama, Kolumbo i Amerigo Vespucci. Efemeride su se odnosile na Sunce, Mjesec i zvijezde, i to s obzirom na meridijan Nurnberga od 1470. do 1507. godine (Klarin, 1996., str. 47.). Zabilježeno je da je Amerigo Vespucci do Regiomontanusovim efemeridama izračunao da je razlika geografskih dužina Venezuele i Nurnberga 5,5 sati. Sredinom 15. stoljeća Henrik Pomorac<sup>2</sup> okupio je najpoznatije astronome, pomorce i kartografe i osnova prvu pomorsku školu i opservatorij su Sargesu u Portugalu (Klarin, 1996., str. 48.). Početkom 16. stoljeća, pomorci su imali tablice za određivanje geografske širine iz visine polarne zvijezde i visine Sunca u meridijanu. Portugalski astronom i kartograf Ruy Faleiro izradio je upute za uporabu astrobola i Jakovljeva štapa kojima se Magellan koristio na svojem putovanju (Klarin, 1996., str. 50.).

Početkom 16. stoljeća nizozemski matematičar i astronom Rainer Gemma Frisius predložio je da se geografska dužina računa s pomoću točnog sata sa srednjim vremenom zajedničkog

---

<sup>1</sup> Johann Miller (1436.-1476.) - Sastavio je astronomske tablice u kojima je dao popis pomrčina za razdoblje od 1475. do 1530. godine. Podatke u tekstu je nazvao efemeridama te su to bile prve tiskane astronomske tablice.

<sup>2</sup> Henrik Pomorac (1394.-1460.) – Pokrenuo je eru velikih portugalskih pomorskih otkrića, te je osobno sudjelovao u brojnim pomorskim ekspedicijama i gradnji novih i bržih brodova.

meridijana koji prolazi kroz Kanarsko područje. Na zadnjem putovanju engleskog istraživača Jamesa Cooka 1779. godine, koristile su se metode i instrumenti koji se nisu bitno razlikovali od današnjih (Klarin, 1996., str. 51.). Postojali su oktant, odnosno instrument koji je prethodio sekstantu, kronometar, astronomski godišnjak s efemeridama nebeskih tijela, a grinički meridijan upotrebljavan je kao početni meridijan. Nisu se koristile današnje metode, ali je to zapravo bila jedina razlika. Astronomsku stajnicu otkrio je Sumner 1837. godine. Metoda koja je široku primjenu pronašla u 20. stoljeću, odnosno visinska metoda, otkrivena je potkraj 20. stoljeća, a koristi se i danas (Klarin, 1996., str. 53.).

Od početaka pisane povijesti, stanovništvo je imalo potrebe putovati, u nekim slučajevima na velike udaljenosti, promatrajući relativne položaje Sunca, Mjeseca i zvijezda. Prvi istraživači plovili su pijeskom afričkih pustinja i oceana između otoka južnog Pacifika bez ničega osim zvijezda koje su ih vodile. S vremenom su se navigacijski alati i metodologija razvili, omogućujući navigatorima da pouzdano pronađu put preko svjetskih oceana i, na kraju, relativni položaj i orijentacija raznih konstelacija ustupili su mjesto matematičkom izračunu položaja temeljenom na korištenje određenih zvijezda ili planeta.

Pojava zračnog prometa donijela je nove izazove navigaciji na velike udaljenosti. Rani zrakoplovi dugog dometa često su bili opremljeni kupolom za navigaciju koja strši iz trupa, u kojem je navigator mogao koristiti ručni oktant određivanje zvijezda. S pojavom periskopskog sekstanta, kupola za navigaciju je postala suvišna, a daljnja usavršavanja instrumenta, dala su sekstantu više svestranosti. S vremenom se iznimno povećala točnost do koje je vješt navigator mogao odrediti njihov položaj nad površinom zemlje, koristeći samo nebeska tijela.

Pojavom inercijskih navigacijskih sustava i navigacijskih pomagala dugog dometa kao što su LORAN-C i Omega, upotreba nebeske navigacije je opala, a uvođenjem Global Positioning System (GPS), njezina je uporaba u zrakoplovstvu praktički prestala (Klarin, 1996., str. 55.). Međutim, broj svjetskih vojnih organizacija ponovo je započeo obuku u tehnikama nebeske navigacije jer, za razliku od GPS-a, nebeska navigacija nije osjetljiva na uništenje satelita, cyber napad, elektromagnetski puls ili kvar sustava.

## 2.2. Povijesni razvoj i primjena

Od početka razvoja civilizacije javlja se potreba za putovanjima i kretanjem. Za prijašnje pretke, putovanje kopnom obično je bilo pitanje smjera, vremenskih uvjeta i dostupnosti prirodnih resursa. Međutim, plovidba golemim morem uvijek se pokazala složenijom i opasnijom, s pogreškama u izračunima koje su u najboljem slučaju dovele do duljeg putovanja, a u najgorem do stizanja na pogrešno odredište.

Prije izuma znanstvenih i matematički utemeljenih navigacijskih instrumenata, navigatori su se oslanjali na Sunce i zvijezde da bi odredili vrijeme i odredili gdje se nalaze na naizgled beskrajnom oceanu. Stoljećima je nebeska navigacija pomogla da se navigatori sigurno vode do njihovih odredišta, a sposobnost da to čine postala je visoko cijenjena vještina.

Umijeće nebeske navigacije staro je 4000 godina (Davidson, 2022.). Prva zapadna civilizacija za koju se zna da je razvila oceanske navigacijske tehnike bili su Feničani oko 2000. prije nove ere (Davidson, 2022.). Koristili su se primitivnim kartama i promatrali Sunce i zvijezde kako bi odredili smjerove, a do kraja tisućljeća imali su preciznije razumijevanje sazviježđa, pomrčina i kretanja mjeseca što je omogućilo sigurnije i izravnije putovanje Sredozemljem i danju i noću. Također su koristili sondirane utege, koji su se spuštali s broda i pomagali navigatorima da odrede dubinu vode i mogli su pokazati koliko je brod blizu kopna.

Stari Grci također su vjerojatno koristili nebesku navigaciju: olupina otkrivena 1900. u blizini otočića Antikythera bila je dom uređaja poznatog kao mehanizam Antikythera (Davidson, 2022.). Sastavljeno od tri korodirana komada plosnate bronce i s mnogo zupčanika i kotačića, smatra se da je bilo prvo 'analogno računalo' na svijetu i da se vjerojatno koristilo kao navigacijski instrument koji je razumio kretanje nebeskih tijela u 3. ili 2. stoljeću prije Krista (Davidson, 2022.).

Do 16. stoljeća, doba istraživanja učinilo je velike navigacijske korake u pomorstvu. Unatoč tome, bila su potrebna stoljeća da globalna navigacija na moru postane moguća. Sve do 15. stoljeća pomorci su bili obalni navigatori. Plovidba otvorenim morem još uvijek je bila ograničena na područja s predvidljivim vjetrovima, plimama i strujama ili na područja gdje je postojao široki epikontinentalni pojas.

Točno određivanje zemljopisne širine (položaja na zemlji od sjevera prema jugu) bilo je jedno od prvih ranih postignuća nebeske navigacije, a bilo ga je relativno lako učiniti na sjevernoj hemisferi korištenjem Sunca ili zvijezda. Instrumenti za mjerenje kuta kao što je pomorski astrolab mjerili su visinu Sunca u podne, pri čemu je kut u stupnjevima odgovarao geografskoj širini broda (Davidson, 2022.).

Ostali instrumenti za određivanje geografske širine uključivali su kvadrant, križni štap i sekstant, koji su služili sličnoj svrsi. Do kraja 15. stoljeća instrumenti za mjerenje zemljopisne širine postajali su sve precizniji. Međutim, još uvijek nije bilo moguće izmjeriti zemljopisnu dužinu (položaj na Zemlji od zapada prema istoku), što znači da istraživači nikada nisu mogli točno znati svoj položaj na moru.

Jedan od najranijih alata koje je napravio čovjek za pomoć pri navigaciji bio je pomorski kompas, koji je bio rani oblik magnetskog kompasa. Međutim, prvi pomorci često su mislili da su njihovi kompasi netočni jer nisu razumjeli koncept magnetske varijacije, što je kut između pravog geografskog sjevera i magnetskog sjevera (Davidson, 2022.). Umjesto toga, primitivni kompasi uglavnom su korišteni za pomoć u prepoznavanju smjera iz kojeg vjetar puše kada Sunce nije bilo vidljivo.

