

Navigacijski senzori autonomnih brodova

Buzov, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:321747>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-03**

Repository / Repozitorij:

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for
permanent storage and preservation of digital
resources of the institution](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU


POMORSKI FAKULTET

IVAN BUZOV

**NAVIGACIJSKI SENZORI AUTONOMNIH
BRODOVA**

DIPLOMSKI RAD

SPLIT, 2020.

	POMORSKI FAKULTET U SPLITU	Stranica: Šifra:	1/1 F05.1.-DZ
	DIPLOMSKI ZADATAK	Datum:	22.10.2013.

Split, 01.03.2020.

Zavod/studij: Pomorska Nautika

Predmet: Upravljanje navigacijskim i nadzornim sustavima

DIPLOMSKI ZADATAK

Student/ca: Ivan Buzov

Matični broj: 0171266654

Zavod/studij: Pomorska nautika

ZADATAK:

Navigacijski senzori autonomnih brodova

OPIS ZADATKA:

Definirati autonomni brod i osnovne senzorske sustave koji omogućuju autonomno kretanje i prepoznavanje opasnosti (sustave pozicioniranja, optičke sustave, radar, LiDAR, senzore dubine i brzine, komunikacijske sustave).

CILJ:

Analizirati dostupne brodske senzorske sustave temeljem kojih će buduća autonomna plovila određivati svoj položaj u prostoru, prepoznavati okolinu i opasnosti, te ploviti samostalno na siguran i učinkovit način.

ZADATAK URUČEN STUDENTU/CI: Ivan Buzov

POTPIS STUDENTA/CE: 

MENTOR: izv.prof.dr.sc. Zvonimir Lušić

SVEUČILIŠTE U SPLITU

POMORSKI FAKULTET

STUDIJ: POMORSKA NAUTIKA

**NAVIGACIJSKI SENZORI AUTONOMNIH
BRODOVA**

DIPLOMSKI RAD

MENTOR:

Dr.sc. Zvonimir Lušić

STUDENT:

Ivan Buzov (MB: 0171266654)

SPLIT, 2020.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Zvonimiru Lušiću na strpljenju, dostupnošću i nesebičnoj pomoći prilikom pisanja ovog diplomskog rada. Također, veliko hvala Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Splitu i Zavodu za Pomorsku nautiku koji je zaslužan za stečeno znanje i početak moje pomorske karijere.

Nadalje, zahvaljujem se svim svojim prijateljima i obitelji bez kojih moje studiranje ne bi bilo lako i zabavno.

Želim se zahvaliti svim svojim kolegama, a posebno Klemi i Brki koji su mi uvijek pomagali prilikom učenja. Hvala na svim nezaboravnim trenutcima koje smo proveli zajedno tijekom studija.

Na kraju, posebno se želim zahvaliti svojoj supruzi bez čije ljubavi, potpore i motivacije nijedan moj uspjeh, pa tako ni ovaj, ne bi bio moguć.

SAŽETAK

Pojam senzor vuče korijene iz latinskog jezika, a označava osjećaj, osjećanje ili osjetilo. Zadatak senzora je repliciranje osjetila kod uređaja s ciljem olakšavanja ljudskog rada. Međutim, potrebno je postaviti pitanje može li stroj zamijeniti čovjeka? Činjenica je da pomorska industrija ide u smjeru razvoja inteligentnih autonomnih brodova koji bi plovili svjetskim morima bez posade. Kako bi se mogla razviti industrija autonomnih brodova, navigacijski senzori trebaju nadomjestiti odsustvo pomorca. Kroz ovaj rad objasnit će se što je to autonomni brod, koliko samostalan može biti, analizirati različite vrste neophodnih navigacijskih senzora, te predstaviti problem komunikacije u stvarnom vremenu.

Ključne riječi: *Navigacijski senzori, Brod bez posade, Autonomni brod, Komunikacija u stvarnom vremenu*

SUMMARY

The term sensor has its roots from Latin language and denotes feeling, sensation or sense. The task of the sensor is to replicate the senses within the device in order to alleviate human work. However, the question should be made whether the machine can replace a human? The maritime industry believes this is possible through the development of intelligent autonomous ships that would sail world seas unmanned. In order to develop autonomous shipping industry, navigational sensors must substitute for the absence of seafarers. This paper will explain what an autonomous ship is, how independent it can be, analyze different types of necessary navigational sensors, and present real-time communication problems.

Key words: *Navigational sensors, Unmanned ship, Autonomous ship, Real time communication*

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POJAM AUTONOMNOG BRODA.....	3
2.1. POVIJESNI RAZVOJ AUTONOMNIH BRODOVA	3
2.2. PRAVNE PREPREKE AUTOMATIZACIJE BRODOVA	5
2.3. PODJELA AUTONOMNIH BRODOVA.....	8
2.3.1. Brod s automatskim procesima i podrškom u odlučivanju	9
2.3.2. Brod na daljinsko upravljanje s pomorcima na brodu	9
2.3.3. Brod na daljinsko upravljanje bez posade	10
2.3.4. Potpuno autonomni brod.....	10
3. SENZORI POZICIJE.....	12
3.1. GLOBALNI SATELITSKI NAVIGACIJSKI SUSTAVI.....	12
3.1.1. GPS	12
3.1.2. DGPS	14
3.1.3. GLONASS.....	16
3.1.4. Galileo.....	17
3.1.5. BDS	18
3.2. INERCIJALNI NAVIGACIJSKI SUSTAVI	19
3.2.1. Mehanički žiroskopi.....	19
3.2.2. Optički žiroskopi	20
3.3. HIPERBOLNI NAVIGACIJSKI SUSTAVI	21
3.3.1. Loran - C	21
3.3.2. eLoran	22
4. OPTIČKI SENZORI.....	24
4.1. OPTIČKO-TERMALNI SENZORI	24
4.2. NOSIOCI OPTIČKO-TERMALNIH SENZORA	26
5. RADIO I SVJETLOSNI DETEKORI	28
5.1. RADAR	28
5.2. MILIMETARSKI RADAR.....	28
5.3. LIDAR.....	29

6. SENZORI DUBINE	32
6.1. ULTRAZVUČNI DUBINOMJER.....	32
6.2. JEDNOSNOPNI DUBINOMJER.....	33
6.3. VIŠESNOPNI DUBINOMJER.....	34
7. SENZORI BRZINE.....	36
7.1. ELEKTROMAGNETSKI BRZINOMJER.....	36
7.2. ULTRAZVUČNI BRZINOMJER.....	37
7.3. SATELITSKI BRZINOMJER	38
8. KOMUNIKACIJA AUTONOMNIH BRODOVA.....	40
8.1. SUSTAV UPRAVLJANJA KOMUNIKACIJA.....	41
8.2. BUDUĆI KOMUNIKACIJSKI TRENDovi I PREPREKE	42
9. INTEGRACIJA NAVIGACIJSKIH SENZORA AUTONOMNIH BRODOVA.....	44
9.1. SENZORSKI ZAHTJEVI AUTONOMNIH BRODOVA	44
9.1.1. Površinski senzori.....	45
9.1.2. Podvodni senzori	46
9.1.3. Svemirski senzori	46
9.2. AUTONOMNA PLOVIDBA	47
10. ZAKLJUČAK.....	50
LITERATURA	51
POPIS TABLICA.....	56
POPIS ILUSTRACIJA.....	57
POPIS KRATICA	58

1. UVOD

U današnjem svijetu, sve se više smanjuje potreba za ljudskim radom zbog ubrzanog razvoja robotike i automatizacije. Pomorska industrija posljednjih godina razvija autonomnu industriju s ciljem povećanja produktivnosti i smanjenja ljudskog rada. Najveću prepreku za uvođenje autonomije predstavljaju senzori. Zadatak senzora autonomnih brodova je omogućiti brodu ljudske karakteristike poput osjetila, razmišljanja, predviđanja i sl. Cilj ovog diplomskog rada jest analizirati dostupne brodske senzorske sustave temeljem kojih će buduća autonomna plovila određivati svoj položaj u prostoru, prepoznavati okolinu i opasnosti, te ploviti samostalno na siguran i učinkovit način.

Ovaj diplomski rad je podijeljen u deset poglavlja.

U prvom poglavlju predstavlja se problematika rada te se daje kratki opis svakog pojedinog poglavlja u radu.

U drugom dijelu objašnjava se općeniti pojam autonomnog broda. Opisuje se povijesni razvoj autonomnih brodova, pravne prepreke koje usporavaju njihovu pojavu te podjela autonomnih brodova ovisno o stupnju autonomije.

Treće poglavlje opisuje senzore pozicije, a podijeljeno je u tri dijela. Prvi dio obuhvaća globalni navigacijski satelitski sustav i daje se kratka usporedba točnosti trenutnih sustava. U drugom dijelu opisuje se inercijalni navigacijski sustav i njegova važnost za razvoj brodske autonomije. Posljednji dio problematizira hiperbolne navigacijske sustave, a posebice eLoran zbog moguće zalihosti za globalni navigacijski satelitski sustav.

Četvrto poglavlje opisuje optičke senzore i njihovu primjenu kroz videonadzor i kod bespilotnih zračnih letjelica.

Protusudarni senzori obrađeni su u petom poglavlju, a podijeljeni su u tri dijela. Prvi dio opisuje pomorski radar i njegove značajke. Milimetarski radar i LiDAR te njihove primjene za autonomne brodove opisani su kroz drugi i treći dio.

Šesto poglavlje problematizira senzore dubine, a posebice jednosnopni i višesnopni dubinomjer kod kojih je predstavljena komparacija podataka.

Sedmo poglavlje opisuje senzore brzine i predstavlja njihovu podjelu. Cilj ovog dijela jest usporediti međusobno različite vrste senzora kako bi se mogao donijeti sud o primjeni optimalnog uređaja za autonomne brodove.

Osmo poglavlje detaljno objašnjava moguće komunikacijske probleme autonomnih brodova. Kroz dva dijela prikazuje se potrebna infrastruktura za neometane komunikacije te se nude moguća konceptualna rješenja.

Deveto poglavlje opisuje načine integracije navigacijskih senzora kako bi se omogućila neometana plovidba autonomnih brodova. Također je prikazana plovidba autonomnog broda gdje se koriste senzori kako bi se uspješno izvršio plovidbeni pothvat.

U desetom, posljednjem poglavlju, objedinjuju se ključni dijelovi teme diplomskog rada.

2. POJAM AUTONOMNOG BRODA

Autonomna vozila najnaprednija su dostignuća današnjeg transportnog sustava. Postoje primjeri automatiziranih podzemnih željeznica, automatsko navođenih vozila koja se koriste na kontejnerskim terminalima, te automatiziranih letjelica, a sve s ciljem smanjenja ljudskog rada. Autonomija u pomorskom prijevozu viđena je kao mogućnost koja bi zadovoljila buduće zahtjeve tržišta, sigurnosti plovidbe i održivosti. [40]

Međunarodna pomorska organizacija (engl. *International Maritime Organization - IMO*) nema univerzalnu definiciju broda u svojim odredbama i konvencijama, već brodove definira prema njihovim karakteristikama. Međutim, izvršno tijelo IMO-a, odbor za pomorsku sigurnost definira autonomni brod kao brodski operativni sustav koji ima mogućnost donositi i izvršavati odluke samostalno. [34]

Pomorski zakonik Republike Hrvatske klasificira autonomni brod kao autonomni plovni objekt odnosno kao „*plovni objekt koji ovisno o stupnju automatizacije i zahtjevima za neposrednim nadzorom stalne službe može ploviti bez ukrcane posade ili sa smanjenim brojem članova posade*“. [32]

Prema Norveškom forumu za autonomne brodove (engl. *Norwegian forum for autonomous ships - NFAS*), autonomni brod definira se kao brod koji ima neki udio automatizacije i samoupravljalivosti. Automatizacija je proces, najčešće računalni, koji bi omogućavao brodu obavljanje određene operacije bez ljudskog nadgledanja. Autonomija se opisuje kao rezultat napredne automatizacije tako da brod bude samoupravljaliv odnosno da može birati između više različitih situacija bez potrebe za ljudskom interakcijom. [23]

Važno je razlikovati pojmove „brod bez posade“ (engl. *Unmanned vessel*) i „autonomni brod“ (engl. *Autonomous vessel*). Kod prvog pojma posada može biti na brodu, ali se ne nalazi na mostu kako bi nadgledala ili izvršavala operacije nad plovilom. Kod potonje definicije, brod može samostalno izvršavati niz predefiniranih radnji bez ili uz smanjen nadzor posade na mostu. [23]

