

Kronometar i vrijeme u astronomskoj navigaciji

Hepp, Robert

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:187:732786>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-16**



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

ROBERT HEPP

**KRONOMETAR I VRIJEME U ASTRONOMSKOJ
NAVIGACIJI**

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2024.

SVEUČILIŠTE U RIJECI

POMORSKI FAKULTET

**KRONOMETAR I VRIJEME U ASTRONOMSKOJ
NAVIGACIJI**

**CHRONOMETER AND TIME IN ASTRONOMICAL
NAVIGATION**

ZAVRŠNI RAD

BACHELOR THESIS

Kolegij: Astronomska navigacija

Mentor: doc. dr. sc. Đani Šabalja

Student: Robert Hepp

Studijski smjer: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112031033

Rijeka, rujan 2024.

Student: Robert Hepp

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112031033

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom

Kronometar i vrijeme u astronomskoj navigaciji

izradio samostalno pod mentorstvom doc. dr. sc. Đanija Šabalje.

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

Student



(potpis)

Robert Hepp

Student: Robert Hepp

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112031033

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 - autor



(potpis)

Robert Hepp

SAŽETAK

U ovom radu objašnjava se važnost izuma kronometra u pomorskoj navigaciji te daje kratak osvrt na njegov razvoj kroz povijest. Kronometar je izrazito precizan sat koji pokazuje srednje vrijeme meridijana Greenwich. Poznavanjem srednjeg griničkog vremena može se astronomskim opažanjima odrediti zemljopisna dužina broda što je do nastanka kronometra bio nerješiv problem. Ovo je bio ogroman povijesni pomak koji je promijenio tijek daljnjeg razvoja pomorstva i putovanja svjetskim morima i oceanima. Početkom 20. stoljeća i razvojem novih tehnologija, putovanja brodom i određivanje njegova položaja obavlja se uz pomoć uređaja poput radara te GPS¹ sustava. Kronometar ostaje kao podsjetnik na početke preciznog računanja pozicije i vremena.

Nadalje, u ovom je radu dan kratak osvrt na pojam vremena te kako se ono mjeri u astronomskoj navigaciji.

Ključne riječi: kronometar, pomorstvo, vrijeme u astronomskoj navigaciji.

SUMMARY

In this paper, the importance of the invention of the chronometer in maritime navigation is explained, along with a brief overview of its historical development. The chronometer is an extremely precise clock that shows the mean time of the Greenwich meridian. By knowing Greenwich Mean Time, the geographical longitude of a ship can be determined through astronomical observations, which was an unsolvable problem before the chronometer was developed. This was a significant historical shift that changed the course of further maritime development and travel across the world's seas and oceans. At the beginning of the 20th century, with the development of new technologies, ship travel and position determination were carried out using devices such as radar and GPS systems. The chronometer remains as a reminder of the beginnings of precise position and time calculations. Furthermore, this paper provides a brief review of the concept of time and how it is calculated in astronomical navigation.

Keywords: chronometer, seafaring, time in celestial navigation.

¹ Globalni položajni sustav (akronim GPS) je satelitski radionavigacijski sustav za određivanje položaja na Zemlji ili u njezinoj blizini. Sustav omogućuje korisniku određivanje svih 3 koordinata njegova trenutnog položaja u jedinstvenom svjetskom (globalnom) koordinatnom sustavu.

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	II
SUMMARY	II
SADRŽAJ	III
1. UVOD	1
2. KRONOMETAR U NAVIGACIJI.....	2
2.1. KRONOMETAR KROZ POVIJEST	2
2.2. ODREĐIVANJE ZEMLJOPISNE DUŽINE POLOŽAJA BRODA.....	7
2.2.1. Metoda lunarne udaljenosti	8
2.2.2. Određivanje zemljopisne dužine s pomoću kronometra	10
2.3. UTJECAJ TEHNOLOŠKIH INOVACIJA NA BUDUĆNOST UPORABE KRONOMETRA	11
3. DIJELOVI KRONOMETRA I KARAKTERISTIKE.....	12
3.1. GLAVNI DIJELOVI	12
3.2. STANJE I HOD KRONOMETRA	14
4. VRIJEME U ASTRONOMSKOJ NAVIGACIJI	16
4.1. RAZNE VRSTE DANA.....	16
4.2. PRAVI SUNČAN DAN I PRAVO VRIJEME	18
4.3. SREDNJI SUNČAN DAN I SREDNJE VRIJEME.....	18
4.4. JEDNADŽBA VREMENA.....	19
4.5. SREDNJE VRIJEME PO GREENWICHU	20
4.6. VRIJEME PREMA SATU	20
5. SUVREMENA NAVIGACIJA.....	21
5.1. GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS).....	22
5.2. OSTALI NAVIGACIJSKI SUSTAVI	25
6. ZAKLJUČAK.....	27

LITERATURA	29
KAZALO KRATICA	32
POPIS SLIKA.....	33

1. UVOD

Tema ovog završnog rada je predstaviti i razjasniti sve karakteristike kronometra, njegovu povijest, evoluciju, važnost i utjecaj na napredak pomorske navigacije.

Problem istraživanja je utvrditi u koliko je kronometar utjecao na daljnji razvoj pomorstva, međunarodne trgovine, osvajanja novih teritorija.

Cilj je usporediti doprinos kronometra pomorstvu tada i moderne tehnologije u pomorstvu danas.

Rad je strukturiran u sedam poglavlja. Prvo poglavlje Uvod, uvodi čitatelja u temu, problem i cilj rada. Drugo poglavlje Povijest kronometra u navigaciji, objašnjava vrijeme uoči industrijske revolucije i nastanka kronometra, objašnjava kako su pomorci plovili s pomoću mjerenja longitudinalnog položaja, te nastanak „morskih satova“ Johna Harrisona H1, H2, H3, H4 i H5. Treće poglavlje govori o tehnološkim napredcima i budućnosti, nastanku navigacijskih sustava, poput GPS-a i ostalih navigacijskih sustava (GLONASS², GALILEO³). Četvrto poglavlje, Astronomska navigacija objašnjava kakva je to metoda određivanja položaja plovila bila prije pojave kronometra i modernih sustava. Objašnjava srednje vrijeme po Greenwichu, vrijeme prema satu, vremenske dijagrame te korištenje Sunca, Mjeseca i zvijezda u navigaciji. U petom poglavlju objašnjava se kronometar kao ključni instrument u pomorstvu, opisuju se njegove funkcije i važnost, ali i utjecaj na razvoj pomorstva i globalne trgovine. U šestom poglavlju opisuje se utjecaj tehnoloških inovacija na budućnost uporabe kronometra, a u sedmom posljednjem poglavlju autor daje vlastiti zaključak na cjelokupni rad.

² GLONASS je ruski satelitski navigacijski sustav nastao kao odgovor na američki sustav poznat kao GPS. Program je započet još 80-ih godina, u doba Sovjetskog Saveza, ali zbog teškog gospodarskog stanja i kasnijeg raspada SSSR-a, program se nije dalje razvijao.

³ GALILEO je europski satelitski navigacijski sustav nastao kao odgovor na američki sustav poznat pod oznakom GPS.

2. KRONOMETAR U NAVIGACIJI

2.1. KRONOMETAR KROZ POVIJEST

Nizozemski astronom i matematičar, Rainer Gemma Frisius prvi je u 16. stoljeću predložio računanje zemljopisne dužine uz pomoć točnog sata koji bi pokazivao točno vrijeme nekog meridijana. To bi se vrijeme onda usporedilo s mjesnim vremenom i tako došlo do zemljopisne dužine.⁴

U periodu prije industrijske revolucije, jedina koja je pratila vrijeme bila je Crkva. Sunčani satovi postoje od davnina, ali mehanički satovi, koji su prvi put izumljeni u Europi u srednjem vijeku, uvezeni su u Britaniju kako bi crkve mogle nuditi svoje usluge u određeno vrijeme i kako bi redovnici i redovnice mogli rasporediti svoje dane u srednjovjekovnom samostanu. Do 16. stoljeća satovi su postajali sve sofisticiraniji, a s vremenom su minijaturizirani u džepne satove. Jedno od temeljnih načela po kojima bi se danas mjerila uspješnost sata još uvijek je nedostajalo: točnost u mjerenju vremena tijekom razdoblja tjedana i mjeseci. Povrh toga, ideja o univerzalnom vremenu još uvijek je bila samo teoretski san – niti jedan grad nije imao satove koji su pokazivali točno vrijeme u istom trenutku.

Urari su usavršavali satove kroz 16. i 17. stoljeće. Najbolji od njih bili su veliki i stvarno točni od kada je u mehanizam ugrađeno njihalo. Galileo Galilei (1564.-1642.) bio je prvi koji je prepoznao važnost njihala u održavanju točnosti sata, ali prvi radni primjer izumili su Christiaan Huygens (1629.-1695.) i Salomon Coster (oko 1620.-1659.) oko 1657. Prije sata s njihalom, većina je satova gubila oko 15 minuta svaki dan i stoga su se morali stalno ponovno podešavati.

Nasuprot tome, najbolji satovi s klatnom gubili su samo između 10 i 15 sekundi svaki dan, što je ogroman napredak, ali još uvijek nedovoljno dobar za pomorce. Precizan sat koji bi se mogao koristiti na moru, gdje je visak bio beskoristan s obzirom na kretanje broda, još uvijek je bila velika praznina koju je trebalo popuniti u tehnologiji. Izrada malog ručnog sata bila je nužna i Huygens ga je napravio sredinom 1670-ih godina koristeći novu ideju opruge za ravnotežu, ali ovaj uređaj još uvijek nije bio dovoljno precizan za navigacijske svrhe.