Sredinom 13. stoljeća navigatori su prepoznali vrijednost crtanja pomorskih karata kao načina vođenja evidencije o svojim putovanjima. Iako prve karte nisu bile osobito točne, smatralo se da su vrijedne i kao takve su često držane u tajnosti od drugih pomoraca. Zemljopisna širina i dužina nisu bile označene. Međutim, između glavnih luka postojala je "ruža kompasa" koja je pokazivala smjer kretanja (Davidson, 2022.).

Nebesku navigaciju još uvijek koriste privatni jahtaši, posebice jahte za krstarenje koje prelaze velike udaljenosti diljem svijeta. Poznavanje nebeske navigacije također se smatra bitnom vještinom ako se odvažite izvan vizualnog dometa kopna, budući da tehnologija satelitske navigacije povremeno može zakazati.

Danas su računala, sateliti i sustav globalnog pozicioniranja (GPS) revolucionirali modernu navigaciju, omogućujući ljudima da plove golemim dijelovima oceana, lete na drugu stranu svijeta pa čak i istražuju svemir (Davidson, 2022.). Napredak moderne tehnologije odražava

se i u suvremenoj ulozi navigatora na moru, koji umjesto da stoji na palubi i gleda u Sunce i zvijezde, sada se obično nalazi ispod palube.

## 3. ODREĐIVANJE POZICIJE BRODA METODAMA ASTRONOMSKE NAVIGACIJE

### 3.1. Definiranje određivanja pozicije broda s pomoću Sunca

Nebeska navigacija kroz povijest je služila za određivanje položaja brodova na otvorenom moru, no u eri GPS-a postala je suvišna jer su je preuzeli sateliti. To međutim ne znači da se zvijezde više ne koriste za određivanje položaja na oceanu. Nebeska tijela ostaju rezerva za navigaciju brodova u slučaju problema s GPS-om, te jedrilicařima entuzijastima koji se njima i dalje služe iz sporta.

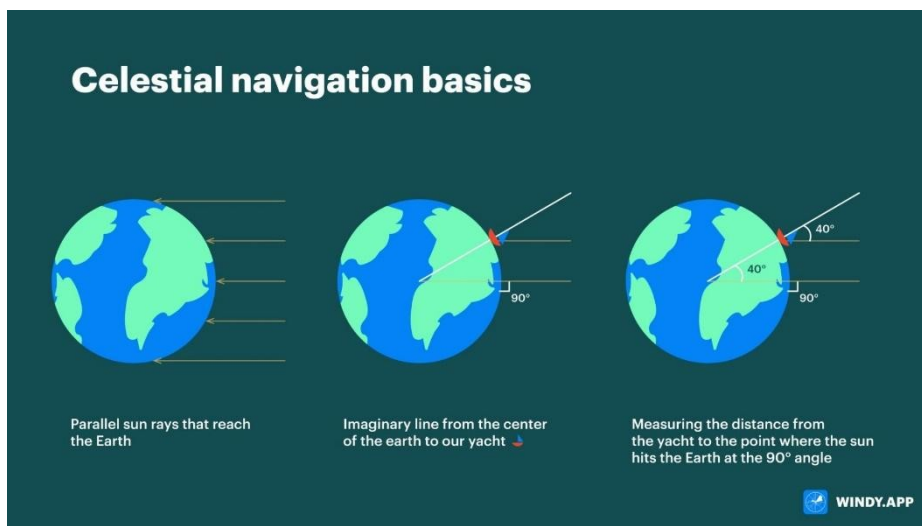
Zemljina površina podijeljena je na zamišljene linije koje služe za lociranje određenih točaka i položaja. Crte koje se protežu globusom od južnog do sjevernog pola predstavljaju zemljopisne dužine, dok su zemljopisne širine linije povučene paralelno s ekvatorom. Kombinacija zemljopisne dužine i širine u stupnjevima daje koordinate koje se koriste u navigaciji bilo koje vrste. Nebeska navigacija temelji se na mogućnosti praćenja nebeskih tijela, kao što su Mjesec, Venera, Mars, Saturn i Jupiter te neke od najsjajnijih zvijezda (Benković, et. al., 1986., str. 23.). Međutim, određivanje trenutne pozicije s pomoću Sunca je najčešća praksa jer će pomorci to često koristiti i tijekom dana.

Pod premisom da su sunčeve zrake koje padaju na površinu zemlje paralelne, iako praktično nije tako, prihvaća se ovakav način gledanja radi pojednostavljenja definiranja određivanja pozicije putem Sunca. Na zemljinoj površini uvijek postoji točka (koja stalno mijenja svoj položaj zbog rotacije planeta) kroz koju bi sunčeva zraka mogla proći izravno u središte zemlje (Benković, et. al., 1986., str. 23.). Osoba koja stoji na ovoj zamišljenoj točki vidjela bi Sunce pod pravim kutom (90 stupnjeva) točno iznad sebe. Za primjer, neka je brod ili plovilo negdje miljama daleko pluta na pučini bez GPS-a, a Sunce se vidi iz drugog kuta, i potrebno je odrediti poziciju plovila.

Prvi korak je da se na plovilu pronađe kut između horizonta i položaja Sunca, kao i koordinate točke u kojoj Sunce sja u središte zemlje (kao što je gore opisano) u to vrijeme. Kut se može brzo i jednostavno pronaći uz pomoć nautičkog sekstanta, dok će informacije o položaju Sunca doći iz Nautičkog godišnjaka.

Drugi korak je izmjeriti dobivene kutove. Na primjer, neka sekstant pokazuje 50 stupnjeva. Ispada da će kut između zamišljene ravne linije koja se proteže od središta Zemlje do izgubljenog plovila i kuta Sunca iznad horizonta biti  $90^\circ - 50^\circ = 40^\circ$  (Benković, et. al., 1986., str. 23.). Razlog zašto se povukla ravna linija do plovila jest ta da su ta dva kuta jednaka jer su sunčeve zrake paralelne. S obzirom na to da je poznat kut između plovila i točke gdje Sunce sada gleda u središte zemlje pod pravim kutom, može se izmjeriti udaljenost od plovila do te točke.

Jedan stupanj jednak je 60 nautičkih milja (koriste se nautičke milje, a ne obične milje jer ih je praktičnije mjeriti u stupnjevima, a nautička milja je 1,832 km). To znači da će udaljenost biti  $60 * 40^\circ = 2.400$  nautičkih milja ili 4.444 kilometra (Astronomska navigacija, 2023.).



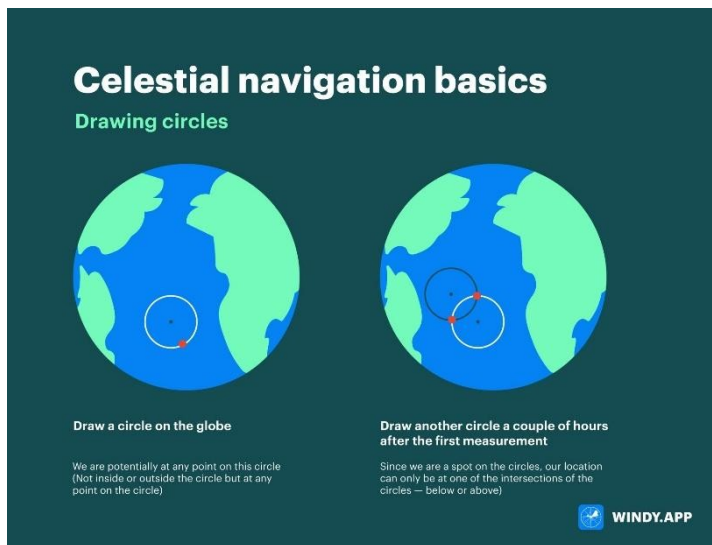
Slika 1. Osnove astronomske navigacije

Izvor: *Celestial navigation: how to determine your position by stars and other space objects*, <https://windy.app/textbook/celestial-navigation.html>, 20. rujna 2023.

Sada je potrebno nacrtati krugove. Podaci koji su pripremljeni ranije su korisni, ali udaljenost do točke ne govori o zemljopisnoj dužini i širini. Drugim riječima, to znači da plovilo može biti 4.444 kilometra oko iste točke koja je pronađena na kartama (Astronomska navigacija, 2023.). Sve što sada može učiniti je nacrtati krug na globusu, jer na običnoj karti neće funkcionirati. Potencijalno plovilo može biti bilo gdje u nacrtanom krugu. Potrebno je nacrtati još jedan krug. Ponovno se može koristiti Sunce kao referenca, na primjer, nekoliko sati nakon prvog mjerenja. Sekstantom se mjeri kut od horizonta do Sunca, ponovno se pogledaju



karte i pronalazi se prava točka, izračuna se udaljenost do nje i crta se nova kružnica (Benković, et. al., 1986., str. 23.).