2.1. POVIJESNI RAZVOJ AUTONOMNIH BRODOVA

Povijest razvoja autonomnih brodova započinje patentom Nikole Tesle iz 1898. godine pod nazivom „Metode i uređaji za kontroliranje mehanizama pokretnih plovila ili vozila“. U svom patentu Tesla navodi da je prijenos signala moguć bez upotrebe fizičkih

medija kao što su žice ili kablovi, a to bi se postizalo odašiljanjem impulsa ili radijacije koji prenose signale kroz razne medije poput vode, zraka ili tla. [26]

Više od sto godina nakon Teslinog patenta, započinje automatizacija plovila. Tijekom zadnjih nekoliko godina, pojavljuju se podvodna plovila bez posade (engl. *Unmanned underwater vehicle - UUV*) koja se uvelike koriste u pomorskoj industriji nafte i plina za podvodne radove. [22]

Godine 2015. Rolls-Royce najavljuje da će voditi projekt razvoja autonomnih brodova. Projekt je financirala finska agencija za poticanje razvoja tehnologije i znanosti (fin. *Teknologian kehittämiskeskus - TEKES*), a obuhvaća sveučilišta, brodske arhitekta, proizvođače opreme i klasifikacijska društva kako bi se istražila ekonomska, socijalna, pravna i tehnološka pitanja koja bi dovela do implementacije autonomnih brodova. Projekt je trajao do kraja 2017. godine. [69]

Izgradnja prvog autonomnog broda za odobalne operacije koju su proveli Automated Ships Ltd i norveški Kongsberg započela je 2017. godine. Plod njihove suradnje jest brod Hrönn koji se koristi za znanstvena i hidrografska istraživanja te za marikulturnu industriju. Brod je namijenjen za istraživanja, postavljanje sustava za daljinski upravljana vozila, lansiranje, nadzor i prikupljanje UUV-a, dopremu lakog intermodalnog tereta, dopremu opreme za odobalne instalacije, te podršku marikulturnim postrojenjima. [50]

Iste godine Kongsberg najavljuje gradnju prvog komercijalnog kontejnerskog broda s nultom emisijom stakleničkih plinova, Yara Birkeland. Očekuje se da će prva potpuno autonomna komercijalna plovidba biti obavljena do 2022. godine. Brod bi plovio između luka Herøya – Brevik te Herøya – Larvik. [9]

Također, 2017. godine Rolls-Royce u suradnji s tvrtkom za tegljenje Svitzer proveo je demonstraciju daljinski upravljano tegljenje, a tvrtka Sea Machines Robotics izdaje autonomni softverski sustav Sea Machines 300 koji omogućuje daljinsku i autonomnu kontrolu konvencionalnih brodova. [67]



Slika 1. Koncept prvog autonomnog trgovačkog broda Yara Birkeland [67]

2.2. PRAVNE PREPREKE AUTOMATIZACIJE BRODOVA

Projekt pomorske navigacije bez posade kroz inteligenciju u mrežama (engl. *Maritime unmanned navigation through intelligence in networks - MUNIN*) financiran je od Europske unije. Projekt uključuje suradnju s osam partnera iz Njemačke, Norveške, Švedske, Islanda i Irske u pogledu razvoja autonomnih brodova. [58]

Godine 2015., MUNIN navodi pet najvećih pravnih prepreka koje mogu spriječiti razvoj autonomnih brodova. Prva takva prepreka odnosi se na navigaciju, odnosno tumačenje međunarodnih pravila za izbjegavanje sudara na moru (engl. *International regulations for preventing collision at sea - COLREG*). Peto pravilo nalaže da svaki brod mora uvijek savjesno izviđati motrenjem i slušanjem uz uporabu svih raspoloživih sredstava. Problem na kojeg se ovdje nailazi jest opravdanost strojnog izviđanja, odnosno postavlja se pitanje je li stroj može izviđati bolje od čovjeka sa svom dostupnom tehnologijom. [25]

Šesto pravilo odnosi se na sigurnosnu brzinu, te nigdje ne navodi nužnost čovjeka za određivanje zadanih parametara, stoga bi stroj morao biti sposoban procijeniti vidljivost, gustoću prometa, manevarske sposobnosti broda, pozadinska svjetla, stanje mora, vjetra i morskih struja, gaz broda i udaljenost od navigacijskih opasnosti kako bi zadovoljio uvjetima ovog pravila. [25]

Sedmo pravilo koje uključuje pravila dvanaest, četrnaest, petnaest, sedamnaest i osamnaest odnosi se na identificiranje rizika sudara. Zajedničko svim ovim pravilima, kao i kod šestog pravila jest da ne zahtijevaju ljudsku prisutnost. Također, sedmo pravilo zahtijeva

da se zaključci ne donose na temelju oskudnih podataka, a posebno ne na nedovoljnim radarskim podacima. Kako bi autonomni brodovi zadovoljili uvjete ovog pravila, potrebno je neprestano motrenje i procjena situacije oko broda upotpunjena tradicionalnim metodama poput plotiranja po potrebi. [25]

Djelovi 2 i 3 Međunarodnih pravila za izbjegavanje sudara na moru (engl. *International Regulations for Preventing Collisions at Sea - COLREG*) odnose se na upravljanje brodovima u vidokrugu i brodovima pri smanjenoj vidljivosti. Pravila zahtijevaju vizualno promatranje, odnosno ljudsko nadziranje, stoga je upitno je li se pod ljudskim nadziranjem smatra i nadziranje operatera iz kontrolnog centra uporabom kamera. [25]

Stoga, kako bi autonomni brodovi udovoljili zahtjevima COLREG pravila potrebno je integrirati senzore da bi se poboljšalo izviđanje broda, povećala pouzdanost satelitske komunikacije, te osigurala cyber-sigurnost. [25]

Problem adekvatnog kadra za nadzor autonomnih brodova nalazi se u međunarodnoj konvenciji o standardima izobrazbe, izdavanju svjedodžbi i držanju straže pomoraca (engl. *The International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for seafarers - STCW*) koja propisuje potrebnu izobrazbu i svjedodžbe pomorcima za obavljanje plovidbene službe. Pravni status operatera autonomnih brodova, njihova izobrazba i potrebne svjedodžbe još nisu definirani prema ovoj konvenciji. [25]

Konvencija o radu pomoraca iz 2006. godine (engl. *Maritime Labour Convention - MLC*) donosi odredbe o minimalnom broju posade na brodu kako bi se poslovi mogli obavljati sigurno i efikasno. Autonomni brod zasigurno ne bi udovoljavao zahtjevima ove konvencije, osim ako se ne bi donijela odredba o izuzeću posade kod ovakvih tipova brodova ili dodatnom smanjenju broja posade. [25]

Međunarodni kodeks o sigurnom upravljanju (engl. *The International Safety Management Code - ISM*) poboljšava suradnju broda i brodara preko obveza i odgovornosti zapovjednika broda. Kod autonomnih brodova, odgovornost zapovjednika može biti promatrana dvojako. U prvom slučaju, zapovjednik može biti zapovjednik operatorskog centra koji ima odgovornost nad brodom, dok u drugom zapovjednik može biti samo računalo, odnosno „virtualni“ zapovjednik. [25]

Spremnost broda za plovidbu predstavljat će ozbiljan problem u pogledu popunjavanja posadom. Morat će se dokazati da autonomni brod može samostalno i sigurno izvršiti plovidbeni pothvat. [25]

Svaki brod ima obvezu pomagati u akcijama traganja i spašavanja (engl. *Search and Rescue - SAR*), a to će se odnositi i na autonomne brodove. Nigdje nije definiran način pretraživanja i pomaganja za autonomne brodove, što može predstavljati pravnu prepreku. [25]

Glavni problemi u pogledu popunjavanja posadom odnose se na standarde izobrazbe operatera autonomnih brodova, određivanje broja osoblja u operacijskom centru, probleme u SAR akcijama i odgovornost zapovjednika broda. [25]

Standardi o konstrukciji, dizajnu i opremi brodova sljedeća su prepreka autonomnih brodova. Ove standarde uređuju Međunarodna konvencija o zaštiti ljudskih života na moru (engl. *The International Convention for the Safety of Life at Sea - SOLAS*), Međunarodna konvencija o sprječavanju zagađenja s brodova (engl. *The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships - MARPOL*), te Međunarodna konvencija o teretnim linijama (engl. *International Convention on Load Lines - CLL*). Navedene konvencije usko su povezane s prethodno navedenim problemima u pogledu navigacije i popunjavanja posadom autonomnih brodova. [25]

Najveći nedostaci u pogledu konstrukcije, dizajna i opreme autonomnih brodova očituju se u nedefiniranosti pojma autonomnog broda kod većine konvencija, problemu održavanja te zalihosti. [25]

Prema pomorskom pravu, zapovjednik i brodar imaju odgovornost za učinjene štete. Već je ranije spomenuto da je dvojako značenje pojma zapovjednik kod autonomnih brodova, a time i njegova odgovornost. Odgovornost brodovlasnika također je dvosmislena u pogledu šteta načinjenih drugom brodu u slučaju sudara, ili šteta prema naručitelju uslijed prodora mora. Prema pomorskom pravu, brodar odgovara za štetu na teretu na temelju dokazane krivnje, odnosno ako je šteta učinjena zbog nemara posade, tada se uvijek odgovara za učinjene štete. Autonomni brodovi imat će mali broj posade ili će biti potpuno bez posade, čime se javlja veliki problem da će odgovornost brodarova za nautičku grešku postati mnogo manja, odnosno položaj brodarova postaje povoljniji od položaja naručitelja tereta u pogledu učinjenih šteta. [25]

Posljednji problem su neslužbene izjave osiguranja za zaštitu i odštetu (engl. *Protection and Indemnity Insurance - P&I*) koje navode da osiguranje neće biti prepreka autonomnim brodovima. Premije osiguranja ostale bi iste, dok bi postojala mogućnost da se one dodatno snize ako se autonomni brodovi pokažu dovoljno sigurnima. Manje premije osiguranja dovode do značajnijih ušteda brodarskim tvrtkama, što bi paralelno moglo dovesti

do povećanja broja autonomnih brodova, a samim time i do povećanog broja otpuštanja pomoraca s njihovih radnih mjesta. [25]

2.3. PODJELA AUTONOMNIH BRODOVA

IMO je započeo proces implementacije pomorskih autonomnih površinskih brodova (engl. *Maritime Autonomous Surface Ships - MASS*) 25. svibnja 2018. godine. [57]

Odbor za pomorsku sigurnost, (engl. *Maritime Safety Comitee - MSC*) na svojoj devedeset i devetnoj sjednici, odobrava pravni okvir koji obuhvaća početne definicije MASS brodova i stupnjeve autonomije, uključujući metodologiju za provođenje vježbi te plan rada. [57]

MASS brodovi definiraju se kao brodovi, koji ovisno o stupnju automatizacije, mogu samostalno izvršavati operacije bez ljudskog djelovanja. [57]

Kako bi se olakšao proces određivanja opsega autonomije, brodovi se dijele u četiri skupine, a to su:

- Brod s automatskim procesima i podrškom u odlučivanju: Pomorci se nalaze na brodu kako bi upravljali i nadzirali brodske sustave. Neke operacije mogu biti automatske.
- Brod na daljinsko upravljanje s pomorcima na brodu: Brodom se upravlja i nadzire s druge lokacije, ali pomorci su i dalje na brodu.
- Brod na daljinsko upravljanje bez posade: Brodom se upravlja i nadzire s druge lokacije, ali bez pomoraca na brodu.
- Potpuno autonomni brod: Operacijski sustav broda može samostalno odlučivati i poduzimati radnje. [57]

Prvi korak kod određivanja opsega autonomije sastojat će se od identifikacije odredbi koje su na snazi IMO-vih izvršnih tijela i procjene njihove primjenjivosti na brodove s određenim stupnjem autonomije. [57]

Drugi korak sastoji se od analize koja bi se trebala odrediti najbolje izraze za opisivanje MASS operacija uzimajući u obzir ljudski element, tehnologiju i operativne čimbenike. [57]

Održavanje stote sjednice MSC-a bilo je 07. prosinca 2018. godine. Na ovom zasjedanju, donesene su odluke za tijela povezana s pomorskom sigurnošću i zaštitom u odnosu na pojedine stupnjeve autonomije.