⁴ M. Klarin, Astronomska navigacija, 1995

Kronometar prikladan za plovidbu izradio je John Harrison kao rezultat višegodišnjeg rada. Harrison je pristupio izradi svog pomorskog kronometra putem natjecanja koje je sponzorirala britanska vlada 1714. godine, a koje je organizirao Odbor za zemljopisnu dužinu.

Razlog za osnivanje Odbora za zemljopisnu dužinu bio je problem nemogućnosti određivanja zemljopisne dužine broda, a povod za istim je bio nasukavanje četiri broda iz flote viceadmirala Sir Cloudesleya Shovella kod otočja Scilly (jugozapadna Engleska) 1707. godine, što je rezultiralo gubitkom života gotovo 2000 ljudi. Odbor je osnovala kraljica Ana, a Zakon o zemljopisnoj dužini iz 1714. godine imenovao je 24 povjerenika za zemljopisnu dužinu, ključne osobe iz politike, mornarice, astronomije i matematike. Međutim, Odbor se nije sastao sve do najmanje 1737. godine, kada je porastao interes za pomorski kronometar Johna Harrisona.

Odbor je dodjeljivao vrijedne nagrade onima koji su mogli dokazati radni uređaj ili metodu za određivanje zemljopisne dužine. Osim toga, Odbor je imao diskrecijsko pravo pružati financijsku podršku onima koji su radili na rješenju.

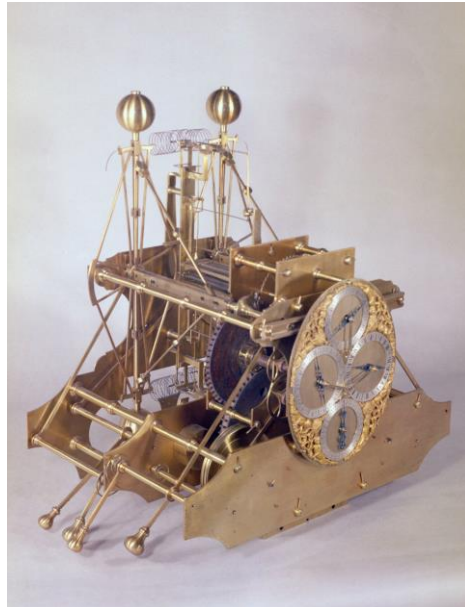
Natjecanje je organizirano kako bi se motiviralo izumitelje da osmisle točan sat. Prigodna novčana nagrada od 20,000 britanskih funti (više od 3,5 milijuna dolara danas) predviđena je za pobjednika.

Harrisonov prvi pomorski kronometar, nazvan H1, stvoren je između 1730. i 1735. godine (Slika 1). Prilično veliki sat radio je bez utjecaja gravitacije zahvaljujući svojim pokretnim dijelovima koji su bili uravnoteženi i kontrolirani oprugom. Članovi Kraljevskog društva bili su dovoljno impresionirani s H1 verzijom da ga isprobaju na moru i to su i učinili na brodu HMS Centurion. Pokazalo se da je sat bio razočaravajući na plovidbi do Lisabona. No, isti sat se koristio i na povratku, na brodu HMS Orford kada se pokazao mnogo točniji. Harrison je ovim izumom bio na pravom putu, a vlada mu je, kao poticaj, dala 500 funti za daljnje istraživanje i razvoj.

Harrisonu je trebalo još jedanaest godina da poboljša kronometar i nakon nekog vremena nastala je H2 verzija (Slika 2). Bio je veći i teži od H1 i imao je okrugle poluge za bolju stabilnost mehanizma.

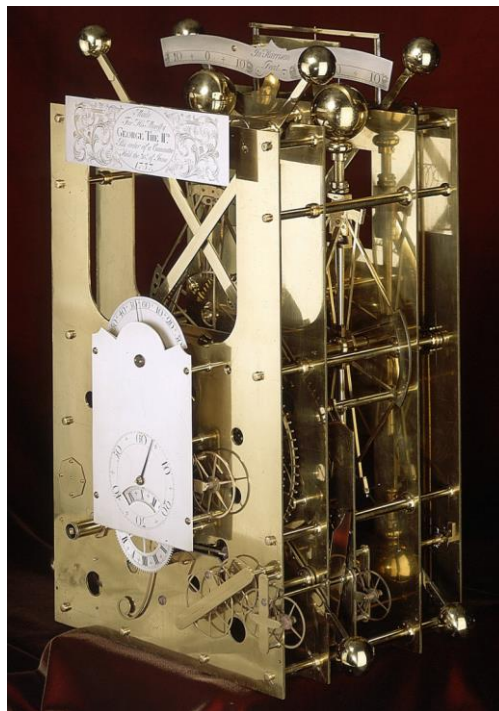
Još uvijek nezadovoljan, Harrison je nastavio dotjerivati svoj izvanredno složeni satni mehanizam sve dok nije proizveo H3 verziju (Slika 3), 1758. godine. Ova treća verzija mogla

se bolje nositi s temperaturnim fluktuacijama zahvaljujući bimetalnoj traci balansne opruge. Još jedna inovacija s ovim modelom bio je kavezni valjkasti ležaj koji je smanjio trenje u radu. Nažalost, točnost još nije bila postignuta, čak niti kod H3 verzije.



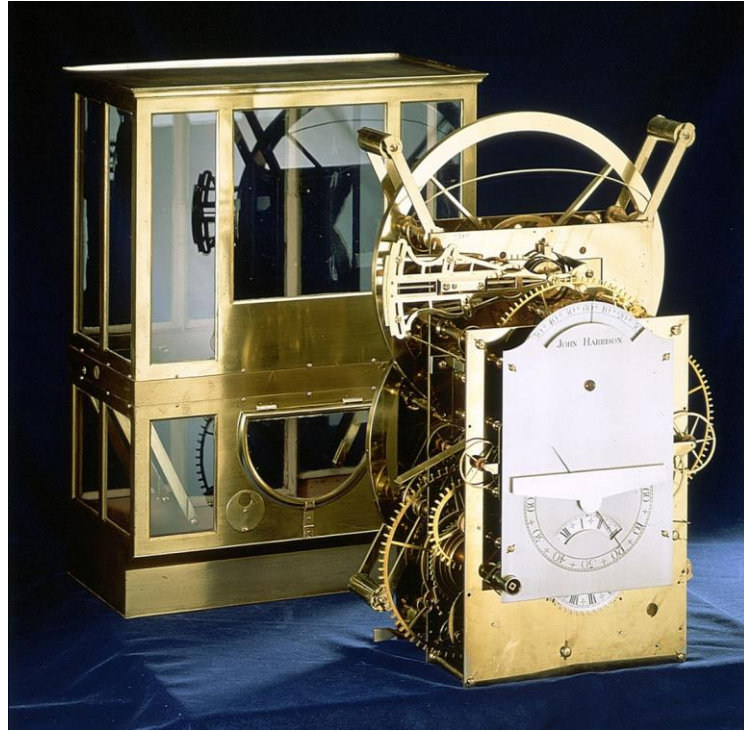
Slika 1: Harrisonov H1

Izvor: <https://www.rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-79139> (4. 9. 2024.)



Slika 2: Harrisonov H2

Izvor: <https://www.rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-79140> (4. 9. 2024.)



Slika 3: Harrisonov H3

Izvor: <https://www.rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-79141> (4. 9. 2024.)

Tada je Harrison odlučio napraviti iskorak. Kako bi bolje testirao svoje satove, Harrison je dizajnirao verziju džepnog sata i dao je izraditi poznatom uraru Johnu Jeffreysu. Harrison je tada shvatio da bi unatoč lošoj reputaciji ručnih satova u to vrijeme mogao ugraditi značajke H1, H2 i H3 i napraviti točan sat, možda točniji od bilo kojeg sata koji je dosad napravio. Manji sat koji više-manje stane u džep bio bi mnogo svestraniji i privlačniji pomorcima od njegovih glomaznih dosadašnjih pokušaja. Harrison je tako započeo rad na svoja dva „morska sata“.

Godine 1761. Harrison je proizveo svoj radikalni kronometar H4 (Slika 4). Sat podsjeća na veliki džepni sat i imao je nešto više od 13 cm u promjeru. Bio je težak 1,45 kg. Ovaj „morski sat“ stavljen je na praktičnu probu putovanja brodom HMS Deptford na relaciji od Portsmoutha do Jamajke od studenog 1761. do siječnja 1762. Odbor za istraživanje zemljopisne dužine još uvijek nije bio zadovoljan; sat je izgubio 5,1 sekundu na putovanju, a ploča je zahtijevala više istraživanja i više testiranja. Odbor za istraživanje zemljopisne dužine konačno je odobrio H4 verziju nakon što je ponovno testiran na brodu HMS Tartar na putovanju do Barbadosa u ožujku i travnju 1764. Originalni kronometar H4 Harrison danas je izložen u Kraljevskom muzeju Greenwich u Londonu.

Harrisonov pomorski kronometar omogućavao je pomorcima točno mjerenje zemljopisne dužine, ali vlada ga još uvijek nije za to nagradila punom novčanom nagradom koju je obećala. Postojali su neki problemi oko definiranja uvjeta za dobivanje nagrade. Harrisonov kronometar H4 zadovoljio je tražene uvjete točnosti, ali se od izumitelja tražilo da preda nacрте i izradi dvije kopije sata. Nakon nekoliko tjedana Harrison je pristao na nove uvjete.



Harrison's H4, 1755-59

Slika 4: Harrisonov H4

Izvor: <https://toflit18.hypotheses.org/files/2017/11/Miotto-World-Trade-the-Chronometer-and-Technology-Diffusion.pdf> (8. 6. 2024.)