Slika 2. Određivanje položaja s pomoću dviju točki

Izvor: *Celestial navigation: how to determine your position by stars and other space objects*, <https://windy.app/textbook/celestial-navigation.html>, 20. rujna 2023.

Budući da je pozicija plovila mjesto na krugovima, lokacija može biti samo na jednom od sjecišta krugova — ispod ili iznad. U praksi su ta raskrižja zemljopisno jako udaljena jedno od drugog. Mogu se odabrati druga nebeska tijela ako za njih postoje podaci u tablicama, te nacrtati više krugova za veću točnost (Benković, et. al., 1986., str. 23.).

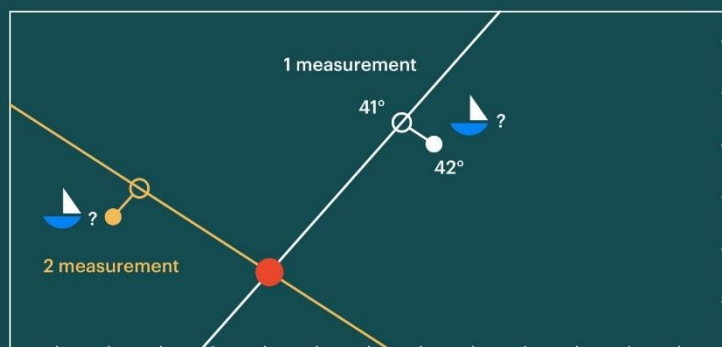
Ako ne postoji globus na koji se mogu ucrtati kružnice, može se situacija po smatrati iz drugačijeg kuta. Pod pretpostavkom da je zemlja ravna, tada zakrivljenost zemlje nema toliku važnost, a poanta je u računanju s manjim skalama. S pomoću pomorskih karata mora se odrediti točku u kojoj Sunce u tom trenutku “gleda” u središte Zemlje. Znajući koordinate pretpostavljenog položaja i udaljenost do stvarne „solarne točke“, može se izračunati koji bi kut sekstant pokazivao između horizonta i Sunca da je plovilo stvarno u tom pretpostavljenom položaju (Astronomska navigacija, 2023.).

Za to postoji jednostavna formula. Od 90 stupnjeva oduzima se udaljenost između pretpostavljene pozicije i „solarne točke“ (Astronomska navigacija, 2023.). Ovu udaljenost može se lako saznati, budući da su poznate procijenjene dužine i širine. Nakon toga, mogu se usporediti očitavanja pretpostavljenog sekstanta s očitanjima sekstanta na mjestu gdje se plovilo nalazi. Ako se očitavanja podudaraju, točno je pogodena pozicija plovila.

Koristi se princip dvostrukog odraza. Prvo zrcalo poravnato je s horizontom, dok se drugo najprije mora usmjeriti prema nebeskom tijelu, a zatim pomaknuti da se poklopi s horizontom s pomoću pomične ruke ispod (Benković, et. al., 1986., str. 23.). Kada nebesko tijelo dotakne horizont, može se zapisati vrijednost ili mjera kuta. Obično jedna osoba vrši mjerenja, dok druga bilježi točno vrijeme i kut. Izuzetno je važno gledati u Sunce kroz posebne filtere kojima je opremljen svaki moderni sekstant. Vrlo je vjerojatno da se očitavanja neće podudarati. U tom slučaju ponovit će se isto što i s kružnicama koje se sijeku na globusu, ali ovaj put crtat će se linije koje se sijeku na ravnoj karti (Benković, et. al., 1986., str. 23.).

Kada se popravi pretpostavljeni položaj, vrši se provjera za koliko se razlikuju očitavanja stvarnog i pretpostavljenog sekstanta. Za primjer se može uzeti da je Sunce na 42 stupnja iznad horizonta, a stvarni kut je 41, tada se mora pomaknuti pretpostavljeni položaj za 1 stupanj od Sunca (što je kut manji, to je udaljeniji od Sunca, a što je veći, što bliže Suncu) (Astronomska navigacija, 2023.).

# Celestial navigation basics



On the first measurement (the yacht is on the right), the "solar" point was far to the south east on the edge of the map. The second measurement (on the left) shows that it moved to the west, so we make a correction in the other direction.)



Slika 3. Razlika očitavanja stvarnog i pretpostavljenog sekstanta

Izvor: *Celestial navigation: how to determine your position by stars and other space objects*, <https://windy.app/textbook/celestial-navigation.html>, 20. rujna 2023.

Nakon toga, ucrtava se pravac okomit na smjer Sunca. Zapravo, ovo je dio kruga koji bi se trebao nacrtati na globusu, ali malo mjerilo karte omogućuje da ga se nacrti kao pravac. Nakon nekog vremena provode se ista mjerenja i ispravljaju podaci sekstanta za drugu pretpostavljenu poziciju (na slici je lijevo), koju se također nasumično stavlja na kartu s pravcem (Astronomska navigacija, 2023.).

Ako se dvije linije sijeku, pozicija je otprilike u točki sjecišta. Ako ne, radi se o pogrešci i tada je potrebno više linija da se pronade ispravno sjecište. Više linija znači veću preciznost, jer ako se 3 linije sijeku, onda je položaj vjerojatno negdje unutar trokuta na sjecištima linija, i tada se može vidjeti približna zemljopisna širina i dužina s prosječnom točnošću od 1 do 5 kvadratnih nautičkih milja, ako je sve ispravno napravljeno. U teoriji se može postići točnost od 0,1 kvadratne milje, ali u praksi se to rijetko postiže (Benković, et. al., 1986., str. 23.). Uz sve navedeno, potrebno je naučiti čitati tablice i koristiti sekstant, uzeti u obzir kretanje plovila i napraviti druge prilagodbe u izračunima. Ali ako biste se mogli snaći u gore spomenutim pojednostavljenim konceptima, znate kako funkcionira nebeska navigacija.

## 3.2. Računanje geografske pozicije

Geometrijsko mjesto položaja broda u astronomskoj navigaciji definira se kao kružnica položaja, luk položaja i pravac položaja. Kružnicu položaja na Mercatorovoj karti predočuje se krivuljom sličnoj elipsi, sinusoidi ili paraboli (Franušić, 1989., str. 227.). Presjek dvaju geometrijskih mjesta svedenih na isti trenutak i mjesto daju točku broda. Više od dvije stajnice zatvaraju poligon položaja. Tri zatvaraju trokut, a četiri četverokut. Teorijski gledano sve stajnice svedene na isti trenutak i mjesto morale bi se sjeći na jednoj točki, međutim u praksi to nije tako zbog navigacijske greške (Franušić, 1989., str. 227.). Metode za astronomsko određivanje položaja broda mogu se grupirati u dvije metode, a to su izravna i neizravna metoda (Franušić, 1989., str. 227.).

### 3.2.1. Izravne metode

Dvije kružnice položaja sijeku se u dvije točke, a jedna od tih točaka je položaj broda. Brže i jednostavnije se to može riješiti crtanjem kružnica na globusu. Međutim to nije praktično s obzirom na to da je jedan metar na globusu 1 milimetar, a takav globus trebao bi biti širine sedam metara da bi se s pomoću njega moglo računati (Franušić, 1989., str. 218.). Ako se opseg označi s  $o$ , a promjer s  $d$ , tada je (Franušić, 1989., str. 227.):

$$o = 360 \times 60 = 21.600'$$

$$d = o/\pi = 6.875,5 \text{ mm}$$

Problem se može riješiti kroz sustav jednadžbi.

$$\sin V_1 = \sin \varphi \sin \delta_1 + \cos \varphi \cos \delta_1 \cos (S_1 + \lambda_\Sigma)$$

$$\sin V_2 = \sin \varphi \sin \delta_2 + \cos \varphi \cos \delta_2 \cos (S_2 + \lambda_\Sigma)$$

gdje su:

$V_{1,2}$  = visine nebeskih tijela, izmjerene i popravljene

$\varphi$  = geografska širina položaja broda

$\delta_{1,2}$  = deklinacija nebeskih tijela, prvog i drugog

$S_{1,2}$  = grinički satni kutovi za prvo i drugo nebesko tijelo

$\lambda_{\Sigma}$  = istočna geografska duljina položaja broda

S obzirom na to da ovaj sustav trigonometrijskih jednadžbi treba riješiti po nepoznicama, a postupak je vremenski iscrpan i kompliciran, ova metoda se ne upotrebljava u praksi. Međutim, matematički model za elektroničko računalo dao je Ivo Sjekavica, međutim zbog nepraktičnosti, ove metode se ne koriste (Franušić, 1989., str. 228.). Charles T. Dozier je predložio formulu računanja geografskih koordinata 1949. godine, a hrvatski autor S. Kolarić je predložio je 1954. transformirane formule za računanje geografske širine i satnog kuta (Franušić, 1989., str. 228.):

$$\sin^2 \frac{90-\varphi}{2} = \sin^2 \frac{V_2-\delta_2}{2} + \sin^2 \frac{\pi_1}{2} \cos V_2 \cos \delta_2$$

$$\sin^2 \frac{S_2}{2} = \operatorname{cosec} p_2 \sec \varphi \cos \cos \Sigma_3 \sin \sin (\Sigma_3 - \Sigma_2)$$

$$\Sigma_3 = \frac{V_2 + p_2 + \varphi}{2}$$

Sustav trigonometrijskih jednadžbi rješiv je i skraćenim postupkom s pomoću jedne numeričke metode. Takvo jedno rješenje donosi autor Petar Čumbelić, a metoda se sastoji od rješavanja ranije spomenutog sustava jednadžbi svođenjem na sljedeće (Franušić, 1989., str. 228.):

$$\Delta S = \operatorname{arc} \cos \cos \frac{\sin \sin V_2 - \sin \sin \varphi \sin \sin \delta_2}{\cos \cos \varphi \cos \cos \delta_2} - \operatorname{arc} \cos \cos \frac{\sin \sin V_1 - \sin \sin \varphi \sin \delta_1}{\cos \cos \varphi \cos \cos \delta_1}$$

Prema formuli  $\Delta S$  je razlika griničkih satnih kutova, a za zvijezde to je razlika njihovih surektascenzija. Jedina nepoznanica je geografska širina  $p$  koja će se mijenjati dok razlika između lijeve i desne strane jednadžbe ne bude po volji malen broj. Diferencirajući ranije navedenu jednadžbu, dobiva se totalni diferencijal (Franušić, 1989., str. 227.):

$$dS = \frac{dV_2 \operatorname{cosec} \omega_2 - dV_1 \operatorname{cosec} \omega_1}{\cos \cos \varphi} + \frac{\cot \cot \omega_1 - \cot \omega_2}{\cos \cos \varphi} d\varphi + \frac{d\delta_1 \cot \cot \pi_1}{\cos \cos \delta_1} - \frac{d\delta_2 \cot \pi_2}{\cos \cos \delta_2}$$

Kad je  $dS$ ,  $d\delta_1$  i  $d\delta_2 = 0$ , onda je promjena geografske širine  $d\varphi$ , zbog promjene visine  $dV_1$  i  $dV_2$ , jednaka:

$$d\varphi = \frac{dV_1 \sin \omega_2 - dV_2 \sin \omega_1}{\sin \sin(\omega_1 - \omega_2)}$$

Pri tome se  $dV_{1,2}$  definira kao razlika između pravih visina i računalnih visina. Ako je razlika između lijeve i desne strane jednadžbe manja od po volji odabranog malog broja, najčešće se uzima broj 1, jednadžba i problem su riješeni, a zbrojena širina ujedno je i prava širina. Kad je razlika veća od tog malog broja, mijenja se  $\varphi$  za  $d\varphi$  i ponovno se računa. (Franušić, 1989., str. 229.) Obično je jedna iteracija dovoljna, rijetko dvije, a treća i više iteracija gotovo nikada.

$$\lambda_w = S - \arccos \cos \frac{\sin \sin V - \sin \sin \varphi \sin \sin \delta}{\cos \cos \varphi \cos \cos \delta}$$

Satni kut  $S$ , visina  $V$  i deklinacija  $\delta$  odnose se na prvo ili drugo nebesko tijelo. Promjena geografske duljine zbog promjene u geografskoj širini bila bi:

$$ds = d\lambda = d\varphi \cot \cot \omega \sec \sec \varphi$$

Formula upućuje na to da se račun geografske duljine izvodi s elementima onoga nebeskog tijela koje ima veći azimut, to jest uzima se ono nebesko tijelo koje je dalje od meridijana, jer je tada promjena ili greška geografske duljine zbog promjene geografske širine manja.

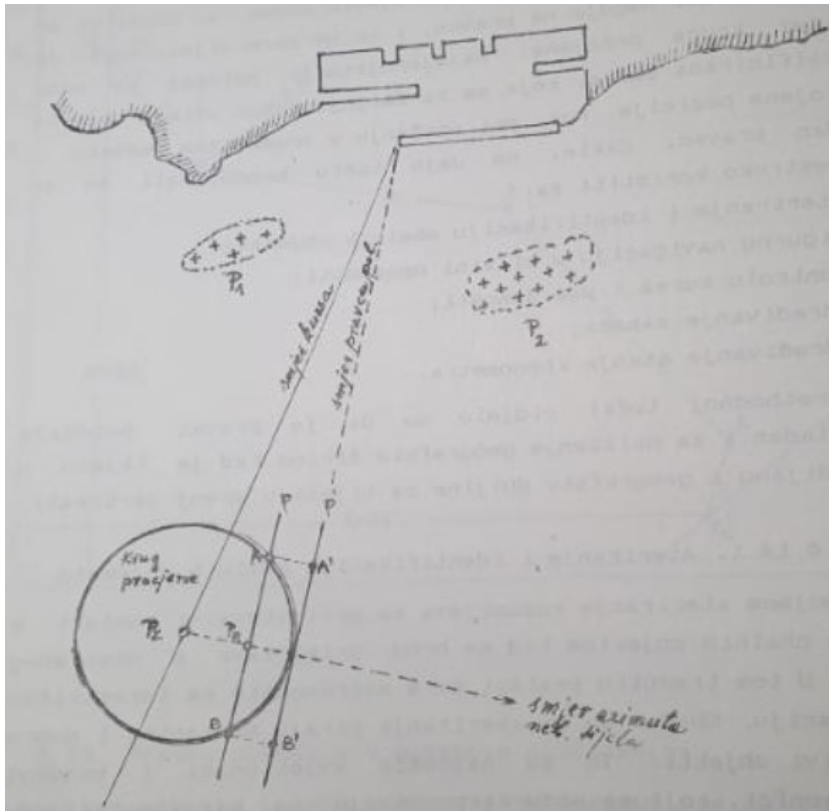
### 3.2.2. Neizravne metode

U neizravne metode ubrajaju se sve one metode računanja geografskih koordinata položaja broda u kojim se to ostvaruje posredno, preko pomoćnih veličina bilo grafički ili računski. Od svih neizravnih metoda danas se gotovo bez izuzetka upotrebljava visinska ili Hilaireova metoda (Franušić, 1989., str. 231.). Dva pravca koja se sijeku pod povoljnim kutom daju točku broda. Kad god je moguće, uzima se više pravaca položaja, a zapravo su dva optimuma. Tri pravca položaja triju nebeskih tijela gotovo istodobno i simetrično raspoređenih po

horizontu od  $360^\circ$  (Franušić, 1989., str. 231.). Za razlike azimuta potrebno je da budu što bliže  $120^\circ$ . Četiri pravca položaja četiriju nebeskih tijela opaženih gotovo istodobno i simetrično raspoređenih po horizontu od  $360^\circ$ . Za razlike azimuta potrebno je da budu što bliže  $90^\circ$ . S više od četiri nebeska tijela nije potrebno računati. Međutim, u praksi se uzima i više od četiri nebeska tijela, koja onda služe za rezervu ako neko od izabраниh tijela bude pogrešno izmjereno.

### **3.3. Utjecaj vremenskog razmaka na preciznost**

Sunce je često jedino nebesko tijelo koje se može opažati. Da bi se dobio i drugi pravac položaja, opaziti će se Sunce ponovno kad se azimut promijeni za barem  $30^\circ$ . Presjecište prvog pravca prenesenog za kurs i brzinu i drugog pravca daje položaj broda. Umjesto istog nebeskog tijela, za druge motrenje poslužiti će i neko drugo tijelo koje se u međuvremenu pojavilo, pa čak i azimut terestričkog objekta ili radio – azimut, kad je povoljna razlika azimuta, odnosno kad je manja od  $30^\circ$  (Nguyen, Im, Dao, 2017., str. 58.). Reduciranje prvog pravca položaja za mjesto drugog opažanja izvodi se grafički ili računski. Kako se to grafički radi, prikazano je na slici niže.



Slika 4. Utjecaj vremenskog razmaka na preciznost

Izvor: Franušić, B., *Astronomska navigacija 1*, Pomorski fakultet, Split, 1989., str. 54.