2.3.1. Brod s automatskim procesima i podrškom u odlučivanju

Prema MSC-u brod s automatskim procesima i podrškom u odlučivanju definiran je tako da brod može izvršavati operacije automatski, ali uz posadu koja je spremna preuzeti kontrolu u bilo kojem trenutku. [56]

NFAS dijeli stupnjeve autonomije od nula do pet. Nulti i prvi stupanj autonomije odgovaraju prvom stupnju prema MSC-u. Kod nultog stupnja, posada se nalazi na brodu, a brod je pod izravnim nadzorom posade. Prvi stupanj obuhvaća nadzor od strane obalnog operatera koji može poslati posadu na brod. Operater upravlja brodom, stoga nema automatske kontrole plovidbe. [24]

Prema Lloyd registru brodova (engl. *Lloyd's Register of Shipping - LRS*), postoji sedam različitih stupnjeva automatizacije (engl. *Autonomy levels - AL*), počevši od AL 0 do AL 6. Pod novu IMO regulativu najbolje spadaju stupnjevi od AL 0 do AL 2. Razina autonomije AL 0 obuhvaća brod bez autonomnog upravljanja na kojem odluke donosi posada. Kod AL 1, sve operacije izvodi posada, no sustav za odlučivanje može izložiti drugačija rješenja. Svi podatci potrebni za sustav odlučivanja dobivaju se na brodu. Treći stupanj automatizacije AL 2 sličan je AL 1, a glavna razlika jest u tome da sustav odlučivanja podatke dobiva na brodu ili izvan broda. [31]

Francusko klasifikacijsko društvo Biro Veritas (engl. *Bureau Veritas - BV*) stupnjeve automatizacije dijeli u pet razina od brojeva nula do pet. Razina nula omogućuje sustavu ili brodu prikupljanje informacija, ali onemogućuje analiziranje, odlučivanje i izvršavanje bez odluke čovjeka. Čovjek donosi sve odluke i kontrolira cijeli sustav. Posada se nalazi na brodu. Prva razina ista je kao i prethodna, uz iznimku što se posada može nalaziti na brodu ili na obalnom kontrolnom centru u svojstvu operatora. [30]

2.3.2. Brod na daljinsko upravljanje s pomorcima na brodu

Brod na daljinsko upravljanje s pomorcima na brodu definira se kao upravljanje i nadziranje brodom s druge lokacije. Pomorci su dostupni na brodu kako bi mogli preuzeti kontrolu i upravljati brodskim sustavima. [57]

LRS-ov AL 3 te AL 4 najbolje opisuju ovaj stupanj autonomije. Stupanj AL 3 navodi da su sve odluke i radnje donesene uz ljudski nadzor preko podataka prikupljenih s broda i izvan njega. Kod AL 4, sve odluke dobivaju se autonomno, ali uz nadzor čovjeka. Kritične odluke izvedene su tako da čovjeku omogući donošenje konačnog suda. [31]

Drugi stupanj NFAS-a može se svrstati pod novu podjelu MSC-a. Naime, ovaj stupanj navodi da je brod bez posade uz kontinuirani nadzor obalnog centra. Čovjek nadzire automatske i determinističke odluke računala preko odabranih parametara. [24]

Druga razina autonomije prema BV-u dopušta sustavu prikupljanje i analizu informacija te izvršavanje radnji uz ljudsku odluku. Čovjek može odbijati radnje koje predlaže sustav. Posada može biti na brodu ili na obali u svojstvu operatera. [30]

2.3.3. Brod na daljinsko upravljanje bez posade

Brod na daljinsko upravljanje bez posade definiran je kao treći stupanj autonomije prema IMO-u. [57]

Prema BV-u, pod ovu definiciju najbolje spada njihova treća razina automatizacije kod koje sustav donosi samostalne odluke bez čekanja za ljudskom reakcijom. Čovjek vrši nadzor nad sustavom, te u svakom trenutku može preuzeti kontrolu. Brod se može kontrolirati s posadom ili preko obalnih operatera.. [30]

AL 5 prema definiciji LRS-a, opisuje kako su brodu rijetko potrebna nadgledanja jer se odluke u potpunosti donose preko računala. [31]

NFAS-ov treći i četvrti stupanj automatizacije može se sasvim dobro uklopiti u novu podjelu. Naime, kod treće razine, most je periodično bez posade i bez nadziranja obalnog centra, a posadu na brod okuplja računalo prema potrebi. Brod je potpuno automatiziran te može izvršavati duže i kompliciranije zadatke. Četvrta razina uključuje brod bez posade uz nadzor obalnog centra. Brod ima ograničenu autonomiju, odnosno nekoliko ograničenih mogućnosti koje bira računalo. [24]

2.3.4. Potpuno autonomni brod

Potpuno autonomni brod omogućava operacijskom sustavu broda samostalno odlučivanje i poduzimanje potrebnih radnji. [57]

Prema LRS-u, ovaj stupanj naziva se AL 6 kod kojeg operacijski sustav samostalno i bez nadzora donosi odluke za cijelo vrijeme obavljanja zadatka. [31]

NFAS tvrdi da peti stupanj automatizacije omogućuje brodu potpunu autonomiju, bez ikakvih odluka ili utjecaja na operacijski sustav. Brod je bez posade i bez nadzora obalnog centra. [24]

Četvrta razina BV-a omogućuje brodu potpunu autonomiju, odnosno sustav samostalno izvršava radnje prema već unaprijed određenim parametrima, te nije potreban

ljudski nadzor. Zbog sigurnosti, čovjek u svakom trenutku može preuzeti nadzor na brodom koji može biti s posadom ili upravlján od strane operatera. [30]

3. SENZORI POZICIJE

Riječ senzor dolazi od latinskog pojma „sensus“ koji označava osjet ili osjećanje. Senzori su uređaji koji reagiraju na podražaj iz vanjskog svijeta, te ga potom obrađuju u oblik prikladan korisniku. Primjena senzora je raznovrsna, te se primjenjuju u gotovo svim elektroničkim sklopovima. [5]

Senzori pozicije su osjetilna tijela koja mjere udaljenost koju je neko tijelo prevalilo od neke referentne točke. Taj pomak predstavlja izlaznu veličinu koja se potom predaje nadzornom sustavu kako bi se mogla donijeti pravovaljana odluka. Tijelo se može gibati pravocrtno ili kutno, pa prema tome senzori pozicije mogu biti linearni senzori pozicije ili kutni senzori pozicije. [15]

3.1. GLOBALNI SATELITSKI NAVIGACIJSKI SUSTAVI

Globalni navigacijski satelitski sustavi (engl. *Global Navigation Satellite System - GNSS*) omogućuju određivanje brzine, položaja i drugih veličina objekata upotrebom radijskih valova primljenih sa satelita. Razvoj tehnologije i automatizacije dovodi do modernizacije satelitskih sustava. Krajnjim korisnicima GNSS-a omogućuje se bolja točnost pozicioniranja, mogućnost korištenja novih aplikacija, mogućnost korištenja autonomnih vozila i sl. [29]

3.1.1. GPS

Sustav za globalno pozicioniranje (engl. *Global Positioning System - GPS*) jest sustav kojim se može precizno odrediti položaj korisnika na moru, kopnu i u zraku. Korisnici dobivaju informacije o brzini, poziciji i točnom vremenu u bilo kojem trenutku. Sustav je pod nadzorom Ministarstva obrane Sjedinjenih Američkih Država, a primarno se koristio u vojne svrhe. Odlukom američkog kongresa, dopuštena je njegova upotreba u civilne svrhe. [27]

GPS se sastoji od dvadeset i četiri satelita koja kruže oko Zemlje u šest dvanaesto-satnih orbita. Ti sateliti čine navigacijski sustav satelitskog vremena i mjerenja (engl. *Navigation by Satellite Timing and Ranging - NAVSTAR*). Svaka orbita nalazi se na visini od 20200 kilometara, te sadrži po četiri satelita. Svaki satelit sadrži atomski sat koji omogućava precizno mjerenje vremena. Sateliti odašilju dvije radijske frekvencije na dva zasebna L-kanala. L1 signal sačinjavaju informacije o smjeru signala, korisniku i

preciznosti, dok L2 sadrži samo podatak o preciznosti. Samo podatci o smjeru i korisniku su dostupni za civilnu upotrebu, dok podatke o preciznosti može koristiti vojska ili neka druga ovlaštena institucija. Zbog razlike u mjerenju vremena između satelita i prijemnika, dolazi do greške kod mjerenja udaljenosti. Ova udaljenost naziva se pseudoudaljenost. Potrebna su barem tri satelita kako bi se izračunala dvodimenzionalna pozicija, odnosno četiri za proračun trodimenzionalne pozicije broda. [1]

Tri najveća problema koja predstavljaju izazov za pozicioniranje autonomnih brodova su:

- nedostatak visoke preciznosti u područjima podložnim višestrukome rasprostiranju signala,
- mogućnost ometanja signala,
- pouzdanost informacija o smjeru kretanja autonomnog broda.

Problem visoke preciznosti prouzrokovao je refleksijom GPS signala od okolnih struktura poput zgrada, mostova, drugih brodova i sl. Rješavanje ovog problema moguće je uvođenjem zemaljskih i satelitskih sustava za nadopunu podataka. [29]

Mogućnost ometanja GPS signala predstavlja veliki problem za autonomne brodove, a posebice za one koji plove uskim kanalima. Ometanje GPS signala definira se kao nepravilnost signala niske snage uslijed interferencija s radiovalovima, mobilnom komunikacijom ili uređajima za ometanje signala. Nenamjerno ometanje događa se kada elektronički uređaji na brodu poput komunikacijskih i satelitskih antena ometaju signal svojim radom, što dovodi do smanjenja točnosti pozicioniranja ili do potpunog gubitka signala u polumjeru od nekoliko stotina metara oko broda. Problem interferencije riješen je uvođenjem posebnih algoritama koji omogućuju točno pozicioniranje prilikom ometanja signala. Algoritam identificira interferencijsku frekvenciju te ju blokira iz pozicijskih proračuna. Grafički analizator spektra je uređaj koji pomaže prilikom otkrivanja frekvencije i identifikacije izvora ometanja. [70]

Posljednji problem predstavlja pouzdanost informacija o smjeru kretanja autonomnog broda. Tradicionalni magnetski kompasi nisu dovoljno pouzdani jer su podložni promjeni smjera kada su izloženi metalnim objektima. Zvrčni kompasi pružaju veću razinu pouzdanosti, no visoka cijena predstavlja problem za manje brodove. Rješenje ovog problema moguće je postavljanjem dviju antena na brodu koje bi trebale biti udaljene najmanje nekoliko metara. Ovim se postiže zadovoljavajuća konfiguracija za satelitski kompas. Zbog mogućeg gubitka signala GPS-a, ovaj kompas trebao bi imati rezervu poput laserskog ili optičkog zvrčnog kompasa kako bi se osigurala visoka razina točnosti podataka.