Harrison, nezadovoljan nedostatkom priznanja od strane svoje vlade za njegove napore i rad obratio se kralju Georgeu III od Velike Britanije (vladao 1760.-1820.). Kralj je suosjećao i s entuzijazmom te isprobao Harrisonov najnoviji i najbolji „morski sat“, H5. Tijekom probnog razdoblja od deset tjedana na moru 1772., monarh je bio impresioniran preciznošću H5 verzije, sat je gubio samo jednu trećinu sekunde dnevno. Nakon podnošenja peticije Parlamentu 1773. godine, izumitelj je konačno dobio još 8750 funti i službeno priznanje da je riješio problem točnog mjerenja zemljopisne dužine na moru. Harrison je svakako bio ponosan na svoj sat, kao što je pokazao u pismu zahvale iz tog vremena:

H5 se danas nalazi u Muzeju znanosti u Londonu. Ono je kulminacija Harrisonovog dugog putovanja istraživanja i razvoja, ima kućište izrađeno od srebra s bijelim emajliranim broječanicom i zlatnom središnjom zvijezdom za podešavanje kazaljki kada je potrebno.

Radni dijelovi su izrađeni od zlata, srebra i čelika s elementima dijamanta i dragulja, a na stražnjoj strani je ugravirano "br. 2 John Harrison & Son London 1770".



Slika 5: Harrisonov H5

Izvor: <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8448183/marine-timekeeper-known-as-h5-by-john-harrison-and-son-1770-chronometer> (8. 6. 2024.)

Harrisonov pomorski kronometar krenuo je u masovnu proizvodnju i predan na korištenje svim brodovima Kraljevske mornarice.

2.2. ODREĐIVANJE ZEMLJOPISNE DUŽINE POLOŽAJA BRODA

Pomorci su mogli točno odrediti svoju zemljopisnu širinu (položaj na liniji sjever-jug) mjerenjem deklinacije Sunca u podne ili deklinacije Sjevernjače (Polaris) na sjevernoj hemisferi. Prije izuma preciznih kronometara, pomorci nisu imali pouzdan način da znaju točno vrijeme na referentnom meridijanu, poput onog u Greenwichu, što je otežavalo određivanje zemljopisne dužine. Ipak, metoda lunarne udaljenosti nudila je alternativno rješenje jer je omogućavala indirektno određivanje vremena bez kronometra.

Ovaj problem postao je posebno izražen tijekom europske kolonizacije Amerike, počevši od putovanja Kristofora Kolumba 1492. godine, zaobilaznja Rta dobre nade od strane

Vasca da Game između 1497.-1499., te prve plovidbe oko svijeta koju je vodila ekspedicija Ferdinanda Magellana od 1519. do 1522. godine.

Tijekom nekoliko desetljeća, plovidba svjetskim morima i oceanima naglo se povećala, a pomorcima je bilo sve potrebnije točno odrediti svoju poziciju. Bio je nužan sat koji bi mogao godinama precizno mjeriti, primjerice, vrijeme u Greenwichu, kako bi navigatori uvijek imali pouzdanu referentnu točku. S obzirom na to da vremenska razlika između svakog stupnja zemljopisne dužine iznosi četiri minute, uspoređujući vrijeme u Greenwichu s lokalnim vremenom, navigator bi mogao izračunati svoj longitudinalni položaj.

Na brodovima su se provodili eksperimenti s običnim ili prilagođenim satovima, no kretanje broda u nemirnim morima narušavalo bi njihove mehanizme, čineći ih neprikladnima za točna mjerenja. Dva dodatna izazova za satove na moru bila su vlaga i velike temperaturne promjene, čimbenici koji su mogli ozbiljno narušiti točnost sata zbog deformacije njegovih delikatnih mehaničkih dijelova.

2.2.1. Metoda lunarne udaljenosti

Postojala je alternativna metoda za određivanje zemljopisne dužine, poznata kao "metoda lunarne udaljenosti," koja je uključivala mjerenje položaja Mjeseca u odnosu na poznate zvijezde i korištenje tablica koje je izradio Kraljevski opservatorij u Greenwichu. Ipak, izazov pronalaska prijenosnog i preciznog mehaničkog uređaja za mjerenje vremena ostao je jedan od najvećih znanstvenih problema toga doba. Toliko je bio složen da je izraz "rješavanje problema zemljopisne dužine" postao sinonim za svaki neizvjestan znanstveni pothvat s minimalnim šansama za uspjeh.

Princip metode lunarne udaljenosti bez potrebe za unaprijed poznatim vremenom (kao što je Greenwich Mean Time) opisano je kroz sljedećih nekoliko koraka:

Mjerenje lunarne udaljenosti: Pomorci bi prvo s pomoću sekstanta izmjerili kutnu udaljenost između Mjeseca i nekog drugog nebeskog tijela, obično Sunca, planeta ili svijetle zvijezde. Ova kutna udaljenost, poznata kao lunarna udaljenost, bila je ključan podatak za daljnje proračune.

Astronomske tablice (Nautical Almanac): Iako pomorci nisu znali točno vrijeme u Greenwichu, koristili su astronomske tablice (Nautical Almanac), koje su predviđale točne položaje Mjeseca i drugih nebeskih tijela u različitim trenucima vremena. Te tablice bile su izrađene na temelju astronomskih opažanja i predviđanja kretanja nebeskih tijela, uključujući Mjesec.

Određivanje točnog vremena putem lunarne udaljenosti: Nakon što bi izmjerili lunarnu udaljenost, pomorci bi konzultirali tablice u Nautical Almanacu kako bi pronašli točno vrijeme kada je Mjesec bio na toj poziciji u odnosu na zvijezdu ili drugo nebesko tijelo. Ove tablice su bile ključne jer su omogućavale izračun vremena bez potrebe za kronometrom. Iako pomorci nisu imali direktan pristup GMT-u (Greenwich Mean Time), mogli su ga odrediti na temelju lunarne udaljenosti i pozicija nebeskih tijela.

Usporedba lokalnog vremena: Nakon što bi izračunali točno vrijeme prema lunarnoj udaljenosti, pomorci bi ga usporedili s lokalnim vremenom, koje bi odredili jednostavnim opažanjem Sunca. Najčešće su određivali lokalno podne (kada je Sunce bilo najviše na nebu) kao referencu za lokalno vrijeme.

Izračun zemljopisne dužine: Razlika između izračunatog vremena prema lunarnoj udaljenosti i lokalnog vremena (podne) omogućavala je pomorcima da odrede svoju zemljopisnu dužinu. Svaka razlika od jednog sata predstavljala je 15 stupnjeva zemljopisne dužine (jer Zemlja rotira za 15 stupnjeva svakog sata).

Prednost ove metode jest u tome što pomorci nisu morali unaprijed znati vrijeme na referentnom meridijanu jer su ga mogli izračunati s pomoću tablica lunarne udaljenosti i mjerenja sekstantom. No, metoda je bila izuzetno složena i zahtijevala je precizna opažanja i složene proračune. Tablice su morale biti vrlo precizne, a mjerenja su se morala vršiti pod povoljnim uvjetima. Loše vremenske prilike, oblaci ili pogrešna mjerenja mogli su značajno narušiti točnost izračuna. Osim toga, bilo je potrebno puno znanja i vještine za točno provođenje svih koraka metode.

Iako je metoda lunarne udaljenosti bila komplicirana, omogućila je pomorcima da relativno točno odrede svoju zemljopisnu dužinu bez kronometra, koristeći astronomske tablice i mjerenja kutne udaljenosti Mjeseca od drugih nebeskih tijela. Nevil Maskelyne, koji je bio kraljevski astronom, unaprijedio je postupak određivanja geografske dužine metodom lunarne udaljenosti uz pomoć tablica gibanja Mjeseca. Njegove tablice, objavljene 1766.

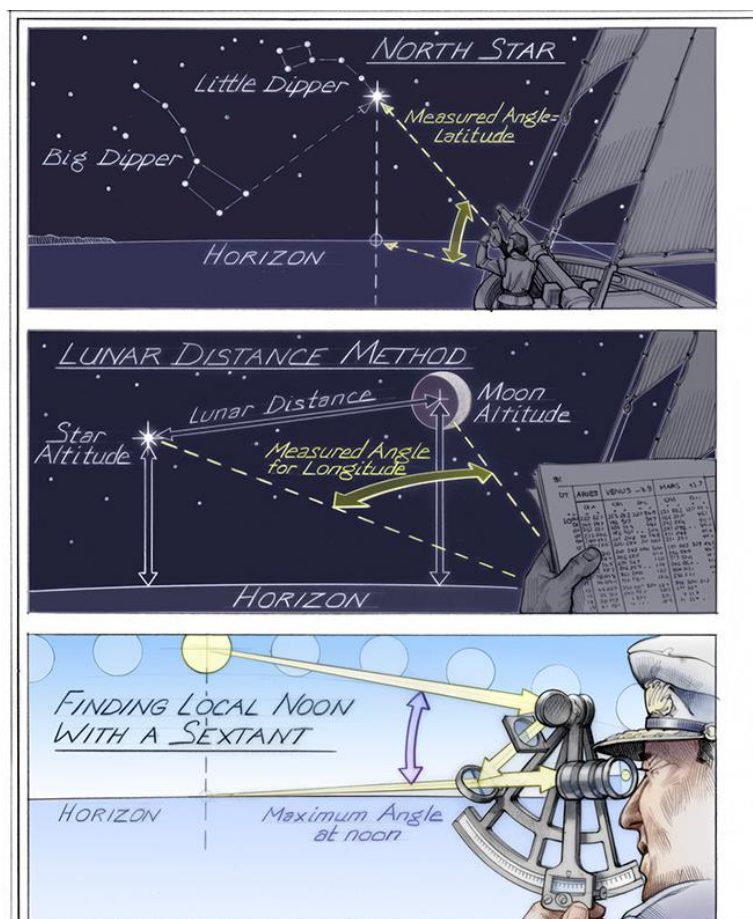
godine, omogućavale su pomorcima da za samo pola sata izračunaju svoju geografsku dužinu, što je bila alternativa Harrisonovoj metodi s kronometrom.