Iz prikazanog grafičkog prikaza, ako je u nekom trenutku zbrojeni položaj broda koji se približava luci bio Pz i ako se iz tog položaja opažalo nebesko tijelo i odredio pravac položaja p, tada će se brod nalaziti negdje na pravcu između točaka A i B (Franušić, 1989., str. 55.). Da bi se on približio luci i prošao na sigurnoj udaljenosti od točke P1 do P2, pravac položaja pomaknuti će se paralelno u položaj p'.

Brod će se okrenuti u smjer azimuta nebeskog tijela i prevalit će se udaljenost AA', odnosno BB'. Nakon toga brod će se postaviti u kurs koji je ujedno i smjer pravca položaja, pa će se tako sigurno približiti luci i prepoznati vrh lukobrana točno po pramcu, svakako uz pretpostavku da greške pravca položaja budu zanemarive, u protivnom će se vrh lukobrana pokazati malo ulijevo ili malo udesno od pramčanice (Franušić, 1989., str. 55.). Računski se to radi tako da se razlika visina  $dV_1$  prvog nebeskog tijela ispravi za neku korekturu koja se računa po formuli (Franušić, 1989., str. 234.):

$$dV_1 = D \cos L$$



D je udaljenost koju je brod u međuvremenu prevalio i ona se računa po formuli

$$D = (T_2 - T_1) b$$

Tu su  $T_{1,2}$  vremena opažanja,  $b$  je brzina broda, a  $L$  je pramčani kut, odnosno  $L = \omega_1 - K$ , gdje je  $\omega_1$  azimut prvog nebeskog tijela, a  $K$  je kurs. Ovaj račun je u praksi najčešći pri opažanju Sunca u vremenskom razmaku, ali se može primijeniti i na bilo koje drugo nebesko tijelo, kao na primjer ako se motre dvije zvijezde ili više njih kad se opažanje zbog bilo kojeg razloga oduljilo, pa se ne može uzeti da su opažanja izvršena u gotovo istom trenutku.

Kad je više od dva opažanja, sve se reducira za mjesto posljednjeg opažanja. Kad se opaža Sunce u vremenskom razmaku, pojavljuju se dva suprotstavljena zahtjeva. Prvo da vremenski razmak mora biti što kraći kako bi greška prijenosa pravca bila što manja i drugo je da vremenski razmak treba biti dovoljno velik da bi razlika azimuta bila najmanje  $30^\circ$ . što je razlika azimuta manja, to je moguća greška položaja broda veća (Nguyen, Im, Dao, 2017., str. 59.).

Optimum je u odabiru vremena opažanja kad Sunce najbrže mijenja azimut. To će biti simetrično od meridijana, lijevo i desno, odnosno istočno i zapadno. Najbolje je mjeriti Sunce  $30^\circ$  prije, u meridijanu i  $30^\circ$  nakon prolaska kroz meridijan, te sve svesti za mjesto posljednjeg opažanja. Da će promjena azimuta biti najbrža u blizini meridijana, vidi se iz formule

$$d\omega = ds \tan \omega \cos s$$

Drugim riječima, što je satni kut  $s$  manji, to je  $\cot s$  veći. Za  $s = 0$ , bit će  $\cot s = \pm \infty$ , što znači da azimut mijenja predznak, s istoka prelazi na zapad. Međutim, kad je  $s = 0^\circ$ , tada je i  $\omega = 0^\circ$  ili  $180^\circ$ , pa se provodi aproksimacija da je za male kutove funkcija tangens približno jednaka funkciji sinusa, to jest da je  $\tan \omega \approx \sin \omega$ , a prema formuli  $\sin \omega = \sin s \cos \delta \sec V$ . dalje, za tijelo u meridijanu vrijedi relacija:  $V = 90 - (\varphi - \delta)$ , pa se relacija može pisati u obliku:

$$d\omega = ds \frac{\cos \delta \cos s}{\sin(\varphi - \delta)}$$

Za zadane vrijednosti  $\varphi$  i  $\delta$  izraz ima maksimum za  $s = 0^\circ$ .

## 4. POSTUPAK ODREĐIVANJA POZICIJE SA DVA OPAŽANJA SUNCA U RAZMAKU VREMENA

### 4.1. Opis korištenog instrumenata (sekstant)

Sekstant je u biti vrlo točna, znanstvena verzija kutomjera. Dok kutomjeri mjere kutove između linija na listu papira do najbližeg stupnja, sekstant može mjeriti kutove između udaljenih objekata, s točnošću do najbližih  $0,002^\circ$  (Kos, Vranić, Zoović, 2010., str. 124.). Glavna razlika je u tome što sekstant koristi ogledala za mjerenje kuta između različitih snopova svjetlosti. Kada se pravilno nagnu zrcala sekstanta, mogu se vizualno prekriti dva objekta. U nebeskoj navigaciji, zvijezdu se mogu prekriti horizontom. U zemaljskoj navigaciji svjetionik se može prekriti lukobranom. Kako se sekstant koristi principom dvostrukog odraza, kut između njegovih zrcala izravno je proporcionalan kutu između objekata (Kos, Vranić, Zoović, 2010., str. 124.). Sekstant je u osnovi vrlo precizan, znanstveni kutomjer.

U modernoj navigaciji postoje dvije vrste sekstanta: plastični nautički sekstanti i metalni nautički sekstanti. U prošlosti su postojali različiti sekstanti koji su se koristili za različite zadatke pa ste imali tri dodatne potkategorije: nautički sekstanti, sekstanti u kutiji i zvučni sekstanti. Međutim, danas se sekstanti u kutiji i zvučni sekstanti više ne koriste jer se njihove funkcije mogu ostvariti drugim sredstvima, ili ih može izvesti standardni nautički sekstant (Kos, Vranić, Zorović, 2010., str. 124.). Posljedično, jedine verzije onih koje su još dostupne su povijesne metalne verzije. To u osnovi ostavlja samo izbor između plastičnog nautičkog sekstanta, metalnog nautičkog sekstanta, povijesnog metalnog sekstanta u kutiji ili povijesnog zvučnog metalnog sekstanta.

Plastični sekstant je nautički sekstant čiji je glavni materijal plastika. Oni su relativno nedavni u primjeni i razvoju, koji je omogućen napretkom u preciznosti i trajnosti tehnika proizvodnje plastike. Oni su još uvijek manje izdržljivi od metala, tako da će se plastični model s vremenom biti manje precizan. Metalni sekstant je nautički sekstant čiji je glavni građevinski materijal metal. Tradicionalno, svi su sekstanti izrađivani od metala jer je bilo moguće proizvesti točne metalne instrumente puno prije nego plastične verzije (Čumbelić, 1990., str. 63.). Nema sumnje da su točniji i izdržljiviji od plastičnih verzija. Sekstant u kutiji bio je vrsta metalnog sekstanta, koji se ponekad naziva i džepni sekstant. Kao što ime sugerira, bio je

mного manji od nautičkog sekstanta. Njegov poklopac kutije štiti bi osjetljivi mehanizam kada bi se nosio u džepu. U prošlosti je bilo popularno kada su svi navigatori nosili svoj sekstant jer je to značilo da uvijek imaju jedan pri ruci kada je to bilo potrebno. Zvučni sekstanti vrlo su slični nautičkim sekstantima, osim što su dizajnirani da ih koriste hidrografi. Ime su dobile jer su se koristili za potvrđivanje položaja olovnih sondiranja koja su vršena tijekom istraživanja obale.

Primarna upotreba sekstanta je mjerenje kuta između astronomskog objekta i horizonta u svrhu nebeske navigacije. Procjena ovog kuta, nadmorske visine, poznata je kao viziranje ili gađanje objekta, ili uzimanje nišana. Kut i vrijeme kada je izmjeren mogu se koristiti za izračunavanje linije položaja na pomorskoj karti - na primjer, promatranje Sunca u podne ili sjevernjače noću (na sjevernoj hemisferi) za procjenu zemljopisne širine (sa smanjenom vidljivošću) (Čumbelić, 1990., str. 63.). Promatranjem visine orijentira može se izmjeriti udaljenost, a ako se drži vodoravno, sekstant može mjeriti kutove između objekata za položaj na karti. Sekstant se također može koristiti za mjerenje lunarne udaljenosti između Mjeseca i drugog nebeskog objekta (kao što je zvijezda ili planet) kako bi se odredilo srednje vrijeme po Greenwichu, a time i zemljopisna dužina.