Dvofrekventni GPS prijemnik koristi poznatu udaljenost između antena kako bi pružio informaciju o kretanju broda s točnošću od 0,01 stupanj. [70]

Američka vlada omogućuje emitiranje GPS signala s globalnom prosječnom pogreškom (engl. *User Range Error - URE*). Ovaj podatak predstavlja točnost određivanja udaljenosti. Garantirana točnost URE za 2008. godinu iznosila je oko 7,8 metara. Postignuta točnost za 2016. godinu bila je 3,8 metara, što predstavlja poboljšanje od 4 metra. Planirana točnost za 2024. godinu iznosi oko 0,8 metara, što bi zasigurno zadovoljavalo strogim zahtjevima za pozicioniranje autonomnih brodova. Osim URE, točnost GPS sustava ovisi o horizontalnoj i vertikalnoj točnosti. Horizontalna točnost s preciznošću od 95 % za 2008. godinu iznosila je oko 9 metara. Postignuta točnost 2016. godine iznosila je oko 1,9 metara, što je poboljšanje od 7,1 metar. Ciljana točnost za 2024. godinu iznosi oko 1 metar. Garantirana vertikalna točnost za 2008.godinu iznosila je oko 15 metara, dok je u 2016. godini postignut točnost od 3,9 metara. Poboljšanje vertikalne točnosti iznosi 11,1 metar. Krajnji cilj je do 2024. godine postići razinu vertikalne točnosti manju od 1 metar. Važno je za napomenuti kako su prikazani rezultati za idealne uvjete, dok u praksi ove vrijednosti dodatno odstupaju. Tablica 1. prikazuje točnost GPS sustava s obzirom na navedene podatke. [29]

Tablica 1. Točnost GPS sustava pozicioniranja (Prema: Zrinjski, Barković i Matika, 2019)

Točnost sustava	Garantirana točnost za 2008. godinu	Postignuta točnost za 2016. godinu	Željena točnost za 2024. godinu
Horizontalna točnost (95%)	oko 9 m	oko 1,9 m	oko 1 m
Vertikalna točnost (95%)	oko 15 m	oko 3,9 m	
URE (95%)	oko 7,8 m	oko 3,8 m	oko 0,8 m

3.1.2. DGPS

Pogreške mjerenja kod GPS-a nastaju zbog pogreške orbite, pogreške satelitskog vremena, utjecaja troposfere i ionosfere na propagiranje signala, refleksije signala, šuma prijemnika te zaklanjanja signala. Pogreške se mogu djelomično umanjiti izradom modela, odabirom optimalnog satelita te drugim metodama mjerenja. [1]

Diferencijalni sustav globalnog pozicioniranja (engl. *Differential Global Positioning System - DGPS*) jest metoda poboljšavanja točnosti GPS-a uz pomoć kontrolnih stanica postavljenih na točno poznatim pozicijama koje nazivamo referentnim točkama. Ove stanice računaju korekcijske veličine u svrhu što točnijeg pozicioniranja te ih šalju korisnicima

preko radijskih signala. Sustav radi tako da kontrolna stanica na referentnoj točki prima signale svih vidljivih GPS-ovih satelita, zatim računa pogreške izmjerenih pseudoudaljenosti, te naposljetku emitira podatke o pogreškama i potrebnim korekcijama. Ovim se može postići točnost od oko 2 metra u krugu nekoliko stotina kilometara od kontrolne stanice. Kako bi se mogle koristiti DGPS korekcije, potrebno je da korisnik posjeduje DGPS prijemnik te program za obradu korekcijskih podataka. [19]

Prednost DGPS sustava očituje se u povećanju točnosti pozicioniranja od 2 do 3 metra na području do 1000 kilometara od bazne stanice. Točnost se povećava približavanjem prijemnika baznoj stanici. Zbog kontinuiranog nadgledanja parametara DGPS-a, svaka promjena vidljiva je korisnicima, zbog čega DGPS ima dobru integriranost sustava. [19]

Godine 2016. provedeno je istraživanje o preciznosti DGPS-a na turskom sveučilištu METU u Ankari. Cilj istraživanja bio je usporediti točnost pozicioniranja klasičnim GPS-om s pozicijom dobivenom DGPS-om. Kako bi mogli usporediti ova dva uređaja, znanstvenici su odlučili matematičkim računom izračunati pogrešku srednje kvadratne sredine i grešku aritmetičke sredine. Izvršeno je mjerenje na 646 uzoraka, a rezultati mjerenja pokazali su da je horizontalna greška GPS uređaja iznosila 10,305 metara, dok je DGPS odstupao svega 2,299 metara. Vertikalna greška GPS-a bila je 6,413 metar, dok je kod DGPS-a iznosila 2,587. Rezultati su dokazali da je DGPS pouzdaniji i točniji način pozicioniranja od GPS-a. Tablica 2. prikazuje veću točnost DGPS sustava u odnosu na klasični GPS. [20]

Augmentacija GNSS sustava podrazumijeva poboljšanje navigacijskih sustava u smislu točnosti, pouzdanosti i dostupnosti, pritom koristeći vanjske informacije kod proračuna pozicije. Za potrebe pomorstva najviše se koriste satelitski sustavi augmentacije (engl. *Satellite Based Augmentation System - SBAS*) i kopneni sustavi augmentacije (engl. *Ground Based Augmentation System - GBAS*). GNSS sustavi poput GPS-a i Galilea koriste SBAS za povećanje točnosti pozicioniranja, dok diferencijalni sustavi kao što su DGPS i eLoran koriste GBAS augmentaciju kako bi se pružile visoko točne pozicije.

Kinematsko pozicioniranje u stvarnom vremenu (engl. *Real Time Kinematic - RTK*) je tehnika GBAS augmentacije. koja se koristi kod DGPS-a i poboljšava preciznost podataka GNSS-a. Ova tehnika koristi načelo mjerenja faze signala nosioca te informacije koje prenosi predajniku. Za povećanje preciznosti koristi se referentna zemaljska postaja ili interpolirana virtualna postaja, koja daje informacije u stvarnom vremenu, a time se postiže centimetarska preciznost pozicioniranja. [45]

Tablica 2. Usporedba točnosti GPS i DGPS sustava pozicioniranja

Točnost sustava	GPS	DGPS	Razlika
Horizontalna točnost (95%)	10,305 m	2,299 m	8,006 m
Vertikalna točnost (95%)	6,413 m	2, 587 m	3,826 m

3.1.3. GLONASS

Svemirski segment ruskog satelitskog sustava za globalnu navigaciju (rus. *Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema - GLONASS*) sadrži dvadeset i četiri satelita koji su raspoređeni u tri Zemljine orbitalne ravnine [29]

Program modernizacije GLONASS sustava započeo je 2012. godine, a obuhvaća nadogradnju postojeće svemirske, zemaljske te korisničke infrastrukture. Svemirski segment koristi satelite GLONASS-K1 koji predstavljaju prijelaz između postojećih GLONASS-M te budućih GLONASS-K2. Lansiranje GLONASS-K1 satelita započelo je 2011. godine, a koriste višestruki pristup s frekvencijskom raspodjelom (engl. *Frequency Division Multiple Access - FDMA*). Prototip GLONASS-K2 satelita predviđen je krajem 2019. godine koji bi uz FDMA koristio i višestruki pristup s kodnom raspodjelom (engl. *Code Division Multiple Access - CDMA*). Zajedno s lansiranjem K2 satelita, ruska državna agencija za svemirske aktivnosti planira lansiranje šest GLONASS-B satelita u visoko eliptične Zemljine orbite s ciljem povećanja preciznosti u urbanim područjima. GLONASS-B koristio bi isključivo CDMA frekvenciju, a dodatni sateliti planiraju se poslati između 2023. i 2026. godine. [29]

Sve efemeride GLONASS-a dane su u terestričkom koordinatnom sustavu parametarska zemlja (rus. *Parametry Zemli 1990 - PZ-90*). Cilj PZ-90 jest da se omogući usklađivanje s međunarodnim terestričkim referentnim sustavom (engl. *International Terrestrial Referent Frame - ITRF*). Najnovije ažuriranje PZ-90.11 iz 2014. godine usklađeno je s ITRF2014 na centimetarskoj razini, čime se poboljšala interoperabilnost GLONASS-a s ostalim GNSS-ovima. Uvođenje novih signala poboljšalo je točnost, pouzdanost i preciznost sustava. Trenutačna horizontalna točnost iznosi između 4 i 7 metara, a planira se poboljšati do 1 metar. Vertikalna točnost je između 10 i 15 metara, a krajnji cilj je preciznost od 1 metra. URE iznosi oko 2,6 metara, a planira se točnost od 1,4 metar, kao što je prikazano u tablici 3. [29]

Tablica 3. Točnost GLONASS pozicioniranja (Prema: Zrinjski, Barković i Matika, 2019)

Točnost sustava	Trenutna točnost	Željena točnost
Horizontalna točnost (95%)	između 4 m i 7 m	do 1 m
Vertikalna točnost (95%)	između 10 m i 15 m	
URE (95%)	Oko 2,6 m	1,4 m

3.1.4. Galileo

Galileo je europski globalni satelitski sustav koji pruža servis pozicioniranja visoke točnosti. Sustavom upravljaju zajednice država i civilne službe, a pokrenut je u suradnji Europske komisije s Europskom svemirskom agencijom. [29]

Svemirski segment Galileo sustava sastojat će se od dvadeset i četiri glavna satelita te šest rezervnih satelita. Galileo sateliti odašilju deset navigacijskih signala i jedan signal SAR-a. Emitirani signali koriste se pojasevima: E1, E5a, E5b i E6, dok se SAR signal odašilje u posebnom frekventnom području rezerviranom za hitne službe. Područje za hitne službe iznosi između 1544 MHz i 1545 MHz. Problem interferencije između satelita riješen je posebnom alternativnom modulacijom binarnog signala nosioca (engl. *Alternative binary carrier modulation - AltBOC*). Najveća prednost ove modulacije u odnosu na FDMA i CDMA jest veća otpornost na raspršivanje signala te lakša detekcija ometanja signala. Dodatnu vrijednost sustavu doprinose trenutno najprecizniji atomski satovi unutar satelita koji imaju stabilnost od 0,45 nanosekundi u periodu od 12 sati, što rezultira kašnjenjem od 1 sekunde svakih 3 milijuna godina. Galileo koristi nezavisni referentni sustav (engl. *Galileo Terrestrial Referent Frame - GTRF*), koji je nastao iz ITRF. [29]

Galileo sustav uključen je u projekt Europske svemirske agencije pod nazivom „H2H“. Cilj H2H projekta jest razvoj sustava koji će omogućiti brodovima sigurno mimoilaženje s drugim plovilima i plovnim objektima, podupirući pritom pomorce prilikom donošenja odluka i tako stvarajući temeljne uvjete za razvoj autonomnih brodova. Autonomnim brodovima potrebna je decimetarska točnost pozicijskih podataka. Kako bi se takva preciznost omogućila, koristit će se Galileo sustav u integraciji s ostalim navigacijskim senzorima. [49]

Galileo sustav, kao i GPS, može raditi na jednoj ili dvije frekvencije. Horizontalna točnost u 95 % slučajeva jednofrekventnih uređaja iznosi oko 15 metara, dok je vertikalna točnost za isti postotak oko 35 metara. Dvofrekventni uređaji dosta su precizniji, a njihova horizontalna točnost iznosi oko 4 metra u 95 %, te oko 8 metara za vertikalnu točnost. Svi navedeni podatci odnose se na besplatni segment Galileo sustava i dani su za područje

Europske Unije. Tablica 4. prikazuje usporedbu točnosti jednofrekventnih i dvofrekventnih Galileo uređaja. [29]

Tablica 4. Točnost Galileo sustava pozicioniranja (Prema: Zrinjski, Barković i Matika, 2019)

Točnost sustava	Jednofrekventni uređaji	Dvofrekventni uređaji	Razlika u pozicioniranju
Horizontalna točnost (95%)	oko 15 m	oko 4 m	11 m
Vertikalna točnost (95%)	oko 35 m	oko 8 m	27 m

3.1.5. BDS

Kineski navigacijski satelitski sustav (engl. *BeiDou Navigation Satellite System - BDS*) zamišljen je kao neovisni globalni satelitski sustav koji bi pružao besplatne usluge korisnicima, a ujedno bi bio interoperabilan s drugim GNSS-ovima kako bi se postigla međunarodna suradnja i poboljšanje kvalitete usluga. [29]

Za razliku od prethodno navedenih GNSS-ova, svemirski segment sadržavat će satelite raspoređene u tri različite Zemljine orbite. [29]

Sustav omogućuje dvije vrste usluga: otvoreni i autorizirani servis. Otvoreni servis omogućuje točnost pozicioniranja od 10 metara za globalnu pokrivenost te je potpuno besplatan. Autorizirani sustav omogućuje više opcija poput točnijih podataka o poziciji, brzini, vremenu, višu razinu integriteta te komunikacijsku uslugu. BDS sustav jako je sličan Galileu, pa s njim dijeli sličnu modulaciju čime postiže manju mogućnost ometanja signala, te manje raspršivanje signala. Također, BDS koristi neovisni referentni sustav pod nazivom kineski geodetski koordinatni sustav 2000 (engl. *Chinese Geodetic Coordinate System 2000 – CGCS 2000*) koji je sličan GTRF. [29]

Globalna horizontalna i vertikalna točnost BDS-a u 95 % slučajeva iznosi oko 10 metara, dok za azijsko-pacifičko područje iznosi oko 5 metara. Iz tablice 5. može se zaključiti da je potrebno povećati globalnu točnost kako bi se omogućila interoperabilnost s drugim GNSS-ovima u pogledu pozicioniranja autonomnih brodova. [29]

Tablica 5. Točnost BDS sustava pozicioniranja (Prema: Zrinjski, Barković i Matika, 2019)

Točnost sustava	Globalna točnost	Točnost za azijsko-pacifičko područje
Horizontalna točnost (95%)	Oko 10 m	Oko 5 m
Vertikalna točnost (95%)		