To je bio značajan napredak u navigaciji, no metoda je s vremenom postala zastarjela s pojavom preciznih pomorskih kronometara, koji su omogućili puno jednostavniji i precizniji način određivanja dužine.

2.2.2. Određivanje zemljopisne dužine s pomoću kronometra

Za određivanje zemljopisne dužine na moru s pomoću sekstanta, kronometra i Nautičkog almanaha, potrebno je slijediti nekoliko koraka:

1. **Mjerenje lokalnog vremena:** S pomoću sekstanta identificira se nebesko tijelo (npr. Sunce) i izmjeri se njegova visina iznad horizonta. U tom trenutku zabilježi se točno vrijeme mjerenja s pomoću kronografa usklađenog s Greenwich Mean Time (GMT).
2. **Izračun lokalnog satnog kuta (LHA):** Na temelju Nautičkog almanaha odredi se Greenwich satni kut (GHA) i deklinacija (Dec) promatranog nebeskog tijela za izmjereno vrijeme GMT. Izmjerena visina i deklinacija koristi se tada za izračun lokalnog prividnog vremena (LAT) na lokaciji na kojoj se nalazi navigator.
3. **Izračun zemljopisne dužine:** Razlika između GMT-a i LAT-a, pretvorena u stupnjeve ($1 \text{ sat} = 15^\circ$), dao bi zemljopisnu dužinu. Ako je LAT ispred GMT-a, nalazite se istočno od Greenwicha, a ako je iza, zapadno.



Slika 6: Navigacija prema Suncu, Mjesecu i planetima

Izvor: Celestial navigation at sea, <https://timeandnavigation.si.edu/multimedia-asset/celestial-navigation-at-sea> (11. 6. 2024.)

2.3. UTJECAJ TEHNOLOŠKIH INOVACIJA NA BUDUĆNOST UPORABE KRONOMETRA

Nakon Drugog svjetskog rata, država koja je proizvela najviše pomorskih kronometara zapravo je bio Sovjetski Savez. Zaplijenili su tehničke nacрте za njemačke kronometre nazvane Einheitschronometer i na kraju ih napravili oko 50.000. Ipak, globalna potreba za njima počela se smanjivati, jer je vrijeme mira značilo da je bilo manje mornaričkih brodova koji su plovili. Postojala je i činjenica da je većina pomorskih kronometara izgrađena prema nevjerovatno visokim standardima, a brodovi su ih rijetko morali mijenjati nakon što su ih

imali. Potražnja je nastavila padati, a opservatorijske studije usmjerile su pogled na ručni sat koji je radikalno populariziran u posljednjih nekoliko desetljeća⁵.

Razvoj mehaničkih pomorskih kronometara doista je udario u zid 1967., kada se globalna definicija jedne sekunde promijenila s razlomka temeljenog na rotaciji Zemlje. Sada na temelju pouzdanije metrike ciklusa zračenja atoma cezija, brodovi su također mogli iskoristiti prednosti kvarcne tehnologije koja je bila daleko jeftinija i pouzdanija čak i od najboljih mehaničkih pokreta. Sredinom 1980-ih i britansko ministarstvo obrane i američka mornarica riješili su se svojih mehaničkih kronometara Hamilton koji su se samo štedljivo koristili kao rezervni, jer se GPS navigacija smatrala pouzdanom. Mučan kraj procvata pomorskog kronometra nekima bi se mogao činiti tužnim, ali brzina kojom su dolazili i odlazili doista je dokaz koliko su promijenili navigaciju. Bez njih se ne bi moglo dogoditi prelazak na digitalne sustave, a romantični ideali kronometrije i danas su živi i zdravi u vrhunskim mehanizmima za ručne satove.

3. DIJELOVI KRONOMETRA I KARAKTERISTIKE

Kronometar dijeli temeljne karakteristike s drugim satovima koji se navijaju s pomoću ključa, ali uključuje dodatne značajke za rješavanje izazova koje nameću pomorski uvjeti, kao što su kretanje, temperatura i varijacije tlaka tijekom putovanja.

3.1. GLAVNI DIJELOVI

Osnovne komponente pomorskog kronometra uključuju:

- 1. Mehanizam:** Unutarnji mehanizam koji održava vrijeme. U mehaničkim kronometrima, ovo uključuje glavnu oprugu, zupčasti mehanizam i regulaciju. U kvarcnim kronometrima, uključuje kvarcni kristal i elektroničke komponente.

⁵ How marine chronometers shaped horology today, <https://timeandtidewatches.com/best-omega-speedmaster-limited-edition/> (13. 6. 2024.)

2. **Regulator:** Regulira otpuštanje energije iz glavne opruge prema zupčastom mehanizmu, osiguravajući točnost mjerenja vremena.
3. **Glavna opruga:** Pohranjuje energiju i pokreće kronometar. To je namotana opruga koja se odmotava kako bi pokrenula mehanizam.
4. **Zupčasti mehanizam:** Prenosi energiju iz glavne opruge na regulator i kazaljke, pretvarajući energiju u pokret koji pokreće prikaz vremena.
5. **Oscilator:** Ljulja se naprijed-nazad, surađujući s regulatorom kako bi regulirao mjerenje vremena.
6. **Ciferplata:** Površina kronometra koja prikazuje vrijeme. Obično ima kazaljke za sate, minute i ponekad sekunde, uz numeričke ili oznake.
7. **Kazaljke:** Pokretni pokazivači na ciferplati koji prikazuju vrijeme (kazaljke za sate, minute i moguće sekunde).
8. **Kućište:** Zaštitni okvir koji sadrži mehanizam i ciferplatu.
9. **Kristal:** Prozirni poklopac preko ciferplate, obično napravljen od stakla ili sintetičkog safira, koji štiti lice kronometra.
10. **Kruna:** Dugme koje se koristi za postavljanje vremena i navijanje glavne opruge (u mehaničkim kronometrima).

Prije polaska, pomorski kronometar postavljen je na srednje vrijeme po Greenwichu (GMT). Time se uspostavlja fiksni vremenski standard za putovanje. Tijekom putovanja, navigator redovito uspoređuje lokalno vrijeme na brodu s GMT postavljenim na kronometru.⁶

S obzirom na to kako se pomorski kronometar koristi u tako surovom okruženju, ovaj uređaj za mjerenje vremena dolazi s posebnim značajkama od kojih su neke:

- Kompenzacijsko balansiranje

Za smanjenje utjecaja temperaturnih promjena na brzinu kronometra koriste se kompenzacijske vage. Te su vage često izrađene od materijala s određenim temperaturnim koeficijentima, čime se osigurava da mjerenje vremena ostane točno unatoč različitim uvjetima okoline.

⁶ What is a Marine Chronometer? How it Works and its Legacy, (2024.)
<https://www.gnomonwatches.com/blogs/news/marine-chronometer> (12. 6. 2024.)

- Gimbal Montaža

Pomorski kronometar smješten je u kutiju montiranu na kardan kako bi se smanjio utjecaj kretanja broda. Ovaj inovativni sustav montaže omogućuje kronometru da ostane stabilan i vodoravan, čak i kada se brod kotrlja ili naginje na moru.

3.2. STANJE I HOD KRONOMETRA

Najvažnija obilježja kronometra su njegovo stanje i hod radi grešaka koja na primjer, za grešku od jedne minute, izaziva grešku na dobivenoj zemljopisnoj širini u iznosu od 15 nautičkih milja.⁷ Stanje kronometra je odstupanje srednjeg Greenwich vremena (UT) i vremena što ga u istom trenutku pokazuje kronometar na brodu (tk). Stanje kronometra je pozitivno ako kronometar kasni, te negativno ako kronometar žuri ispred Greenwich vremena. Označava se oznakom (St) i računa s pomoću formule:

$$St = UT - tk$$

Promjena stanja kronometra unutar jednog dana (24 h) zovemo hod kronometra, odnosno dnevni hod. Hod kronometra je pozitivan ako kronometar žuri, odnosno negativan ako kronometar zaostaje, suprotno od stanja kronometra. Hod se izračunava putem formule:

$$h = St_2 - St$$

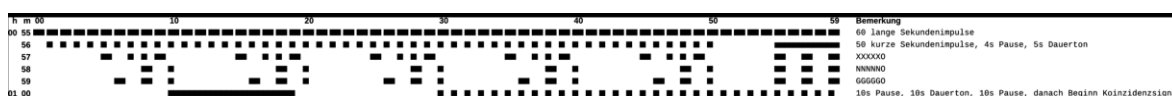
Ako je promjena stanja kronometra unutar jednog dana premalena da bi se mogla očitati, promjena stanja se očitava s razmakom od nekoliko dana. Ako broj dana koji je protekao između dva stanja kronometra označimo s n , sa St_n stanje očitano n -ti dan, sa St stanje očitano prvi dan, hod se može izračunati s pomoću formule:

$$h = (St_n - St)/n$$

⁷ Martedić M. Kronometar i vrijeme u astronomskoj navigaciji (2019.) Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:EU:ba67651d-f144-4ac8-9a62-1aed490a6d5e?comment_id=d55eaffc-c549-41a3-8984-88af79dae204 (7. 7. 2024.)