Sekstant funkcionira podešavanjem kuta između dva uzastopna zrcala kako bi se slika dvaju objekata preklapala jedna preko druge. Kutna udaljenost između dvaju objekata tada se može pronaći očitavanjem kuta između dva zrcala s pomoću načela sekstanta. Načelo po kojem radi sekstant poznato je kao načelo sekstanta ili načelo dvostrukog odraza: „Kada se zraka svjetlosti reflektira od dva zrcala uzastopno, kut između upadne zrake i reflektirane zrake dvostruko je veći od kuta između ogledala.” (Čumbelić, 1990., str. 63.). U sekstantu, zrcalo horizonta je ekvivalentno prvom zrcalu, a zrcalo indeksa je ekvivalentno drugom zrcalu.

## **4.2. Azimut**

Azimut je kut između sjevera i nebeskog tijela, mjeren u smjeru kazaljke na satu oko horizonta promatrača (Sunce, mjesec). Odlučuje o kursu nebeskog tijela. Na primjer, nebesko tijelo okrenuto prema sjeveru ima azimut  $0^\circ$ , jedno prema istoku  $90^\circ$ , jedno prema jugu  $180^\circ$ , a jedno prema zapadu  $270^\circ$  (Nguyen, Im, Dao, 2017., str. 57.). U sfernom koordinatnom sustavu azimut je kutna mjera. Azimut je kut koji čine predviđeni vektor i referentni vektor na referentnoj ravnini. Referentna ravnina projicira se okomito s vektorom od točke interesa do

promatrača (ishodište). Azimut je horizontalna orijentacija zvijezde ili drugog astronomskog objekta na nebu kada se koristi kao nebeska koordinata. Točka interesa je zvijezda, referentna ravnina je lokalno područje oko promatrača na Zemljinoj površini (na primjer, kružno područje s polumjerom od 5 km na razini mora), a referentni vektor pokazuje sjever. Na vodoravnoj osi, azimut je kut koji čine vektor sjevera i vektor zvijezde. Azimut se općenito izražava kao broj stupnjeva (°).

Postoji nekoliko konvencija za solarni azimut, međutim, tradicionalno se definira kao kut između linije prema jugu i sjene koju baca okomiti pravac na Zemlju. Ova konvencija kaže da je kut pozitivan ako je sjena istočno od juga i negativan ako je zapadno od juga. Na primjer, na istok bi bio 90°, a na zapad -90°. Druga je konvencija obrnuto, također ima ishodište na pravom jugu, ali mjeri kutove u smjeru kazaljke na satu, tako da je pravi istok sada negativan, a zapad sada pozitivan.

Sljedeće formule pretpostavljaju konvenciju u smjeru kazaljke na satu prema sjeveru. Kut solarnog azimuta može se izračunati do dobre aproksimacije sljedećom formulom, međutim kutove treba tumačiti pažljivo jer inverzni sinus, tj.  $x = \sin^{-1} y$  ili  $x = \arcsin y$ , ima više rješenja, od kojih će samo jedno biti ispravno (Nguyen, Im, Dao, 2017., str. 57.).

Sljedeće formule također se mogu koristiti za aproksimaciju kuta solarnog azimuta, ali ove formule koriste kosinus, tako da će kut azimuta prikazan na kalkulatoru uvijek biti pozitivan i treba ga tumačiti kao kut između nula i 180 stupnjeva kada je satni kut,  $h$ , je negativan (jutro) i kut između 180 i 360 stupnjeva kada je satni kut,  $h$ , pozitivan (poslijepodne). (Ove dvije formule su ekvivalentne ako se pretpostavi formula aproksimacije "kuta visine Sunca") (Nguyen, Im, Dao, 2017., str. 58.).

$$\sin \varnothing_s = \frac{-\sin h \cos \delta}{\sin \theta_s}$$

Dakle, praktično govoreći, azimut kompasa koji je praktična vrijednost koja se svugdje koristi (na primjer u zrakoplovnim kompanijama kao tzv. kurs) na kompasu (gdje je sjever 0 stupnjeva, istok 90 stupnjeva, jug 180 stupnjeva i zapad 270 stupnjeva) može se izračunati kao (Nguyen, Im, Dao, 2017., str. 60.):

$$\cos \cos \varnothing_s = \frac{\sin \sin \delta \cos \cos \Phi - \cos \cos h \cos \cos \delta \sin \sin \Phi}{\sin \sin \theta_s}$$

$$\cos \cos \varnothing_s = \frac{\sin \sin \delta - \cos \cos \theta_s \sin \sin \Phi}{\sin \sin \theta_s \cos \cos \Phi}$$

Formule koriste sljedeću terminologiju (Nguyen, Im, Dao, 2017., str. 60.):

$\phi_s$  je kut solarnog azimuta

$\theta_s$  je solarni zenitni kut

$h$  je satni kut, u lokalnom solarnom vremenu

$\delta$  je trenutna deklinacija Sunca

$\Phi$  je lokalna geografska širina

Nadalje, dijeljenje gornje formule sinusa s formulom prvog kosinusa daje formulu tangensa koja se koristi u Nautičkom almanahu.

### 4.3. Priprema mjerenja

Nakon što su prikupljeni svi podatci, procijenjena zemljopisna širina i dužina, deklinacija, lokalni satni kut promatranih nebeskih tijela (zvijezda, Sunca, mjeseca i planeta) i očitavanje sekstanta (nadmorska visina), potrebno je izračunati najmanje četiri podatka. Koristit će se za iscertavanje linija položaja na pomorskoj karti, radnom listu za iscertavanje ili jednostavnom milimetarskom papiru za određivanje položaja broda.

Podaci koji su potrebni: stvarna visina, LHA/deklinacija, izračunata (procijenjena) visina i azimut. Može se koristiti priložena jednostavnu excel datoteku da provjeru ručnog izračuna (Celestial Navigation, 2023.).

Primjer

Dana 17. siječnja 2016. časnik palube snima i bilježi sljedeći prizor (Celestial Navigation, 2023.):

Sunce (donji ekstremitet) – visina sekstanta  $29^\circ 53,5'$  u 12 h 23 m 45 s U.T.

DR položaj: zemljopisna širina 38°34,2' sjeverno – zemljopisna dužina 005°32,7' istočno.

Visina oka iznad razine mora: 2,5 metara.

Na sekstant utječu pogreške.

Ispravci: pogreška instrumenta +0,5' (ekscentricitet) i pogreška indeksa -1,4'.

Najprije se pretvara visinu sekstanta u opaženu visinu koristeći sljedeći izračun:

Sun		
2,5		Dip / Height of Eye in meters
16,3'		Semi-Diameter *
°	,	
29°	53,5'	Sextant Altitude
	,5'	instrument error **
	-1,4'	index error
<hr/>		
29°	52,6'	Observed Altitude
	-2,8'	dip
	-1,7'	refraction
	,1'	parallax ( Sun )
	16,3'	semidiameter ( Sun )
<hr/>		
30°	4,5'	True Altitude

Semi-Diameter *	Sun : lower limb
Lower limb observation: the Semi-Diameter should be added ( positive )	January + 16, 3
	February + 16, 2
Upper limb observation: the Semi- Diameter should be subtracted (negative)	March + 16, 1
	April + 15, 9
	May + 15, 8
	June + 15, 7
	July + 15, 7
	August + 15, 8
	September + 15, 9
	October 16,

	+	0
November	+	16,2
December	+	16,3

Iz Nautičkog almanaha – 17. siječnja 2016.:

u 12.00 U.T. :

GHA 357° 31,2 v korekcija: -0,2'

Deklinacija 20° 47,5' S d korekcija: 0,5'

Sun				
		G.H.A.		declination
h		°	'	°
12		357	31,2	-20 47,5 S
13	12	31,0		47,0
14	27	30,8		46,6
		v =	-0,2	d = 0,5'

LHA i deklinacija se izračunava koristeći LHA – deklinacija:

Sun
LHA calculation

Tab GHA	357°	31,2'	
minutes of increment	23 m	45 s	
v correction factor		-2'	
assumed longitude	5°	32,7'	e

	degrees	minutes
GHA	357°	31,2'
increment	5°	56,3'
v pp		-,1'



final GHA	3°	27,4'	
assumed longitude	5°	32,7'	e

LHA	9°	,1'	
Pe/w =	9°	,1'	W

<b>Sun</b>
Declination calculation

Tabulated Dec.	20°	47,5'	n
minutes of increment	23 m	45 s	
<i>d</i> correction factor		,5'	

Declination	20°	47,5
d correction factor		0,2

Declination	20°	47,7'	N
-------------	-----	-------	---

Rješavaju se formule astronomske navigacije računajući procijenjenu visinu i azimut s pomoću sljedećeg:

Altitude & Azimuth  
calculations  
solutions of the navigation triangle

Latitude	=	38°	34,2'	n
Declination	=	20°	47,3'	s
L.H.A.	=	9°	,1'	
Polar Angle E/W		9°	,1'	w
computed altitude		30°	2,6'	
Azimuth		189,7°		

Altitude

$$\text{asin}[\sin(\text{lat}) * \sin(\text{dec}) + \cos(\text{lat}) * \cos(\text{dec}) * \cos\text{LHA}]$$

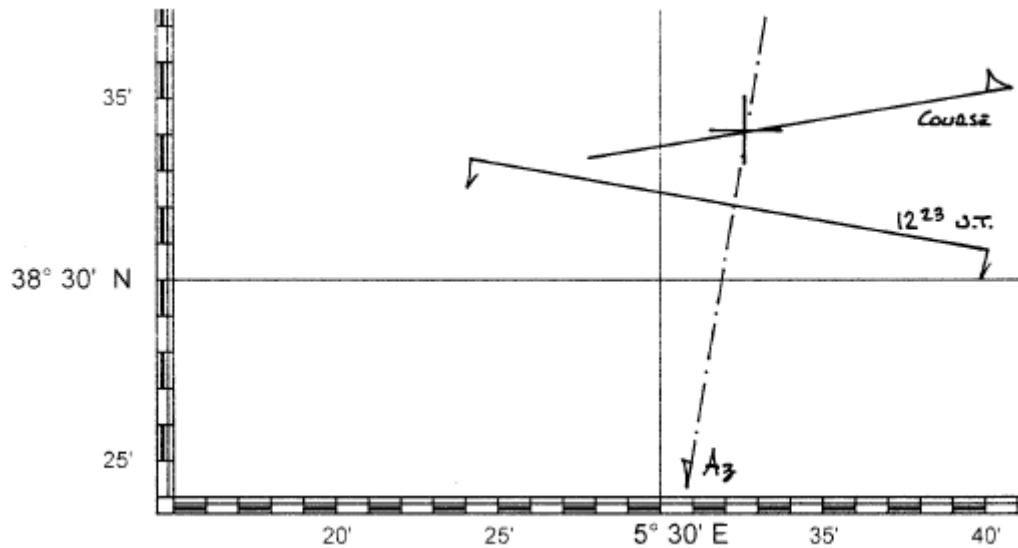
sine latitude		0,62347
sine declination		-0,35492
	multipl.	-0,22128
cosine latitude		0,78185
cosine declination		0,93490
cosine LHA		0,98768
	multipl.	0,72194
	algebr. sum	0,50066
computed altitude		30,044°

Azimuth tables :

AT1	-50,3
AT2	-24,3
AT1 + AT2	-74,6
Z	9,7

Razlika nadmorske visine = prava nadmorska visina – izračunata nadmorska visina:  $30^{\circ} 04,5'$   
 $- 30^{\circ} 02,6' = + 1,9'$

Sada se može nacrtati graf:



Posljednji izračun omogućuje dobivanje zemljopisne širine nakon umetanja visine i deklinacije meridijana.

Primjer:

Prava nadmorska visina na prolazu meridijana od  $58^{\circ} 43,6'$  i deklinaciju od  $23^{\circ} 04,9'$  N: geografska širina je  $54^{\circ} 23,3'$  sjeverno.

*Meridian Passage  
( Noon Sight )*

a quick method of getting the latitude

Declination	=	23°	4,9'	n
-------------	---	-----	------	---

True Altitude	=	58°	43,6'
---------------	---	-----	-------

Latitude		54°	21,3'	n
----------	--	-----	-------	---

Astronomska navigacija – formule nautičke astronomije

Formula nadmorske visine:  $\sin \text{visina} = (\sin \text{geografska širina} * \sin \text{deklinacija}) + (\cos \text{geografska širina} * \cos \text{decl} * \cos \text{polarni kut})$

Formula azimuta:  $\cotg \text{azimut} = (\cotg (90\text{-deklinacija}) * \cos \text{širina} * \operatorname{cosec} \text{polarni kut}) - (\sin \text{širine} * \cotg \text{polarni kut})$

## 5. BUDUĆNOST NAVIGACIJE

### 5.1. Pomorska navigacija i e-navigacija

Pomorska navigacija je planiranje, upravljanje i usmjeravanje plovidbe broda. Praksa pomorske navigacije uključuje dobre pomorske vještine, stručno znanje i prosudbu, primjena znanosti i tehnologije. Pomorska navigacija bavi se sigurnošću plovidbe u vodama stalnim pregledom učinkovitosti trenutnih sigurnosnih, navigacijskih i upravljačkih mjera te identificiranjem dodatnih ili poboljšanih mjera koje bi mogle biti potrebne u budućnosti (Marine navigation, 2023.). Navigacijske usluge pružaju brodovima mogućnost sigurne plovidbe, a usluge uključuju vizualna i elektronička pomagala za navigaciju, sustave za usmjeravanje brodova i sustave za izvješćivanja brodova. Pružanje navigacijskih usluga financira se iz pristojbe koja se naplaćuje u pomorskoj industriji (Marine navigation, 2023.).

E-navigacija je inicijativa koju vodi Međunarodna pomorska organizacija (IMO) koja ima za cilj uskladiti pomorske navigacijske sustave i pružiti informacije u elektroničkim formatima timu broskog mosta (Marine navigation, 2023.). Također ima za cilj pojednostaviti način na koji pomorske vlasti, agencije i drugi dionici prikupljaju i razmjenjuju informacije povezane s plovidbom. Globalno usklađene pomorske informacijske usluge bit će dio e-navigacije, što će pridonijeti povećanju sigurnosti i učinkovitosti brodarstva. Tri područja koja su dio budućnosti e-navigacije se odnose na dizajn navigacijske opreme usmjeren na čovjeka, razvoj IMO smjernica o standardizaciji funkcija i prikaza navigacijske opreme, te usluge pozicioniranja, navigacije i mjerenja vremena.

Na temelju zajedničkih međunarodnih napora pod vodstvom Australije, IMO je 2015. odobrio Smjernicu o osiguranju kvalitete softvera i centre za dizajn usmjeren na čovjeka za e-navigaciju. IMO razvija nekoliko rezultata e-navigacije (Marine navigation, 2023.). Međunarodna udruga za pomorsku pomoć u navigaciji i svjetioničarska tijela (IALA) unaprjeđuje obalne aspekte e-navigacije. Konceptom e-navigacije upravlja IMO kao organizacija odgovorna za uspostavljanje obveznih standarda za poboljšanje sigurnosti života na moru, pomorske sigurnosti i zaštite morskog okoliša, kao i globalne nadležnosti za brodarstvo (Marine navigation, 2023.).

Organizacija definira e-navigaciju kao usklađeno prikupljanje, integraciju, razmjenu, prezentaciju i analizu pomorskih informacija na brodu i kopnu elektroničkim sredstvima za poboljšanje navigacije od sidra do sidra i povezanih usluga za sigurnost i zaštitu na moru i zaštitu morskog okoliša. E-navigacija je namijenjena zadovoljavanju sadašnjih i budućih korisničkih potreba brodarstva kroz harmonizaciju pomorskih navigacijskih sustava i pratećih obalnih usluga. Očekuje se da će osigurati digitalne informacije i infrastrukturu za dobrobit pomorske sigurnosti, zaštite i zaštite morskog okoliša, smanjenje administrativnog opterećenja i povećanje učinkovitosti pomorske trgovine i prometa.

E-navigacija nije statičan koncept, njezin će razvoj biti u tijeku kako se budu razvijali zahtjevi korisnika i tehnologija. Organizacija je razvila Plan provedbe strategije e-navigacije (SIP), uvodeći viziju e-navigacije i pružajući industriji usklađene informacije kako bi se započelo s dizajniranjem proizvoda i usluga u skladu s rješenjima e-navigacije (How to navigate, 2023.). Glavni cilj SIP-a za e-navigaciju je implementacija sljedećih pet rješenja, a to su poboljšana, usklađena i korisniku prilagođena konstrukcija mosta, sredstva za standardizirano i automatizirano izvješćivanje, poboljšana pouzdanost, otpornost i cjelovitost opreme mosta i navigacijskih informacija, integracija i prezentacija dostupnih informacija u grafičkim prikazima primljenim putem komunikacijske opreme i poboljšana komunikacija portfelja VTS (Vessel Traffic Service) usluga (nije ograničeno na VTS) (How to navigate, 2023.).