3.2. INERCIJALNI NAVIGACIJSKI SUSTAVI

Inercijalni navigacijski sustav (engl. *Inertial Navigation System - INS*) koristi samostalan sistem koji mjeri pomak vozila i određuje kolika je udaljenost prevaljena od početne točke. Uz poznatu početnu poziciju te upotrebom zbrojene navigacije, može se odrediti nova pozicija vozila. Akceleracija jest vektorska veličina koja je određena iznosom i smjerom. Akcelerometri mogu mjeriti samo iznos sile, ali ne i njen smjer. Podatak o smjeru dobiva se preko žiroskopa koji je temeljni izvor podataka svakog akcelerometra. Za razliku od ostalih navigacijskih sustava, koji podatke dobivaju od vanjskih čimbenika, INS predstavlja kompaktan i neovisan sustav koji ne treba podatke od drugih izvora. INS promatra gibanje objekta u odnosu na svoju ishodišnu os, stoga na površini Zemlje ishodišna točka obuhvaća pravac sjevera, istoka te prema Zemljinoj jezgri, dok kod vozila poput brodova ili zrakoplova obuhvaća ljuljanje (engl. *Roll*), posrtanje (engl. *Pitch*) te zaošijanje (engl. *Yaw*). Inercijalni senzori INS-a mogu biti postavljeni tako da su svi na istoj razini, te da su usmjereni u istu fiksnu točku. Senzori su postavljeni u osima x, y, z, a ravnoteža je postignuta postavljanjem u kardanski sustav. Ovaj sustav baziran je prema mjernoj platformi. Drugi način postavljanja senzora ne koristi kardanski sustav stabiliziranja, već se senzori postavljaju izravno na vozilo, čime se mjeri ljuljanje, posrtanje i zaošijanje. Žiroskop zatim mjeri kut u svakoj od osi u kratkim vremenskim intervalima, te ga predaje računalu na obradu. Računalnom obradom, podatci iz akcelerometra predviđaju navigacijske osi, čime se može izbjeći upotreba kardanskog sustava stabilizacije. [6]

3.2.1. Mehanički žiroskopi

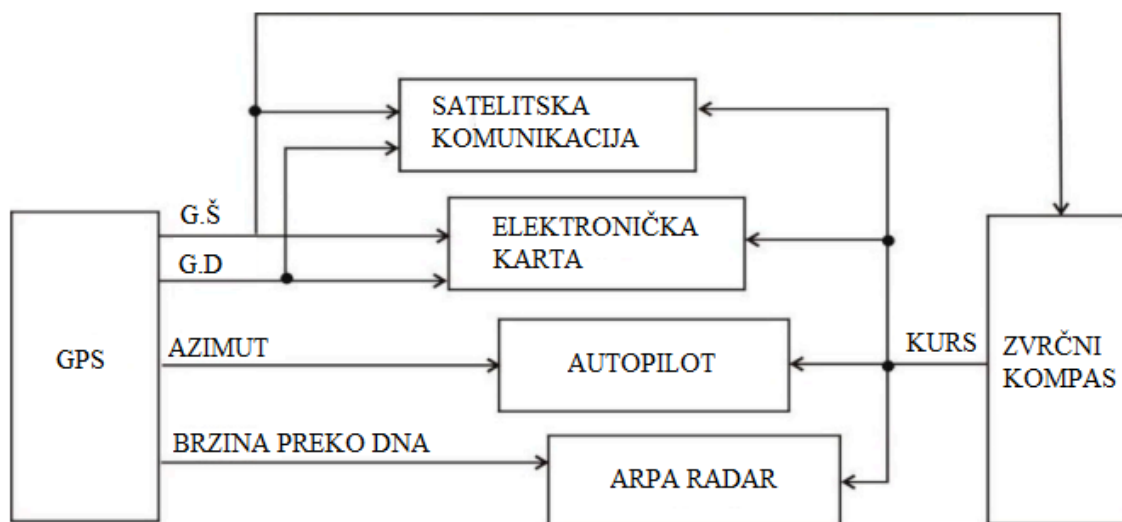
Mehanički žiroskopi imaju oblik prstenastog elektromotora, a masa rotora raspoređena je po obodu prstena. Ovakvi žiroskopi rotiraju s velikim brzinama rotacije. Zbog tehničkih zahtjeva koje ovakav uređaj mora zadovoljavati u pogledu kvalitete i izdržljivosti, dok su cijene iznimno visoke. [21]

Svi mehanički žiroskopi mogu se podijeliti na:

- žiroskope s jednim stupnjem slobode gibanja,
- žiroskop s dva stupnja slobode gibanja,
- vibrirajuće žiroskope,
- kontinuirano-linearne momentne žiroskope. [6]

Uz precizni satelitski kompas, neophodno je imati zvrčni kompas kao svojevrsnu rezervu satelitskom uslijed gubitka signala. Kako bi se omogućio razvoj autonomnih

brodova, neophodna je integracija GPS-a i zvrčnog kompasa. Podatak o geografskoj širini dobiva se putem GPS-a, te se koristi za izračun trenutnog kursa broda kod zvrčnog kompasa. GPS i zvrčni kompas usklađuju rad ostale navigacijske opreme. Kako bi se osigurala neometana satelitska komunikacija i točne elektroničke karte, GPS mora slati kvalitetne podatke o geografskoj širini i dužini, a zvrčni kompas podatak o kursu. Kako bi autopilot mogao upravljati brodom u zadanom režimu rada, potrebno ga je opskrbljivati podatcima o kursu broda. Automatski sustav za radarsko plotiranje (engl. Automatic Radar Plotting Aid - ARPA) treba podatke o brzini preko dna i kursu broda, pored onih koji se odnose na kretanje kroz vodu, kako bi se mogli računati relativni i pravi vektori okolnih objekata. Komunikacija između GPS-a i žiroskopa predstavlja najbitniju izmjenu podataka jer bi greška kod ovih uređaja utjecala na ostale navigacijske uređaje. Blok shema na slici 2. grafički prikazuje izmjenu informacija između navedenih uređaja. [10]



Slika 2. Shematski prikaz važnosti komunikacije zvrčnog kompasa i GPS-a [10]

3.2.2. Optički žiroskopi

Za razliku od mehaničkih žiroskopa koji se temelje na Newtonovim zakonima gibanja, optički žiroskopi (engl. *Fiber-Optic Gyro - FOG*) koriste inercijalno svojstvo svjetla pod nazivom Sagnacov efekt. Sagnacov efekt opisuje interferenciju svjetlosti u odnosu na kutnu brzinu. Svjetlosni snopovi izvire iz istog mjesta, ali se kreću u suprotnim smjerovima kroz optički kabel. Kada se žiroskop ne rotira, oba snopa dolaze u fotodetektor u isto vrijeme. Međutim, rotacijom žiroskopa, snop koji putuje smjerom suprotnom od smjera rotacije dolazi prije na fotodetektor u odnosu na snop koji se giba smjerom rotacije.

Prouzrokovano kašnjenje nepravilnosti u fazama snopova proporcionalno je kutnoj brzini. Pravac sjevera određuje se na način da signali dobiveni unutar žiroskopa u kombinaciji sa složenim Kalmanovim filterima određuju smjer rotacije Zemlje i tako dobivaju podatak o pravom sjeveru. [21]

Laserski žiroskopi (engl. *Ring Laser Gyro - RLG*) također koriste Sagnacov efekt, ali na drugačiji način. Glavna razlika jest u tome što se snop kod optičkih žiroskopa usmjerava u zatvorenu putanju pomoću kabela, dok se kod laserskog žiroskopa to postiže zrcalima. [21]

3.3. HIPERBOLNI NAVIGACIJSKI SUSTAVI

Hiperbola je krivulja kod koje je razlika udaljenosti između fokusa uvijek konstantna. Na ovom svojstvu temelji se rad hiperbolnih navigacijskih uređaja koji mogu mjeriti razliku vremena propagacije elektromagnetskih valova od parova odašiljača postavljenih u fokusima hiperbole ili faznu razliku na mjestu prijema tih valova. Sustav se sastoji od jednog glavnog i barem dva pomoćna odašiljača. Međusobni rad lanaca odašiljača sinkronizira se preko emitiranja glavnog odašiljača. Povezivanjem točaka istih faznih razlika ili istih razlika udaljenosti, dobivaju se hiperbole u čijim se fokusima nalaze odašiljači. Na točnost pozicije utječe čimbenik propagacije elektromagnetskih valova. Ovaj čimbenik ovisi o stanju atmosfere i ionosfere što uzrokuje odstupanja na mjestu primitka signala. Greška se povećava s porastom udaljenosti od mjesta odašiljanja. Drugi važan čimbenik koji izravno utječe na točnost jest površina sjecišta stajnica. Ako se pretpostavi da svaka stajnica može imati odstupanje, tada njihovo presjecište nije točka, već površina položaja. Površina presjecišta ovisi o kutu presijecanja te je najmanja kada se stajnice sijeku pod pravim kutem. Povećanjem udaljenosti od odašiljača, kut sjecišta se smanjuje što dovodi do povećanja greške pozicije. [18]

3.3.1. Loran - C

Sustav Loran (engl. *Long Range Navigation System - Loran*), spada među prve hiperbolne navigacijske sustave, a razvijen je za vrijeme Drugog svjetskog rata. Danas je ostao u uporabi Loran - C kao pomoćno sredstvo satelitskim sustavima pozicioniranja. Načelo rada sustava temelji se na pretpostavci da je brzina rasprostiranja radiovalova u području koje pokriva konstantna. Ako je brzina radiovalova konstantna, mjerenjem vremena koje je potrebno radiovalu da prijeđe put između odašiljača i pozicije broda, moguće je izračunati udaljenost do odašiljača. Odašiljači Loran - C sustava koriste

niskofrekventni dugi val od 100 kHz. Sustav koristi jedan glavni odašiljač te dva do četiri pomoćna kako bi formirao lance odašiljača koji pokrivaju neko područje. Točnost Loran - C sustava kreće se između 100 do 200 metara, ovisno o baznim linijama. Budućnost ovog sustava je poboljšani Loran. [18]