Hod kronometra svakodnevno se mijenja zbog fluktuacija u temperaturi, pa se stoga naziva i prosječnim hodom kronometra. Trenutno stanje i hod moguće je utvrditi putem vremenskih signala koje danas odašilje gusta mreža radio stanica. Svaka stanica koristi vlastitu metodu za prijenos signala, a jedan od najstarijih od njih je ONOGO sustav.

ONOGO je sustav aktivan od 1913. godine. Vremenski signal je započinjao sa 60 impulsa u trajanju od jedne sekunde: Nakon toga su slijedila 50 kratkih impulsa koji se javljaju opet nakon svake sekunde, i 5 sekundi kontinuiranog tona kako bi se uveo stvarni ONOGO kod (Morseov kod), koji je trajao 3 minute i završavao s 10 sekundi kontinuiranog tona.



Slika 7: Struktura vremenskog signala odaslanog putem ONOGO sustava (ne uključuje vremenski signal za usklađivanje)

Izvor: https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichtliche_Entwicklung_der_Zeit%C3%BCbertragung_per_Funk#Unterschiede_des_ONOGO-Zeitsignals_und_des_Koinzidenz-Zeitsignals (4. 9. 2024.)

Naknadno preneseni signal za usklađivanje vremena sastojao se od 5 identičnih sekvenci, svaka u trajanju od 1 minute, s 0,5 sekundi vremenskim signalom na početku svake minute i 60 tonskih signala, svaki u trajanju od 0,1 sekunde, ali u intervalima od 0,9836 sekundi, tako da je ukupno 61 vremenski signal prenesen svake 60 sekundi.

ONOGO vremenski signal prvenstveno je korišten za grubo podešavanje lokalnih satova na licu mjesta, na primjer zaustavljanjem i ponovnim pokretanjem na kraju vremenskog signala. No, budući da interval signala za poklapanje traje samo 0,9836 sekundi, točni sekundi mogu se izračunati iz broja odgovarajućeg signala za poklapanje i usporediti s očitanjem sata. Budući da se točna vrijednost sekunde može izračunati na tri decimale obraćanjem pažnje na poklapanje, moguće je odrediti vremenski interval koji treba ispraviti do najmanje stotinke sekunde i izvršiti odgovarajuću preciznu korekciju.⁸

⁸ 5. Historical development of time transmission via radio, https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichtliche_Entwicklung_der_Zeit%C3%BCbertragung_per_Funk#Unterschiede_des_ONOGO-Zeitsignals_und_des_Koinzidenz-Zeitsignals (4. 9. 2024.)

4. VRIJEME U ASTRONOMSKOJ NAVIGACIJI

Astronomska (nebeska) navigacija je metoda navigacije plovila ili određivanja njegovog položaja na Zemljinoj površini s pomoću nebeskih tijela, prvenstveno Sunca, Mjeseca, zvijezda i planeta. Prije pojave modernih elektroničkih navigacijskih sustava, nebeska navigacija bila je primarna metoda koju su navigatori koristili za pronalaženje puta preko mora i oceana⁹.

Načela nebeske navigacije oslanjaju se na promatranje nebeskih tijela i korištenje specijaliziranih navigacijskih instrumenata, poput sekstanta, za mjerenje njihovih kutova i položaja u odnosu na promatrača. Uspoređujući ta mjerenja s poznatim nebeskim kartama ili almanasima, navigator može odrediti njihovu zemljopisnu širinu i dužinu, koje su ključne za određivanje položaja plovila na površini Zemlje.

Kako bi se moglo predvidjeti prividno kretanje Sunca, Mjeseca i planeta preko nebeske sfere potrebno je poznavati period između dva uzastopna prolaza nekog nebeskog tijela kroz određeni meridijan. Taj razmak nazivamo pojmom dana.¹⁰

4.1. RAZNE VRSTE DANA

Na određenom meridijanu, u jednom trenutku Mjesec, Sunce te neki planet, proljetna točka¹¹ i zvijezda vidljivi su u jednom položaju. Nakon što se Zemlja okrenula oko svoje osi, pozicije nebeskih objekata su se promijenile u odnosu na promatrača u tom meridijanu. Mjesec je pomaknuo svoju poziciju za približno 12° u smjeru suprotnom od kazaljke na satu, Sunce za oko 1° u istom smjeru, dok planet može promijeniti svoju poziciju u bilo kojem smjeru, bilo progresivno ili retrogradno. Proljetna točka je pomaknuta za 00,12" u smjeru

⁹ What is celestial navigation?, <https://www.davisinstruments.com/pages/what-is-celestial-navigation> (10. 6. 2024.)

¹⁰ Martedić M. Kronometar i vrijeme u astronomskoj navigaciji (2019.) Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:EU:ba67651d-f144-4ac8-9a62-1aed490a6d5e?comment_id=d55eaffc-c549-41a3-8984-88af79dae204 (7. 7. 2024.)

¹¹ Proljetna točka je jedno od dvaju mjesta gdje se nebeski ekvator presijeca s ekliptikom. Ovo je trenutak kada Sunce, tijekom svog prividnog godišnjeg puta, prelazi s južne na sjevernu nebesku polutku, što se obično događa oko 21. ožujka.

suprotnom od kazaljke na satu, dok zvijezda ostaje na istoj lokaciji. Ove promjene omogućuju nam da definiramo pet različitih vrsta dana.

- Sunčev dan predstavlja vremenski interval potreban Suncu da se dva puta uzastopno pozicionira iznad istog meridijanu na Zemlji, što odražava rotaciju Zemlje u odnosu na Sunce.
- Mjesečev dan označava razdoblje potrebno Zemlji da izvrši punu rotaciju oko svoje osi i dodatnih približno 13° , pri čemu je srednje trajanje Mjesečevog dana otprilike 24 sata i 50 minuta.
- Planetni dan definira se kao period potreban da određeni planet dvaput uzastopno kulminira na istoj točki na Zemlji. Trajanje planetnog dana može biti dulje ili kraće od trajanja Sunčevog dana.
- Tropski dan je vrijeme koje je potrebno proljetnoj točki da dvaput uzastopno kulminira na određenom meridijanu na Zemlji. Ovaj dan je približno 4 minute kraći od Sunčevog dana.
- Zvezdani dan predstavlja razdoblje potrebno da određena zvijezda dvaput uzastopno kulminira u istom meridijanu na Zemlji. Trajanje zvezdanog dana također je otprilike 4 minute kraće od Sunčevog dana, te se zbog sličnosti u trajanju često koristi tropski dan kao prikladan ekvivalent zvezdanom danu.

Sunčev dan počinje prolazom Sunca kroz donji meridijan (donja kulminacija). Budući da se satni kut Sunca mjeri od trenutka kada Sunce prelazi kroz gornji meridijan, postoji razlika od 12 sati ili 180° između satnog kuta Sunca i pravog Sunčevog vremena.

Za određivanje trajanja dana važno je identificirati nepomične točke na nebeskoj sferi i na površini Zemlje te promatrati njihovu međusobnu poziciju. Budući da na nebeskoj sferi ne postoje apsolutno nepomične točke, u analizi se koriste nebeska tijela poput zvijezda, Sunca i Mjeseca. Trajanje različitih vrsta dana nije isto. Najpogodnija točka za promatranje bila bi zvijezda stajačica zbog njenog sporog kretanja, budući da je najudaljenija od Zemlje.

12

¹² Z. Lušić, K. Baljak, Astronomska navigacija, Sveučilište u Splitu

4.2. PRAVI SUNČAN DAN I PRAVO VRIJEME

Pravo Sunčevo vrijeme temelji se na položaju Sunca. Izračunava se kao vrijeme između dviju kulminacija Sunca na određenom meridijanu, što čini pravi Sunčev dan. Uz pomoć satnog kuta Sunca (s), pravo mjesno vrijeme (tp) može se izračunati na sljedeći način

$$tp = 12 h + s .$$

Ovdje 12 sati označava vremensku razliku između početka mjerenja mjesnog satnog kuta (gornja kulminacija Sunca) i početka računanja vremena (donja kulminacija Sunca). Pri tome treba uzeti u obzir:

- Ako je Sunce prošlo gornji meridijan (tj. prošlo je pravo podne), lokalni satni kut ima zapadni predznak (sw).
- Ako Sunce još uvijek nije prošlo gornji meridijan (tj. još nije prošlo pravo podne), lokalni satni kut ima istočni predznak (se).

Tada se Sunčevo vrijeme dobiva iz sljedećeg izraza:

$$tp = 12 h - se$$

$$tp = 12 h + sw$$

Ovi proračuni pomažu u navigaciji, primjerice, za određivanje vremena izlaska i zalaska Sunca, trajanja sumraka te prolaska Sunca kroz određene točke na nebu.

Međutim, pravo Sunčevo vrijeme nije prikladno za svakodnevnu upotrebu jer Sunce ne putuje ravnomjerno po ekliptici, što znači da trajanje Sunčeva dana varira tijekom godine.¹³

4.3. SREDNJI SUNČAN DAN I SREDNJE VRIJEME

Ako pretpostavimo da Sunce na nebeskoj sferi prati ujednačenu putanju, bez deklinacije (to jest, kreće se duž ekvatora) i da mu se surektascenzija mijenja ravnomjerno, možemo

¹³ Z. Lušić, K. Baljak, Astronomska navigacija, Sveučilište u Splitu

zamisliti idealizirano "srednje Sunce" koje nam omogućava da izračunamo srednje mjesno Sunčevo vrijeme (t_s) ili srednje Griničko Sunčevo vrijeme (UT). Ova hipotetska prosječna pozicija Sunca utvrđuje trajanje prosječnog Sunčevog dana.