Kako se potrebe korisnika razvijaju i uvodi nova tehnologija, druga rješenja za e-navigaciju mogu se uključiti u SIP za e-navigaciju, prema potrebi. SIP za e-navigaciju identificirao je radnje i zadatke potrebne za napredak u razvoju i implementaciji pet rješenja za e-navigaciju te je sadržavao i predloženi popis pomorskih usluga koje će se prijeći s konvencionalnih metoda prijenosa na suvremene digitalne tehnologije putem pružanja i razmjene relevantnih informacija i podataka u usklađenom i jedinstvenom obliku.

## **5.2. Prednosti i ograničenja pomorske navigacije**

Prijelaz s papirnatih karata na ECDIS (Electronic Chart Display and Information System) ima neke dobre i neke loše strane. Karte su sada daleko dostupnije nego prije, što je bonus s putovanjima u zadnji čas. U prosjeku su i jeftiniji jer više ne postoji potreba za nabavom, otpremom i preuzimanjem papirnatih verzija. Osim toga, podaci koje je potrebno izračunati

(kao što je udaljenost prijeđenog puta, prijeđena udaljenost, prosječna brzina) sada se automatski pružaju (Herwadkr, 2019.).

To znači da je položaj plovila u stvarnom vremenu uvijek poznat korištenjem kombinacije ECDIS-a, GPS-a i radara, što poboljšava sposobnost odgovora na moguće nesreće. ECDIS također nudi opcijsku mogućnost postavljanja alarma, uz one obavezne. Nadalje, velik dio odgovornosti navigatora – ispravljanje papirnatih karata prema potrebi više nije nužno, jer se elektronske karte ažuriraju tjedno (Buckles, 2023.).

Međutim, navigatori se moraju čuvati od iskušenja da se pretjerano oslanjaju na elektronska pomagala nauštrb podataka iz stvarnog svijeta. ECDIS nije nepogrešiv, niti će pružiti podatke o položaju ako je plovilo onemogućilo svoj AIS (Valčić, Mrak, Gulić, 2016., str. 80.). Još uvijek nema zamjene za osnove kao što su držanje straže i nadzor radara. ECDIS nije zamjena, već pomoćnik. Oslanja se na ulaze i, kao kod svih takvih sustava, ako se učitaju neispravne informacije, izlaz će također biti netočan.

Također postoji opasnost da će bitne vještine biti narušene nedostatkom prakse i da se nenamjerno mogu unijeti netočni sigurnosni parametri, čime se plovilo dovodi u opasnost. Previše opcijskih alarma može dovesti do gluhoće alarma (pri čemu učestalost aktiviranja alarma potkopava njihov učinak), sam ECDIS može biti podložan vremenskim kašnjenjima i nisu svi sustavi isti, što je dovelo do potrebe za obukom specifičnom za tip u nekim slučajeva. Ovo je skupo, dugotrajno i nezgodno.

## ZAKLJUČAK

Astronomska navigacija ostvaruje svoju svrhu korištenjem kutnih mjerenja između nebeskih tijela i vidljivog horizonta za lociranje položaja, bilo na kopnu, u zraku ili na moru. Obično se koristi nebeska navigacija s pomoću Sunca i horizonta u odnosu na površinu zemlje, pružajući različite metode određivanja položaja, od kojih je jedna jednostavna metoda, a odnosi se na promatranje točna visina Sunca i točno vrijeme te visine, odnosno najviše točka Sunca iznad horizonta s pozicije promatrača u bilo kojem pojedinom danu. Astronomska navigacija ima dugu povijest korištenja, s obzirom na to da su se suvremeni instrumenti počeli koristiti u novijoj povijesti. Stoga je poznavanje astronomske navigacije bio vrlo važan način određivanja položaja i orijentacije u prostoru. Za određivanje pozicije broda metodama astronomske navigacije se najčešće koristi Sunce ili mjesec kao nebeska tijela s obzirom na to da su najvidljivija.

Određivanje pozicije vrši se određivanjem kuta između horizonta i položaja Sunca, te mjerenjem kutova, nakon čega se crtaju krugovi i određuju moguće točke položaja. Računanje geografske pozicije vrši se s pomoću dviju metoda, izravne i neizravne. Izravna metoda se odnosi na računanje položaja broda s pomoću sustava jednadžbi, dok se neizravne metode odnose na računanje geografskih koordinata položaja broda u kojima se to ostvaruje posredno kroz grafičke ili računске veličine. Najčešće korišteni instrument pri određivanju pozicije broda je sekstant koji može izmjeriti kutove između udaljenih objekata s vrlo velikom točnošću.

Primarna upotreba sekstanta je mjerenje kuta između astronomske objekta i horizonta u svrhu nebeske navigacije. Kut i vrijeme kada je izmjeren mogu se koristiti za izračunavanje linije položaja na pomorskoj karti. Azimut u nebeskoj navigaciji služi za fiksiranje astronomske pozicije broda, u kojoj bi se trebao primijeniti azimut nebeskih tijela umjesto korištenja tradicionalne nadmorske visine. Ovom promjenom predložena metoda može prevladati nedostatke drugih metoda koje se ne mogu koristiti tijekom noći. Kroz praktičan primjer pokazan je postupak mjerenja i matematički izračun. Pomorska navigacija je disciplina koja uključuje planiranje, upravljanje i usmjeravanje plovidbe brodova. Praksa pomorske navigacije uključuje dobre pomorske vještine, stručno znanje i prosudbu, primjena znanosti i tehnologije.



Suvremena tehnologija omogućuje bolju i kvalitetniju pomorsku navigaciju koja s modernim tehničkim rješenjima omogućuje harmonizaciju cijelog pomorskog sustava na globalnoj razini. Pomorska navigacija ima brojne prednosti i nedostatke, na čije nedostatke odgovara suvremena tehnologija koja nedostatke pretvara u prednosti. Modernizacija i osuvremenjivanje pomorstva stvara ekonomske prednosti kroz smanjenje troškova, međutim pretjerano oslanjanje na suvremenu tehnologiju dovodi do nepoznavanja osnova određivanje položaja bordsa s pomoću astronomske navigacije, a nedostatak takve prakse stvara mogućnost nepravilnog određivanja položaja plovila.

## LITERATURA

- 1) Benković, F., et. al., Terestrička i elektronska navigacija, Hidrografski institut, Split, 1986.
- 2) Buckles, S., The Different Types of Marine Navigation, Marine navigation, <https://improvesailing.com/navigation/types>, 14. rujna 2023.
- 3) Celestial navigation: how to determine your position by stars and other space objects, <https://windy.app/textbook/celestial-navigation.html>, 18. rujna 2023.
- 4) Čumbelić, P., Astronomska navigacija II, Pomorski fakultet, Dubrovnik, 1990.
- 5) Davidson, L., How Celestial Navigation Changed Maritime History, <https://www.historyhit.com/how-celestial-navigation-changed-maritime-history/>, 20. rujna 2023.
- 6) Franušić, B., Astronomska navigacija 1, Pomorski fakultet, Split, 1989.
- 7) Herwadkar, N., Pros and Cons of ECDIS Or Paperless Navigation Of Ships, Marine insight, 2019., <https://www.marineinsight.com/marine-navigation/pros-and-cons-of-ecdis-or-paperless-navigation-of-ships/>, 16. rujna 2023.
- 8) Klarin, M., Astronomska navigacija II, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- 9) Kos, S., Vranić, D., Zoović, D., Terestrička i elektronička navigacija, Pomorski fakultet, Rijeka, 2010.
- 10) Marine navigation, How to navigate, <https://www.discoverboating.com/resources/marine-navigation-how-to-navigate-a-boat>, 14. rujna 2023.
- 11) Nautical Almanac, Celestial navigation, <https://www.nauticalalmanac.it/en/navigation-astronomy/celestial-navigation>, 15. rujna 2023.
- 12) Nguyen, V., Im, N., Dao, D., Azimuth method for ship position in celestial navigation, International Journal of e-Navigation and Maritime Economy, vol. 7., 2017.
- 13) The Australian Maritime Safety Authority, Marine navigation, <https://www.amsa.gov.au/safety-navigation/navigation-systems/navigation-services>, 10. rujna 2023.
- 14) Valčić, S., Mrak, Z., Gulić, M., Analysis of advantages and disadvantages of existing maritime communication systems for data exchange, Scientific Journal of Maritime Research, Pomorski fakultet, Rijeka, 2016.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Osnove astronomske navigacije	7
Slika 2. Određivanje položaja s pomoću dviju točki	8
Slika 3. Razlika očitavanja stvarnog i pretpostavljenog sekstanta	9
Slika 4. Utjecaj vremenskog razmaka na preciznost	14