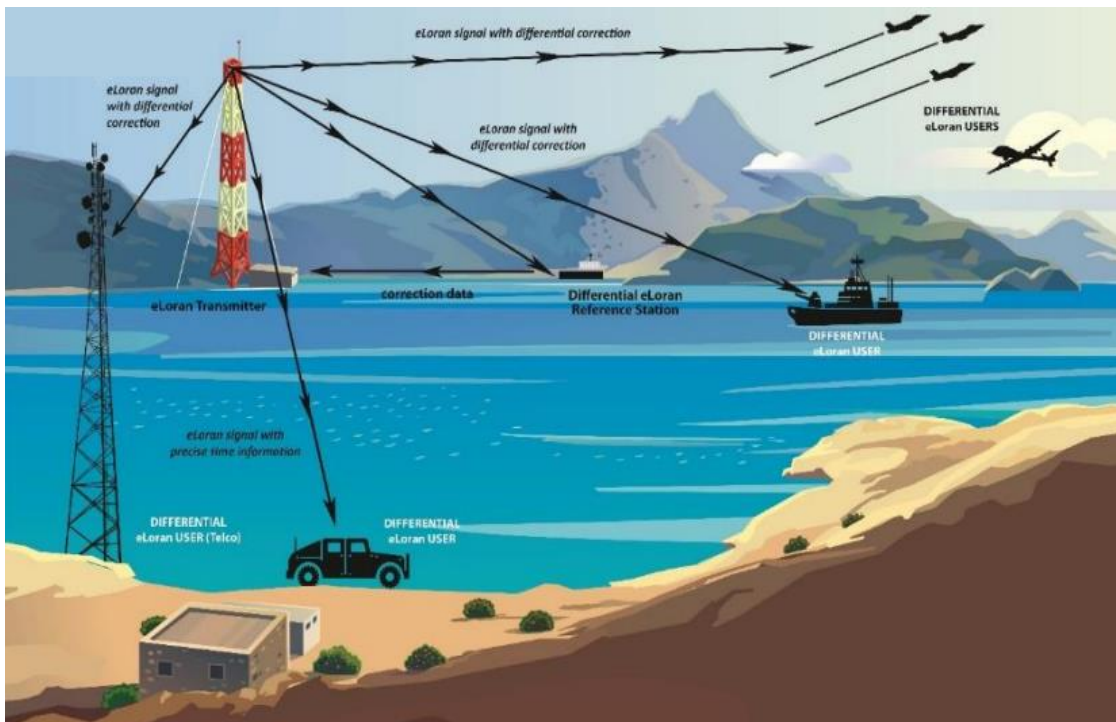
3.3.2. eLoran

Poboljšani Loran (engl. *Enhanced Long Range Navigation - eLoran*) javlja se kao svojevrsna evolucija Loran - C sustava. Unaprjeđenja koja eLoran donosi u odnosu na stariju inačicu očituju se kroz bolje performanse i dodatne servise, koji omogućuju da bude potpuna podrška satelitskim sustavima. Sustav koristi postojeće Loran - C odašiljače kako bi omogućio određivanje pozicije s većom točnošću, integritetom, dostupnošću i kontinuitetom. Odašiljači emitiraju precizne pulseve na frekvenciji od 100 kHz, a vremenska točnost mjeri se u nanosekundama. Vrijeme odašiljanja postiže se s tri precizna Cezijeva sata koja su sinkronizirana s koordiniranim svjetskim vremenom (engl. *Universal Time Coordinated - UTC*). Samim time, postiže se neovisnost od GNSS-a, tzv. „sky free UTC“. Jedna od najbitnijih razlika između prijašnjeg Loran - C, te novog eLorana jest podatkovni Loran kanal (engl. *Loran Data Channel - LDC*). LDC omogućuje širokopojasni kanal spore brzine prijenosa podataka koji sadržava digitalne poruke. Izvorna svrha ovih poruka je da prenose DGPS ispravke te ispravke koji se odnose na manje varijacije signala u lukama kod kojih se zahtijeva visoka točnost. Unatoč sporom prijenosu podataka, omogućuje se emitiranje visoko prioritetnih informacija korisnicima. Svaki radio signal, tako i eLoranov može biti ometan, međutim snaga signala koji dolazi do prijemnika mnogo je jača u usporedbi s GNSS-om. Kako bi se ometao signal od 100 kHz potrebne su velike odašiljačke antene, snaga odašiljanja koja mora biti jača od trenutnih snaga eLoran odašiljača, te opasno visoka voltaža. Zbog svega navedenog eLoran otpornije je na ometanje od GNSS-a, te je trenutno jedini sustav koji može u potpunosti pružiti alternativu GPS-u. Najznačajnije prednosti su:

- međunarodno standardizirana odašiljanja,
- odašiljanje nacionalnog UTC-a na šira područja,
- vremenska sinkronizacija s UTC-om od 100 nanosekundi,
- otporan na ometanje,
- otporan na vremenske smetnje. [9]

Sustav eLoran zadovoljava uvjete preciznosti, dostupnosti, cjelovitosti te integriteta koji se primjenjuju u aeronautici, navigaciji kopnenih vozila, pristupima lukama, manevrima

s brodom i sl. Najbitniji podatak za pomorstvo jesu preciznost i dostupnost. Loran - C omogućavao je točnost pozicioniranja oko 0,25 NM, što je neprimjereno za autonomne brodove. Novi eLoran nadilazi IMO standarde pozicioniranja od 10 metara za lučka područja. Također, brzina odašiljanja od 100 nanosekundi omogućava prijenos podataka u stvarnom vremenu. Prototip ovog sustava testiran je 2008. godine u Velikoj Britaniji. Rezultati su pokazali točnost oko 10 metara u 95 % slučajeva. Suradnjom drugih država u ovom projektu, moguće je postići bolje rezultate pozicioniranja. Trenutno je sustav aktivan u Velikoj Britaniji, Sjedinjenim Američkim Državama te Južnoj Koreji, dok Europska Unija raspravlja o njegovom korištenju na svom području. Može se zaključiti da će eLoran imati bitnu ulogu kod razvoja autonomnih brodova u pogledu povećanja točnosti pozicioniranja te kao svojevrsni „back-up“ GNSS sustavima. Slika 3 opisuje način rada eLoran sustava, kao i njegove moguće primjene. Odašiljač eLoran sustava prima diferencijalne ispravke od referentne obalne stanice. Odašiljač zatim prosljeđuje ispravke svim korisnicima eLoran sustava poput zrakoplova, brodova i automobila, kako bi se postigla zahtijevana točnost u području pokrivanja sustava. [9]



Slika 3. Princip rada eLoran sustava [68]

4. OPTIČKI SENZORI

Optički senzori su uređaji koji pretvaraju svjetlosni podražaj u električni impuls. Jedno od osnovnih svojstava ovih uređaja jest detekcija promjene količine svjetlosti. Postoje dva načina rada optičkih senzora. Prvi način rada naziva se metoda kroz jednu točku, a temelji se na principu promjene jedne faze kako bi došlo do aktivacije senzora. Druga metoda naziva se metoda distribucije točaka kod koje se senzor aktivira uz pomoć više serijski spojenih senzora ili uz pomoć jedinstvenog optičkog odašiljača. Optički senzori sve se više koriste u brojnim tehnikama i tehnologijama poput nadzora kvalitete proizvodnog procesa, medicini, meteorologiji i sl. Razvojem novih materijala dovelo je do poboljšanja osjetljivosti, a samim time i do kvalitete ovih senzora. [7]

4.1. OPTIČKO-TERMALNI SENZORI

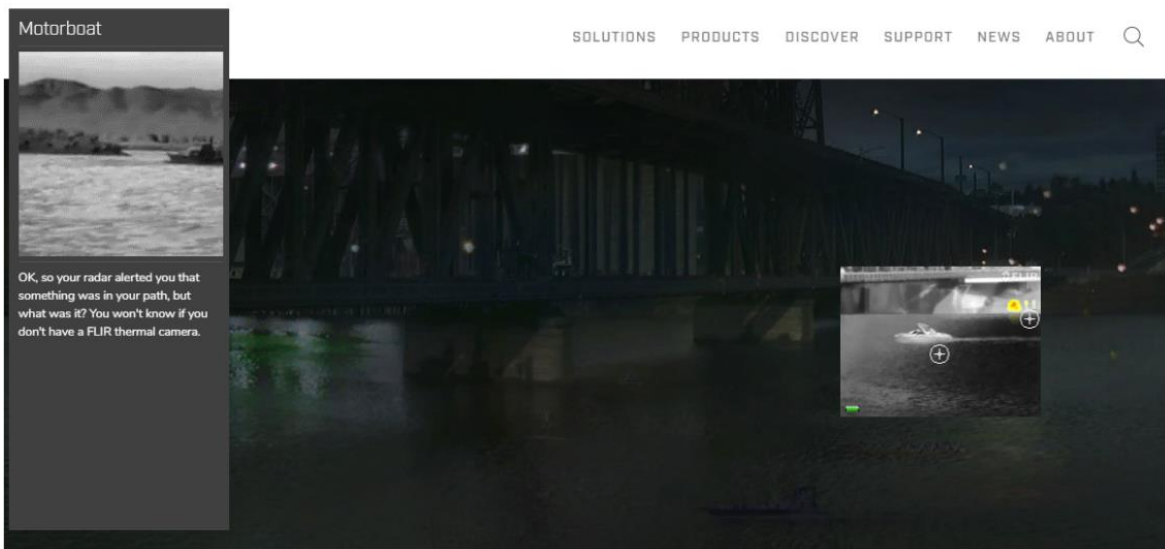
Pod videonadzorom podrazumijeva se korištenje video kamera koja prosljeđuje signale na određeno mjesto gdje se nalazi odgovarajuća oprema za nadzor. U svijetu današnjice, videonadzor se pokazao korisnim u različitim segmentima društvenog života poput sprječavanja zločina, nadzora prometa, sportskim događajima, nadzoru radnika i sl. [60]

U pomorstvu, video snimak može dovesti do pojašnjenja okolnosti prilikom istraživanja pomorskih nezgoda, povećanju sigurnosti na brodu, te olakšanom nadzoru teže dostupnih dijelova broda. [55]

Vizualno otkrivanje i mjerenje udaljenosti (engl. Visual Detection and Ranging - VIDAR) pruža do 80 puta bolju pokrivenost područja od elektro-optičkih i termalnih senzora. Kao takva, mogla bi naći primjenu kod autonomnih i daljinski upravljanih brodova. [37]

Trenutno ne postoje smjernice koje definiraju specifikacije sustava videonadzora za autonomne brodove, no na tržištu postoje proizvođači poput FLIR-a te Oscar-a čija bi tehnologija mogla zadovoljiti buduće zahtjeve autonomnih brodova. Oba proizvođača koriste VIDAR tehnologiju. Proizvod tvrtke FLIR pod nazivom „FLIR M500“ nudi žiroskopski stabiliziranu i kriogenički hladenu termalnu kameru. Svojom rezolucijom od 640x512 piksela, omogućuje otkrivanje brodova i navigacijskih objekata na kratkim i na dugim udaljenostima. Također, uređaj se sastoji od više integriranih senzora, a sadrži visokorazlučivu kameru u boji s povećanjem od 30 puta, automatsko vizualno praćenje

objekata, radarsku integraciju kojom se omogućuje praćenje plotiranih radarskih objekata kamerom, te optičko termalno povećanje kojim je moguće otkrivanje čovjeka u moru na udaljenosti od 4,9 NM i brodova na udaljenosti od 8,3 NM. Cijena ovakvog uređaja iznosi 198000 američkih dolara, što će predstavljati prepreku za implementaciju na autonomne brodove. Slika 4. predočava otkrivanje objekata noću koristeću uređaj FLIR. [46]



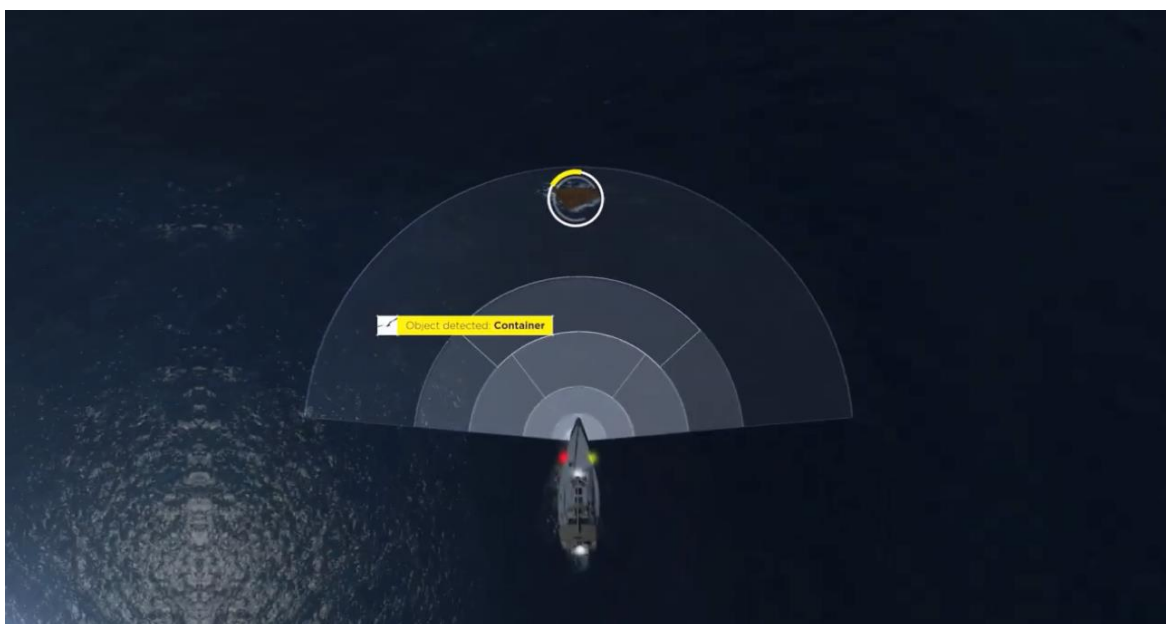
Slika 4. Noćni prikaz objekata uređaja FLIR [46]

Sustav Oscar sličan je FLIR-u, a trenutno se nalazi u eksperimentalnoj fazi. Oscar omogućuje otkrivanje plutajućih objekata na plovidbenoj ruti i potom procjenjuje rizik od sudara. Nakon završene procjene, sustav računa najbolju rutu izbjegavanja te automatski poduzima manevar. Sustav omogućuje:

- nadzor danju i noću,
- otkrivanje plutajućih objekata zahvaljujući umjetnoj inteligenciji,
- obavještavanje korisnika o riziku sudara u stvarnom vremenu,
- korisničko sučelje koje je lako za korištenje,
- otpornost na brodska gibanja.