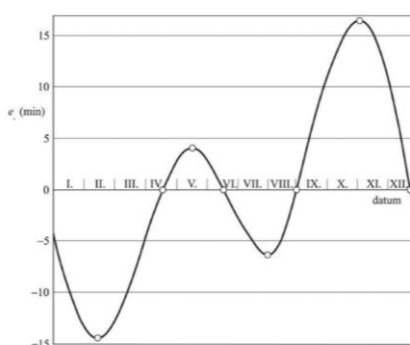
Svaki meridijan ima svoje srednje (pravo) Sunčevo vrijeme. Stoga, samo ona mjesta koja su smještena na istom meridijanu dijele isto vrijeme u određenom trenutku.¹⁴

4.4. JEDNADŽBA VREMENA

Ova jednadžba izražava razliku između satnog kuta stvarnog i zamišljenog srednjeg Sunca, odnosno vremensku razliku koja proizlazi iz eliptične prirode Zemljine orbite i nagiba Zemljine osi. Jednadžba vremena označava se slovom e , a formulira se ovako:

$$e = T_p - T_s \dots \dots \text{ili} \dots \dots e = t_p - t_s$$

Jednadžba vremena imat će pozitivan predznak samo kada pravo Sunce prednjači ispred srednjeg Sunca, dok će suprotan slučaj rezultirati negativnim predznakom jednadžbe vremena. Vrijednosti ove jednadžbe kreću se od približno -14,4 minuta do +16,4 minuta, a četiri puta godišnje iznosi točno nula. Ti datumi su 15. travnja, 16. lipnja, 2. rujna i 25. prosinca, dok su ekstremne vrijednosti zabilježene 12. veljače ($e = -14$ minuta i 18 sekundi) i 3. studenog ($e = 16$ minuta i 26 sekundi).



Slika 8: Vremenski odmak između pravog i srednjeg Sunčevog vremena
 Izvor: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=13822> (4. 9. 2024.)

¹⁴ Klarin M., 1995, Astronomska navigacija, Školska knjiga, Zagreb

4.5. SREDNJE VRIJEME PO GREENWICHU

Svi podaci Nautičkog almanaha temelje se prema srednjem vremenu u Greenwichu. Srednje vrijeme (GMT) naziva se i univerzalno vrijeme (UT). No, termin GMT se i dalje koristi kao i do sada kao referenca prilikom izdvajanja podataka iz Nautičkog zbornika. Ponekad je moguće u podacima ugledati i kraticu UT, što, u stvari, ima jednako značenje.

Prije korištenja Nautičkog almanaha potrebno je znati koliki je zapravo točno ekvivalent lokalnog vremena sukladno srednjem vremenu Greenwicha. To se računa na sljedeći način:

- Konvertiranje lokalnog vremena prema GMT ili
- Postavljanje sata koji se koristi za astronomsku navigaciju prema GMT

Za postavljanje vremena prema GMT potrebno je poznavanje vremenskih zona. Zemlja se okreće 360° u 24 sata. To znači 15° po satu. Grinički meridijan je zemljopisne dužine 0° i središte je Z vremenske zone. Svaka vremenska zona široka je 15° ili 1 sat. Postoje 24 vremenske zone i svaka je označena svojim slovom. Na kopnu su neke granice zona iskrivljene iz geopolitičkih ili komercijalnih razloga.

Opis zone (ZD – engl. *Zone Description*) je broj sati koje treba dodati vremenu zone za koju se treba dobiti GMT. ZD je pozitivan za zapadne zemljopisne dužine, a negativan za istočne zemljopisne dužine. Kod određivanja GMT na moru, ne koristi se računanje ljetnog i zimskog vremena.

4.6. VRIJEME PREMA SATU

U svakoj državi, gradu, mjestu, satovi su podešeni prikazivati lokalno vrijeme. Prilikom putovanja u druge vremenske zone, potrebno je postaviti satove (ručne, mobilne, i sl.) u vremensku zonu u koju se putuje. Za to je potrebno znati pretvoriti vrijeme na svome satu u zonsko vrijeme na GMT i obrnuto.

Za potrebe astronomske navigacije potrebno je pretvoriti vrijeme na svom satu (zonsko vrijeme) na GMT i obrnuto. Za pretvaranje vremena najprije treba odrediti u kojoj zoni se osoba nalaziti u odnosu na njegovu zemljopisnu dužinu. To se može učiniti tako da se svoju

zemljopisnu dužinu podijeli s 15 i zaokruži dobiveni rezultat na najbliži cijeli broj. Za izračunavanje zapadnog vremena ide se u plus, a istočnog se ide u minus.

5. SUVREMENA NAVIGACIJA

Otkriće kronometra značajno je pojednostavilo izračunavanje zemljopisne dužine, što je imalo velik utjecaj na buduća geografska otkrića, omogućujući preciznije određivanje pozicija novootkrivenih područja.¹⁵ Tijekom posljednjeg putovanja engleskog istraživača Jamesa Cooka (1779.), korištene su metode i instrumenti slični onima koji se koriste danas (osim elektronskih), poput oktanta, kronometra i Nautičkog godišnjaka s efemeridima nebeskih tijela. Kao referentni meridijan već se upotrebljavao grinički meridijan, koji je ostatak svijeta službeno prihvatio kao nulti meridijan na konferenciji u Washingtonu 1884. godine, kada je Zemlja podijeljena na 24 vremenske zone.

Signal točnog vremena prvi puta je putem telegrafa poslan 1865. godine i preko radija 1903. godine. Dolazi do razvoja hidrografije u 17. stoljeću, a pojavom parobroda (početkom 19. stoljeća) počinje plovidba po ortodromi¹⁶.

Godine 1907. dolazi do razvoja hidrodinamičnog brzinomjera, a početkom 20. stoljeća ultrazvučnog dubinomjera. Također, ubrzo, 1911. godine radi priprema za ekspediciju koja je išla na sjeverni pol konstruiran je žirokompas.

Nakon nekoliko godina, već 1921. godine dolazi do razvoja prvog radiofara te ubrzanog razvoja elektronske navigacije u periodu između dva svjetska rata, a naročito tijekom i nakon drugog svjetskog rata. Od važnijih navigacijskih sustava u to vrijeme poznati su LORAN A

¹⁵ https://www.unizd.hr/portals/1/nastmat/terestrika/aa_terestrika1.pdf (6. 6. 2024.)

¹⁶ Ortodroma je prostorna krivulja koja je presjek sfere i ravnine što prolazi središtem sfere; geodetska linija na sferi i ujedno kraći luk glavne kružnice koja prolazi tim dvjema točkama, <https://www.enciklopedija.hr/clanak/ortodroma> (6. 6. 2024.)

te GEE¹⁷, SONNE¹⁸ i CONSOL¹⁹. Sve više se u navigaciju uvode i računala te automatizacija najvišeg stupnja.

Već 1964. godine razvija se navigacijski satelitski sustav TRANSIT²⁰ koji je bio u upotrebi u vojne svrhe, a od 1967. godine se počeo koristiti i u civilne svrhe. NAVSTAR/GPS (eng. *Global Positioning System*), poznatiji kao Globalni sustav pozicioniranja, prvi puta se testirao 1975. godine, a u radu je od 1981. godine. Ovaj sustav omogućuje pozicioniranje broda s preciznošću unutar 100 metara, a jednako je precizan i sustav GLONAS, ali isti nije doživio razvoj poput GPS-a. Što se tiče pozicioniranja u slučajevima traganja i spašavanja danas je u uporabi globalni satelitski komunikacijski sustav INMARSAT.

5.1. GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)

Global Positioning System (GPS) je navigacijski sustav koji koristi satelite, prijemnik i algoritme za sinkronizaciju podataka o lokaciji, brzini i vremenu za putovanje zrakom, morem i kopnom.²¹

¹⁷ GEE je hiperbolički sustav koji je koristila Velika Britanija u avijacijskim operacijama tijekom Drugog svjetskog rata. Sustav je ugašen 1970. godine, Blanchard, W.F.: The GEE System <http://www.jproc.ca/hyperbolic/gee.html> (7. 6. 2024.)

¹⁸ SONNE, njemački hiperbolički sustav, neka vrsta radio.-fara s okretljivom karakteristikom isijavanja, nije naišao na širu primjenu, iako i danas nekoliko stanica toga sustava radi pod imenom Konsol (eng. Consol) far https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektronika_uredaji_11_elektronicki_navigacijski_sistemi.pdf (7. 6. 2024.)

¹⁹ KONSOL (eng. Consol) je far s rotirajućim zračenjem koji radi u graničnom području između niskih i srednjih radio-frekvencija. Njime se služe brodovi i avioni no nije upotrebljiv za automatske prijemne uređaje. Danas ih ima svega nekoliko i to u zapadnoj Europi. https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektronika_uredaji_11_elektronicki_navigacijski_sistemi.pdf (7. 6. 2024.)

²⁰ TRANSIT bio je prvi satelitski navigacijski sustav, postavljeni u niskim polarnim orbitama na visini od 1000 km i odašiljali su na dvije frekvencije 150 i 400 MHz. S obzirom na konstelaciju i mali broj satelita u Transit sustavu dostupnost satelita nije bila velika jer je na njegovu pojavu trebalo čekati i po 30 minuta. Satelit se mogao pratiti oko 16 min, a svako procesiranje signala trajalo je 10 do 15 min kako bi se utvrdila pozicija. Sve to otežavalo je korištenje ovog sustava za objekte koji se brzo kreću pa je isti napušten 1996. nakon 32 godine korištenja. Uglavnom se koristio u pomorstvu i za geodetska mjerenja, Kos, T., Grgić, M., Krile, S. Hiperbolni i satelitski sustavi za navigaciju (2004.), Naše more, str. 192 <https://hrcak.srce.hr/file/12808> (7. 6. 2024.)

²¹ What is GPS and how do Global Positioning System work? (2024.), <https://www.geotab.com/blog/what-is-gps/> (8. 6. 2024.)

GPS je postao neizostavan dio našeg svakodnevnog života, prisutan u automobilima, pametnim telefonima i satovima. Omogućuje navigaciju od početne točke do željene destinacije. Satelitski sustav sastoji se od mreže od 24 satelita raspoređenih u šest orbitalnih ravnina oko Zemlje. Svaka ravnina sadrži četiri satelita koji kruže na visini od 20.000 km brzinom od 14.000 km/h. Za precizno određivanje položaja na Zemlji potrebna su tri satelita, dok četvrti satelit služi za provjeru točnosti podataka i omogućuje izračun nadmorske visine.

GPS se sastoji od tri glavna segmenta, koji zajedno pružaju informacije o lokaciji:

- **Svemirski segment (sateliti):** Sateliti koji kruže oko Zemlje emitiraju signale koji korisnicima pružaju podatke o zemljopisnom položaju i vremenu.
- **Zemaljski segment (kontrola):** Ovaj segment uključuje zemaljske nadzorne stanice, glavne kontrolne stanice i antene, koje prate i upravljaju satelitima te nadgledaju prijenose. Nadzorne stanice smještene su na gotovo svim kontinentima, uključujući Sjevernu i Južnu Ameriku, Afriku, Europu, Aziju i Australiju.
- **Korisnički segment (oprema):** Ovaj segment obuhvaća GPS prijemnike i odašiljače koji se nalaze u uređajima poput satova, pametnih telefona i telematskih sustava.

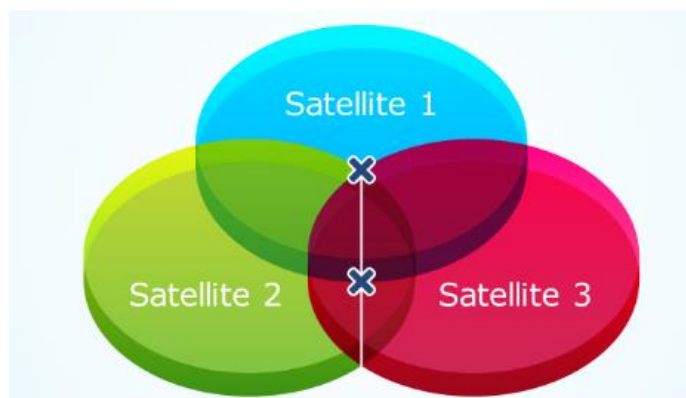
Sateliti koji orbitiraju oko Zemlje odašilju signale koje GPS uređaj, smješten na ili blizu zemljine površine, mora primiti i obraditi. Kako bi izračunao točnu lokaciju, GPS uređaj mora biti sposoban primiti signale od najmanje četiri različita satelita.²²

Svaki satelit unutar mreže orbitira oko Zemlje dvaput dnevno, emitirajući jedinstveni signal, podatke o svojoj orbiti i točno vrijeme. U svakom trenutku, GPS uređaj može primiti signale od najmanje šest ili više satelita istovremeno.

Kada satelit pošalje signal, on stvara kružnicu s polumjerom jednakim udaljenosti od GPS uređaja do satelita. Drugi satelit generira drugu kružnicu, sužavajući moguću lokaciju na jednu od dvije točke gdje se te kružnice sijeku. Dodavanjem trećeg satelita, lokacija uređaja postaje precizno određena jer se uređaj nalazi na sjecištu sve tri kružnice.

²² What is GPS and how do Global Positioning System work? (2024.), <https://www.geotab.com/blog/what-is-gps/> (8.6.2024.)

Budući da je svijet trodimenzionalan, svaki satelit stvara sferu umjesto kruga. Sjecište triju sfera rezultira dvjema mogućim točkama, od kojih se odabire ona koja je bliža Zemljinoj površini.



Slika 9: Raspon satelita prikaz sjecišta sfera

Izvor: <https://www.geotab.com/blog/what-is-gps/> (8. 6. 2024.)

Kako se GPS uređaj kreće, mijenja se udaljenost do satelita, odnosno radijus. Promjenom radijusa stvaraju se nove sfere koje definiraju novu lokaciju. Ovi podaci, s vremenskim informacijama sa satelita, omogućuju izračun brzine i određivanje preostale udaljenosti do cilja.

GPS se danas koristi u skoro svim djelatnostima, poslovima, sportovima i sl. Njegova točnost ovisi o mnogim varijablama poput broj dostupnih satelita, ionosfera, urbano okruženje i slično. Točnost GPS-a može biti narušena različitim čimbenicima, uključujući:

- Atmosferske smetnje - ionska atmosfera: Varijacije u gustoći ioniziranih čestica u gornjim slojevima atmosfere mogu uzrokovati kašnjenje signala; troposfera: Vlažnost i temperatura u donjim slojevima atmosfere mogu dovesti do promjena u brzini prolaska signala.
- Multipath efekti: signali koji se reflektiraju od objekata poput zgrada, planina ili drugih površina mogu uzrokovati da GPS prijemnik primi lažne signale, što može rezultirati pogrešnim određivanjem lokacije.
- Geometrijski uvjeti - satelitska geometrija: ako su sateliti blizu jedan drugom na nebu, može doći do smanjenja točnosti. Idealna situacija je kada su sateliti raspršeni po nebu.

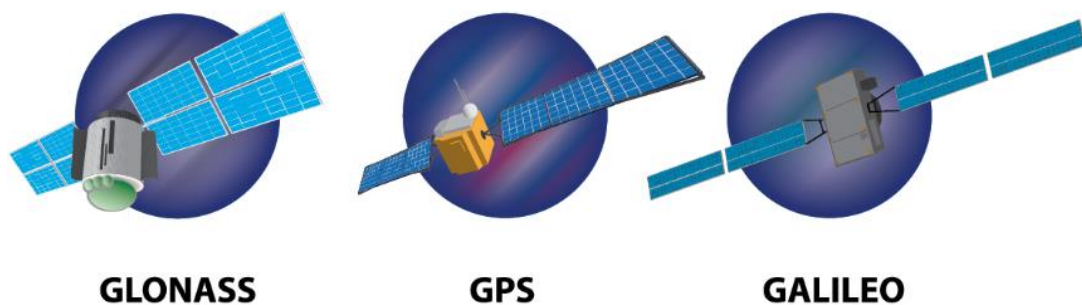
- Smetnje i šum: radio frekvencijski šum ili interferencije od drugih izvora elektromagnetskih valova mogu ometati GPS signale.
- Namjerno ometanje: jamming uređaji mogu stvarati šum ili blokirati GPS signale.
- Greške u satelitskom sustavu - orbitalne greške: Netočnosti u pozicijama satelita mogu utjecati na preciznost signala; Kvarovi u satelitskim satima: Ako sateliti ne održavaju točno vrijeme, to može dovesti do grešaka u izračunu pozicije.
- Korisnički uređaji: kvaliteta prijemnika i loša povezanost
- Postavke i kalibracija: nepravilna kalibracija i ažuriranje podataka
- Loše vremenske prilike: oblačno vrijeme, kiša, snijeg ili magla mogu smanjiti kvalitetu signala.

Svi ovi čimbenici mogu utjecati na preciznost GPS podataka, ali moderne GPS tehnologije često koriste korekcijske metode i dodatne sustave za poboljšanje točnosti i pouzdanosti.

5.2. OSTALI NAVIGACIJSKI SUSTAVI

GPS se smatra globalnim navigacijskim satelitskim sustavom (GNSS) — što znači da je to satelitski navigacijski sustav s globalnom pokrivenošću. Od 2020. postoje dva potpuno operativna globalna navigacijska satelitska sustava: američki GPS za određivanje vremena i dometa navigacijskog signala (NAVSTAR) i ruski globalni satelitski navigacijski sustav (GLONASS). NAVSTAR GPS se sastoji od 32 satelita u vlasništvu SAD-a i najpoznatiji je i najkorišteniji satelitski sustav. Ruski GLONASS sastoji se od 24 operativna satelita s tri preostala kao rezervna ili u testiranju.²³

²³ What is GPS and how do Global Positioning System work? (2024.), <https://www.geotab.com/blog/what-is-gps/> (8. 6. 2024.)



Slika 10: Satelitski navigacijski sustavi

Izvor: <https://www.geotab.com/blog/what-is-gps/> (8. 6. 2024.)

Ostale zemlje također se utrkuju da ih sustignu. EU, na primjer, je radila na Galileu, za koji je postigao puni radni kapacitet krajem 2020. Kina je također izgradila navigacijski satelitski sustav BeiDou, s 35 satelita koji su lansirani u orbitu krajem lipnja 2020. Japan i Indija su također na dobrom putu sa svojim regionalnim sustavima, Quasi-Zenith satelitskim sustavom (QZSS) odnosno indijskim regionalnim navigacijskim satelitskim sustavom (IRNSS).

Što se tiče Europske unije i satelitskog sustava Galileo, ovaj sustav se koristi u širokom spektru aplikacija i uređaja, uključujući pametne telefone, nosive uređaje, letjelice i osobna vozila. Nazvan je po Galileu Galileiju, talijanskom matematičaru, fizičaru, astronomu i filozofu poznatom po izumu teleskopa s mogućnošću uvećanja slike do 30 puta. Europska unija koristi prednosti programa Galileo kroz različite propise i regulative na sljedeće načine:²⁴:

- Od travnja 2018. svi novi modeli automobila koji se prodaju u EU-u moraju biti opremljeni mogućnostima za Galileo, u skladu s uredbom o sustavu eCall (Uredba (EU) 2015/758).
- Od lipnja 2019. pametni tahografi moraju biti kompatibilni s programom Galileo (Provedbena uredba (EU) 2016/799).
- Od listopada 2021. oprema u vozilu koja upotrebljava satelitsko navođenje, povezano s elektroničkim sustavima za naplatu cestarine, mora biti kompatibilna s programom Galileo (Direktiva (EU) 2019/520).