Oscar se sastoji od jedinice za promatranje, korisničkog sučelja i procesorske jedinice. Jedinica za promatranje smještena je na vrh jarbola i kontinuirano pretražuje područje ispred broda koristeći dvije termalne i jednu dnevnu kameru. Korisničko sučelje može se instalirati na pametni telefon, tablet ili na brodska računala, a omogućuje prikaz svih plutajućih objekata i brodova koji se nalaze na ruti. Procesorska jedinica vrši analizu video snimki u stvarnom vremenu koristeći vizualne algoritme koji obavještavaju korisnika

u slučaju sudarne opasnosti. Oscar sustav trenutno se koristi na manjim plovilima, međutim izgledno je da će se ovakva tehnologija primjenjivati i na autonomnim brodovima .Slika 5. prikazuje otkrivanje plutjućih objekata noću upotrebom Oscar uređaja. [51]



Slika 5. Otkrivanje objekata noću uređajem Oscar [51]

4.2. NOSIOCI OPTIČKO-TERMALNIH SENZORA

Bespilotne zračne letjelice (engl. *Unmanned Aerial Vehicle - UAV*) ili tzv. dronovi, predstavljaju letjelice koje imaju mogućnost leta bez ukrcanog pilota. Kontrola drona vrši se radiovalovima ili autonomno prema već unaprijed određenoj ruti. Često su opremljeni s optoelektričnom opremom za nadzor i nadgledanje koja se nalazi u „glavi drona“. Najbitnija obilježja dronova su brz nadzor željenog područja ili objekta bez dodatne opreme. Najveća prednost ovih uređaja očituje se u jako malom vremenu potrebnom za pripremanje drona za let, dok im je najveća prepreka ograničen domet leta zbog kapaciteta baterije.[17]

Vodeći proizvođači ove tehnologije na tržištu su Sentinel i UMS Skeldar. VIDAR senzor tvrtke Sentinel sastoji se od jednog ili višestrukog 9 mega pikselnog senzora koji je spojen sa softverskom automatizacijom, pri čemu se omogućuje otkrivanje objekata na morskoj površini u stvarnom vremenu. Senzor radi slično kao radari koji se koriste u zračnom prometu, međutim prikuplja vizualne podatke, vrši selekciju te šalje operateru otkrivene objekte kako bi se donijela ispravna odluka. Senzor autonomno otkriva svaki plutajući objekt, omogućuje visoko razlučivu sliku i daje koordinate obalnog centru.

Područje koje senzor može pokrivati iznosi oko 20 NM. Sustav uspješno otkriva čovjeka u moru na udaljenosti od 1,7 NM, splav kapaciteta šest osoba na udaljenosti od 3,5 NM te velike brodove na udaljenosti od 30 NM. Sve navedene vrijednosti primjenjive su do stanja mora od 6 bofora. Trenutno sustav koriste Američka obalna straža, Australijska ratna mornarica te Britanska ratna mornarica. [37]

UMS Skeldar-ove značajke jako su slične sa Sentinelovim. Njihov VIDAR sustav sastoji se od pet ili deset senzora za 180 ili 360 stupnjevske otkrivanje. Montiranje senzora na letjelicu vrši se kao zasebna jedinica koja kontinuirano vrši nadzor morskog u području od 20 NM sa stanjem mora od 6 bofora. Za razliku od Sentinel-ove tehnologije, UMS Skeldar pruža mogućnost povećavanja slike detektiranih objekata. Usporedba ova dva uređaja prikazana je u tablici 6. [62]

Tablica 6. Prikaz značajki Sentinel i UMS Skeldar uređaja

Uređaj	Sentinel	UMS Skeldar
Broj senzora	1 ili više	5 ili 10
Otkrivanje čovjeka u moru	1,4 NM	Nema podataka
Otkrivanje splavi za šest osoba	3,5 NM	
Otkrivanje brodova	30 NM	
Područje pokrivanja	20 NM	20 NM
Primjenjivo stanje mora	6 bofora	6 bofora

5. RADIO I SVJETLOSNI DETEKORI

Radarski senzori imaju sposobnost detekcije objekta na putu kojim ide vozilo tako da čovjek ili automatizirani sustav poduzmu pravovremene radnje kako bi se izbjegla nezgoda. Radio valovi već se desetljećima koriste za otkrivanje objekata i opasnosti. Svjetlosni radari su noviji sustavi koji su rašireni u vojnoj industriji i geodeziji, a sve se više primjenjuju kao eksperimentalna tehnologija u razvoju autonomnih vozila. Svi radarski senzori rade na principu određivanja udaljenosti povratnom jekom. Senzor odašilje visokofrekventni radioval, svjetlosni val ili audioval u prostor. Ako se neki objekt nalazi u smjeru rasprostiranja valova, dio energije vraća se natrag u prijemnik senzora koji potom obavještava korisnika o dolazećoj prepreci. [64]

5.1. RADAR

Radar (engl. *Radio Detection and Ranging - Radar*) je uređaj za otkrivanje i smjerenje objekata radiovalovima, i dio je standardne navigacijske opreme suvremenog broda.. Radar je moguće koristiti zajedno sa sustavom za automatsku identifikaciju plovila (engl. *Automatic Identification System - AIS*), automatskim sustavom za radarsko plotiranje (engl. *Automatic Radar Plotting Aid - ARPA*), sustavom za određivanje pozicije vlastitog broda, elektroničkim karatama i sl. Postoje dvije vrste pomorskih radara, „X-band“ koji radi na frekvencijskom području od 10 GHz te „S-band“ koji radi na 3 GHz. Zbog svoje visoke frekvencije „X-band“ radar omogućuje jasniju sliku i bolju razlučivost, dok „S-band“ omogućuje jasniju sliku prilikom kiše, magle ili valova, te je bolji za pretraživanje većih udaljenosti. [8]

5.2. MILIMETARSKI RADAR

Milimetarski valovi (engl. *Milimeter Wave - mmW*) posebna su vrsta radarske tehnologije koja koristi elektromagnetske valove kratke duljine. Radarski uređaji mmW-a odašilju valne duljine milimetarskog raspona. Samim time, antene ovakvih uređaja jako su male što je prednost prilikom ugradnje sustava. Sustav mmW-a koristi frekventno područje između 76 i 81 GHz, što odgovara valnoj duljini od 4 mm. Rezultat toga jest visoka točnost. Osim standardne primopredajničke opreme, mmW radarski sustavi koriste analogne komponente poput sata, te digitalne komponente kao što su analogno-digitalni pretvarači,

mikrokontroleri te procesori digitalnih signala. Zbog svega navedenog, ovi sustavi su jako složeni, što rezultira visokom cijenom i povećanom potrošnjom električne energije kako bi se mogle postići visoke frekvencije. [14]

Ugradnja mmW-a moguća je u MASS plovilima s ciljem prikupljanja i obrade podataka te njihove integracije s drugim sensorima, a sve s ishodom povećanja „svjesnosti“ MASS brodova. [11]

Slika 5. prikazuje moguću buduću razvoj ove tehnologije. Plovilo koristi dalekometni mmW radar dometa 450 metara i mmW za udaljenosti do 150 metara. Integracijom ova dva radara može se postići jako brza reakcija kod izbjegavanja sudara na moru. Ugradnja ovakvih senzora primjenjiva je na autonomne brodove kako bi se postigla pokrivenost oko broda bez mrtvih kutova. [33]



Slika 6. Budući koncepti razvoja mmW tehnologije [33]

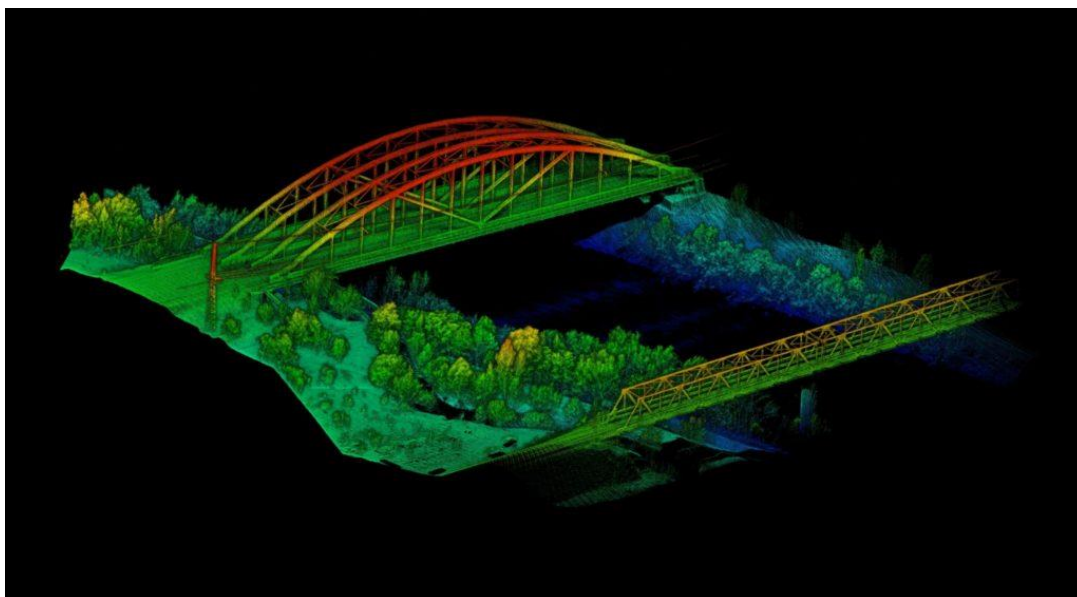
Znanstvenik Shenghan Zhang dizajnirao je autonomni brod koji kombinira mmW s vizualnim sensorom. Vizualni senzor šalje sliku objekta ispred sebe na obradu koja potom prolazi kroz algoritme kako bi se prepoznala kontura objekta ispred plovila. Povećanje točnosti obrisa postiže se prostornim koordinatama koje daje visoko precizni mmW, te ih se spaja s vizualnim informacijama kako bi se odredila točna pozicija objekta i njegova površina. Ovakav način prepoznavanja objekata može se koristiti kao protusudarni sustav autonomnih brodova s visokom točnosti i boljom pouzdanosti od klasičnog radarskog sustava. [28]

5.3. LIDAR

Svjetlosni radar (engl. *Light Detection and Ranging - LiDAR*) koristi svjetlosne senzore za mjerenje udaljenosti između uređaja i smjerenog objekta. [44]

Uporabom ove tehnologije dobivaju se visoko razlučivi trodimenzionalni podatci koji uporabom posebnog programa mogu biti prebačeni u virtualni prostor. Ovaj sustav moguće je koristiti na kopnu, vodi, zraku i svemiru. LiDAR sustavi montirani na letjelice sastoje se od LiDAR senzora, GPS prijemnika, inercijalne jedinice za mjerenje, računala te uređaja za prikupljanje podataka. LiDAR sustav odašilje lasersku zraku na zrcalo koje je projicira prema tlu, a najčešće se nalazi na fiksnom krilu zrakoplova ili helikoptera. Zraka potom skenira s jedne strane na drugu, dok letjelica vrši prelet područja istraživanja. Razlučivost skeniranja iznosi između 20000 i 150000 točaka po sekundi. Kada laserska zraka pogodi objekt, reflektira se natrag u zrcalo, te započinje mjerenje vremenskog perioda odašiljanja zrake i njenog primitka u senzor. Takvi podatci potom se obrađuju, pretvaraju u udaljenost, te ispravljaju uz pomoć GPS prijemnika letjelice, INS-a i terestričkih GPS stanica. Uloga GPS-a prilikom ispravljanja jest određivanje geografske širine, dužine i visine letjelice. INS služi za određivanje valjanja, posrtanja i zaošijanja letjelice s ciljem određivanja izlaznog kuta laserske zrake u odnosu na površinu Zemlje. Stacionarni LiDAR koristi sličan način rada kao i zračni, uz iznimku da nije potreban INS jer se LiDAR senzor nalazi na tripodu koji omogućuje njegovu rotaciju za 360 stupnjeva. [35]

LiDAR-ove dalekometne sposobnosti omogućuju bolje prikupljanje informacija u odnosu na klasični radar, analizu i donošenje odluka, neovisno o vremenskim uvjetima, te omogućuje izbjegavanje sudara na moru. Ovo obuhvaća razlikovanje pojedinačnih brodova kada su grupirani, te prepoznavanje veličine brodova, uključujući jako male brodove. Mjerenje u stvarnom vremenu osigurava precizno mjerenje udaljenosti objekata, infrastrukture okružene morem ili kopnom, te minimalnu lažnu jeku čime se pružaju točni podatci u svim uvjetima rada. LiDAR je moguće integrirati s navigacijskom opremom poput klasičnog radara, AIS-a, ECDIS-a i slično. Tipičan prikaz okoline dobiven LiDAR uređajem prikazan je na slici 6. [36]



Slika 7. Izgled podataka dobivenih LiDAR tehnologijom [71]