²⁴ <https://eur-lex.europa.eu/HR/legal-content/glossary/galileo.html> (9. 6. 2024.)

- Od ožujka 2022. svi pametni telefoni koji se prodaju u EU-u moraju sadržavati mogućnosti za GNSS, barem mogućnost za program Galileo, da bi u hitnom slučaju informacije satelitskog navođenja mogle hitnim službama pružati informacije o lokaciji pozivatelja (Delegirana uredba (EU) 2019/320).

6. ZAKLJUČAK

Dugo je trebalo urarima i izumiteljima da usavrše tadašnje satove prije 18. stoljeća i trebalo je izvjesno vrijeme proteći, kao i niz različitih verzija prije nego je John Harrison uspio izraditi kronometar, morski sat, koji je napokon pokazivao točno vrijeme te time omogućio određivanje zemljopisnog položaja broda.

Ako se pogleda danas, unatrag 30- sak godina tehnologija je toliko uznapredovala i napreduje iz dana u dan, da je potpuno nestvarno gledati unatrag u vrijeme prije 18. stoljeća i uvidjeti ogromne probleme oko mjerenja vremena i zemljopisne širine i dužine s kojima su se izumitelji susretali tada. No, srećom, izum kronometra je u potpunosti promijenio tijek pomorstva. Sada su pomorci mogli preko oceana i sve dalje i dalje. Osvajanje novih teritorija, otkrivanje novih država, kontinenta, širenje trgovine, migracije, vojne aktivnosti i sve ostalo samo je krenulo. A kako je vrijeme odmicalo, pogotovo ulaskom u 20. stoljeće, tehnološki napredak je uvelike uznapredovao te omogućio i olakšao plovidbu u raznim segmentima. Razvojem hidrodinamičkog brzinomjera, ultrazvučnog dubinomjera, žirokompasa na početku stoljeća, a onda radiofara te elektronske navigacije koja je rapidno krenula u periodu između dva svjetska rata, tehnologija se samo razvijala. Uvela su se računala i automatizacija je polako postala sve prisutnija.

Drugom polovicom 20. stoljeća, točnije 1964. razvija se prvi navigacijski satelitski sustav TRANSIT, a od 1967. GPS čime se otvaraju vrata jednom potpuno novom svijetu, kada je u pitanju moderna tehnologija i to kako u pomorstvu, tako i u svemu ostalom. GPS sustav je sustav bez kojega danas čovjek ne može zamisliti život, putovanje, trgovinu, akcije traganja i spašavanja i slično.

Koliko je ovaj sustav olakšao način života u pomorstvu, dovoljno je navesti kako je sada dovoljno unijeti u sustav početnu i krajnju poziciju putovanja, a sustav sam izračuna rutu, vrijeme, duljinu puta, brzinu i sve ostalo, što je do sada pomorac morao izračunavati ručno ili s pomoću kronometra.

No, uz svu modernu tehnologiju, postoje mogućnosti gubitka signala, kvara na satelitu, kvara automatskog sustava i slično, te je kronometar kao takav i dalje prisutan na brodu. Pomorci i danas poznaju astronomsku navigaciju i osnove astronomije u kontekstu navigacije kako bi se u bilo kojem neočekivanom trenutku na moru, oceanu, putovanju zatekli u potrebi snalaženja bez moderne tehnologije. Moderna će tehnologija svakako i dalje ići naprijed i razvijati se u smjeru sve lakšeg i bržeg putovanja, ali kronometar ostaje kao podsjetnik na izvanredna vremena i izvanredne izumitelje toga vremena.

LITERATURA

1) KNJIGE

1. Klarin M., 1995, Astronomska navigacija, Školska knjiga, Zagreb

1) ČLANCI

1. Bilić T., Navigacija prema zvijezdama u prehistoriji i antici (II: dio), 2005. godina, „Naše more“ 52(1-2), str. 89, <https://hrcak.srce.hr/file/12792> (13. 6. 2024.)
2. Iaria, A., Miotto, M., Pascali, L., World Trade, the Chronometer and Technology Diffusion (2017.) University of Warwick, Pompeu Fabra University, <https://toflit18.hypotheses.org/files/2017/11/Miotto-World-Trade-the-Chronometer-and-Technology-Diffusion.pdf> (8. 6. 2024.)
3. Kos, T., Grgić, M., Krile, S. Hiperbolni i satelitski sustavi za navigaciju (2004.), Naše more, str. 192 <https://hrcak.srce.hr/file/12808> (7. 6. 2024.)

2) INTERNET IZVORI

1. Cartwright Mark (2023.) Harrison's Marine Chronometer, https://www.worldhistory.org/article/2197/harrisons-marine-chronometer/#google_vignette (6. 6. 2024.)
2. Royal Museums Greenwich, <https://www.rmg.co.uk/collections/objects> (4. 9. 2024.)
3. World Trade, the Chronometer and Technology Diffusion, Toflit18 Conference, <https://toflit18.hypotheses.org/files/2017/11/Miotto-World-Trade-the-Chronometer-and-Technology-Diffusion.pdf> (8. 6. 2024.)
4. Marine Timekeeper known as „H5“ by John Harrison and Son 1770, London, <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8448183/marine-timekeeper-known-as-h5-by-john-harrison-and-son-1770-chronometer> (8. 6. 2024.)
5. Historical development of time transmission via radio, https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichtliche_Entwicklung_der_Zeit%C3%BCbertragung_per_Funk#Unterschiede_des_ONOGO-Zeitsignals_und_des_Koinzidenz-Zeitsignals

6. Celestial Navigation, Ynot Sailing, (2017.),
<https://www.ynotsailing.com/Celestial/Section%206%20Time.pdf> (9. 6. 2024.)
7. Celestial navigation at sea, <https://timeandnavigation.si.edu/multimedia-asset/celestial-navigation-at-sea> (11. 6. 2024.)
8. Galileo, EUR-Lex, Access to European Union Law,
<https://eur-lex.europa.eu/HR/legal-content/glossary/galileo.html> (9. 6. 2024.)
9. Hrvatska enciklopedija, Kopernik Nikola, <https://enciklopedija.hr/clanak/kopernik-nikola> (12. 6. 2024.)
10. How marine chronometers shaped horology today,
<https://timeandtidewatches.com/best-omega-speedmaster-limited-edition/> (13. 6. 2024.)
11. <https://hr.wikipedia.org/wiki/Mjesec> (11. 6. 2024.)
12. <https://hr.wikipedia.org/wiki/Navigacija> (13. 6. 2024.)
13. Martedić M. Kronometar i vrijeme u astronomskoj navigaciji (2019.) Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:EU:ba67651d-f144-4ac8-9a62-1aed490a6d5e?comment_id=d55eaffc-c549-41a3-8984-88af79dae204 (7. 7. 2024.)
14. Nastavni materijali,
https://www.unizd.hr/portals/1/nastmat/terestrika/aa_terestrika1.pdf (6. 6. 2024.)
Navigating with Sun, Moon and planets, Science Learning Hub,
<https://www.sciencelearn.org.nz/resources/624-navigating-with-sun-moon-and-planets>
(11. 6. 2024.)
15. Pomorstvo, Pojam i glavne faze razvoja,
<https://www.unizd.hr/Portals/1/nastmat/pomgeograf/Razvoj%20pomorstva.pdf>
(13. 6. 2024.)
16. What is a Marine Chronometer? How it Works and its Legacy, (2024.)
<https://www.gnomonwatches.com/blogs/news/marine-chronometer> (12. 6. 2024.)
17. What is celestial navigation?, <https://www.davisinstruments.com/pages/what-is-celestial-navigation> (10. 6. 2024.)

18. What is GPS and how do Global Positioning System work? (2024.),
<https://www.geotab.com/blog/what-is-gps/> (8. 6. 2024.)

3) OSTALI IZVORI

- 4) Lušić Z., Baljak K., Astronomska navigacija, Sveučilište u Splitu

KAZALO KRATICA

Kratika	Puni naziv na stranom jeziku	Tumačenje na hrvatskom jeziku
GPS	eng. Global Positioning System	Globalni sustav pozicioniranja
GLONAS	rus. Глобальная навигационная Спутниковая Система	Globalni navigacijski satelitski sustav
INMARSAT	eng. the International Marine/Maritime Satellite	Međunarodni pomorski satelitski sustav
GNSS	eng. Global Navigation Satellite System	Globalni satelitski navigacijski sustav
QZSS	eng. Quasi Zenith	Indijski satelitski sustav
IRNSS	eng. Indian Regional Navigation Satellite System	Indijski regionalni navigacijski satelitski sustav
EU	eng. European Union	Europska Unija
GMT	eng. Greenwich Mean Time	Srednje vrijeme prema Greenwichu
UT	eng. Universal Time	Univerzalno vrijeme
ZD	eng. Zone Description	Opis zone

POPIS SLIKA

Slika 1: Harrisonov H1	4
Slika 2: Harrisonov H2	4
Slika 3: Harrisonov H3	5
Slika 4: Harrisonov H4	6
Slika 5: Harrisonov H5	7
Slika 6: Navigacija prema Suncu, Mjesecu i planetima	11
Slika 7: Struktura vremenskog signala odaslanog putem ONOGO sustava (ne uključuje vremenski signal za usklađivanje).....	15
Slika 8: Vremenski odmah između pravog i srednjeg Sunčevog vremena	19
Slika 9: Raspon satelita prikaz sjecišta sfera	24
Slika 10: Satelitski navigacijski sustavi	26