6. SENZORI DUBINE

Od najranijih početaka plovidbe, mjerenje dubine bilo je iznimno važno. Postupak mjerenja dubine naziva se sondiranje, a uređaji koji mjere dubinu nazivaju se dubinomjeri. Izum mjerenja dubine upotrebom zvuka omogućuje nove načine mjerenja dubine. Odašiljač odašilje zvučni impuls okomito na morsko dno. Impuls pritom prolazi kroz slojeve morske vode različite gustoće, te se odbija od morskog dna. Dio zvuka vraća se u prijemnik. Neki uređaji integriraju odašiljač i prijemnik u jedinstveni sklop koji se naziva primopredajnik. Računalo vrši precizno mjerenje vremena odaslanog i primljenog signala, te uz poznatu brzinu širenja zvuka u morskoj vodi, računa dubinu. [42]

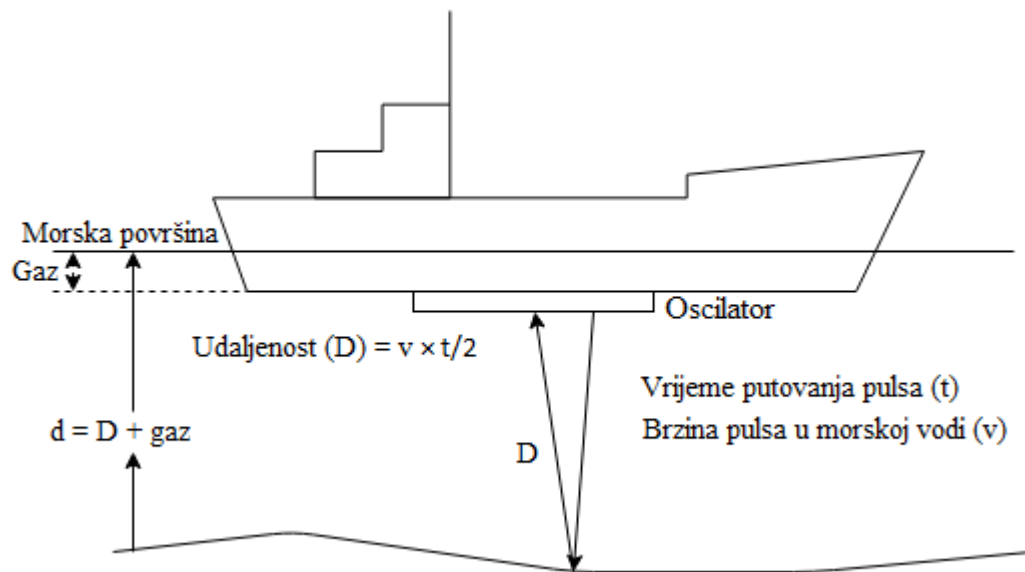
Dubina mora definirana je kao udaljenost razine mora od određene točke na morskom dnu ili podvodne prepreke. Zbog utjecaja vjetera, morskih struja, valova i sl., morska dubina nije konstantna, već se neprestano mijenja. Ovisno o izdavaču karte, dubine se mogu razlikovati zbog različitih načina određivanja hidrografske nule koja predstavlja referentnu točku za mjerenje dubina mora. Dubine se mogu označavati brojkama ili izobatama, a ovisno o izdavaču mogu biti metričke ili imperijalne mjerne jedinice. Prema namjeni, postoje dvije vrste dubinomjera, a to su navigacijski dubinomjeri i oceanografski dubinomjeri. Navigacijski dubinomjeri mogu se podijeliti u tri glavne skupine: ručni dubinomjeri, hidrostatski dubinomjeri i ultrazvučni dubinomjeri. [3]

Danas se najviše koriste ultrazvučni dubinomjeri [43]

6.1. ULTRAZVUČNI DUBINOMJER

Ultrazvučni dubinomjer koristi načelo zvučnog mjerenja dubine prema kojem se zvučni valovi odašilju iz dna broda, te se mjeri vrijeme potrebno zvučnom valu da se vrati natrag u prijemnik. Prema poznatoj brzini propagacije zvuka u morskoj vodi, moguće je izračunati dubinu ispod kobilice. Za korištenje ovog načela potrebno je poslati energiju u obliku signala. Kod ultrazvučnog dubinomjera, nije moguće odašiljati elektromagnetski signal zbog njegova velikog izobličenja u vodi, dok svjetlosni val nije moguće koristiti jer na morskom dnu nema zrcalne površine od koje bi se zraka mogla odbiti natrag u prijemnik. Zvuk se širi titranjem čestica u mediju, stoga je moguće odašiljanje vibracija vrlo male magnitude kako bi se izmjerile velike dubine. Postoje dva načina dobivanja zvučnih valova: magnetostriksijski i piezoelektrični. Načelo magnetostriksije koristi promjenu duljine feromagnetskih materijala u magnetskom polju. Nikal se najčešće koristi jer mu se duljina

najviše mijenja. Magnetrostrikcijom je moguće postići frekvencije od nekoliko stotina kiloherca. Elektrostrikcija koristi svojstvo kristala da prilikom sabijanja ili razvlačenja proizvodi vibracije, a moguće je dobiti frekvencije do 1 MHz. Zvučni valovi potom se odašilju vertikalno prema morskome dnu u rasponu između 5 i 600 pulseva u minuti, a širina pojasa iznosi između 12 i 25 stupnjeva. Pulsevi se odbijaju se od dna u obliku jeke. Prijemnik detektira jeku te je pretvara u električni signal koji se šalje printeru ili računalu kako bi se grafički prikazao izgled morskog dna. Princip rada dubinomjer opisan je na slici 7. [59]



Slika 8. Princip rada ultrazvučnog dubinomjera [59]

6.2. JEDNOSNOPNI DUBINOMJER

Jednosnopni dubinomjer je najrašireniji uređaj za mjerenje morskog dna. Ovim uređajima mjeri se morsko dno dok je brod u vožnji. Izmjerene dubine potom se spajaju u trodimenzionalni prikaz morskog dna. Kontrolna jedinica šalje signal odašiljaču da proizvede zvučni val. Odašiljač generira električni signal jedinstvenih karakteristika. Signal se potom odašilje na morsko dno odakle se odbija te se vraća u prijemnik. Povratni signal slabije je snage od odašlanog signala, no njegova karakteristika ostaje nepromijenjena. Mjerenjem vremena koje je potrebno zvuku da prijeđe put do dna i natrag, moguće je odrediti dubinu. [73]

Najviše se koriste jednosnopni ultrazvučni dubinomjeri poput KNUDSEN 320N i FURUNO FE-800. Uređaj KNUDSEN 320N vrhunac je današnje tehnologije jednosnopnih

ultrazvučnih dubinomjera. Minimalno održavanje, jednostavno postavljanje te mogućnost upotrebe bez korištenja ruku čine ga najfleksibilnijim dubinomjerom na tržištu. Uređaj ispisuje podatke bez upotrebe papira pomoću aktivne matrice. Podatci o dubini dobivaju se u stvarnom vremenu i pohranjuju se u unutrašnju memoriju uređaja koja ima kapacitet od 800 sati snimanja, odakle je omogućen uvid u ehograf s opcijom ispisa podataka u papirnatom obliku. Svi signali obrađuju se u digitalnom obliku, čime se postižu veće performanse i stabilnost digitalnih filtera, a samim time i veća kvaliteta podataka. Podatci o dubini mogu biti prikazani u stopama, sežnjima te metrima. Greška ovog uređaja iznosi oko 1 metar na 1000 metara dubine, a trenutno se koristi u vojne svrhe. [61]

FURUNO FE-800 ima mogućnost istovremenog praćenja dubine na pramčanom i krmenom dijelu. Integracija uređaja s osobnim računalom omogućuje spremanje, snimanje te printanje ehografskih podataka s računala. Podatci o dubini za posljednja 24 sata čuvaju se na unutrašnjoj memoriji uređaja. Zvučni i svjetlosni signali obavještavaju pomorca ukoliko dođe do smanjenja dubine ispod kobilice ili do nestanka obrisa morskog dna uslijed povećanja dubine. Uređaj tolerira valjanje do +/- 10 stupnjeva i posrtanje do +/- 5 stupnjeva. Pogreška na 200 metara dubine iznosi oko 5 metara ili 2,5 % izmjerene dubine. Tablica 7. prikazuje međusobnu usporedbu ovih uređaja. [47]

Tablica 7. Usporedba jednosnopnih dubinomjera KNUDSEN 320N i FURUNO FE-800

Uređaj	KNUDSEN 320N	FURUNO FE-800
Kapacitet snimanja	800 sati	24 sata
Ispis podataka	Papirnato ili digitalno	Papirnato
Poništavanje utjecaja valjanja	Nema podatka	+/- 10 stupnjeva
Poništavanje utjecaja posrtanja		+/- 5 stupnjeva
Greška uređaja	1 m za svakih 1000 m dubine	5 m ili 2,5 % dubine za svakih 200 m

6.3. VIŠESNOPNI DUBINOMJER

Višesnopni dubinomjer je uređaj koji može pokriti veću površinu morskog dna s jednim odašiljanjem signala. Razlučivost podvodnog snimka ovih uređaja veća je od razlučivosti jednosnopnih dubinomjera. Senzori su postavljeni tako da svaki senzor pokriva određeni dio morskog dna, a zajedno pokrivaju površinu okomitu na smjer kretanja broda. Ta površina zove se „swath“. Swath širina definira se kao udaljenost okomita na smjer

kretanja broda ili postavljena po krmi, a mjeri se kao unaprijed definiran kut ili dužina koja se mijenja s dubinom. Višesnopni dubinomjer skraćuje vrijeme mjerenja dubine, daje veću razlučivost reljefa morskog te pokriva veću morsku površinu. Zbog svega navedenog, ovakvi sustavi skuplji su od jednosnopnih dubinomjera. [73]

Kongsberg je jedan od vodećih proizvođača višesnopnih dubinomjera u pogledu inovacija i kvalitete. Njihov uređaj EM 124 predstavlja trenutni vrhunac višesnopnih dubinomjera. Swath područje pokriveno je kroz šesnaest neovisnih sektora, a svaki sektor aktivno je stabiliziran u stvarnom vremenu kako bi se poništili negativni utjecaji valjanja, posrtanja i zaošijanja broda. Zbog podjele područja u sektore, smanjio se utjecaj lažne jeke i višestrukog odbijanja signala, što je dovelo do pouzdanijih podataka o dubini. Uređaj se može primjenjivati na dubinama od 20 do 11000 metara, što ovisi o temperaturi mora, okolnoj buci i tipu morskog dna. Swath širina je šest put veća od mjerene dubine ili veća od 40 km. Stabilizacija u stvarnom vremenu poništava valjanje do +/- 15 stupnjeva, posrtanje do +/- 10 stupnjeva i zaošijanje do +/- 10 stupnjeva. [66]

Tvrtka Teledyne Marine s uređajem HydroSweep DS konkurira EM 124. HydroSweep DS uređaj pokriva dubine od 10 do 11000 metara. Osim analize vodenog stupca, uređaj prikazuje reljef morskog dna u trodimenzionalnom prostoru. Stabilizacija poništava valjanje do +/- 15 stupnjeva, posrtanje do +/- 10 stupnjeva te zaošijanje do +/- 5 stupnjeva. Karakteristike ovih uređaja prikazane su u tablici 8. [38]

Tablica 8. Usporedba višesnopnih dubinomjera KONGSBERG EM 124 i HydroSweep DS

Uređaj	KONGSBERG EM 124	HydroSweep DS
Dubina snimanja	od 20 m do 11000 m	od 10 m do 11000 m
Swath širina	šest puta veća od mjerene dubine ili 40 km	Nema podataka
Stabilizacija valjanja	+/- 15 stupnjeva	+/- 15 stupnjeva
Stabilizacija posrtanja	+/- 10 stupnjeva	+/- 10 stupnjeva
Stabilizacija zaošijanja	+/- 10 stupnjeva	+/- 5 stupnjeva
Prikaz reljefa morskog dna	Nema podataka	Da

7. SENZORI BRZINE

Brzina broda definira se kao prevaljeni put (1 NM) u jedinici vremena (1 h), a izražava se najčešće u čvorovima (čv). Izraz čvor potječe iz doba jedrenjaka, kada se brzina mogla mjeriti upotrebom konopa s privezanom daskom. Konop bi se podijelio na čvorove određene duljine, a broj ispuštenih čvorova u jedinici vremena označavao je brzinu broda. Brzina broda danas se mjeri pomoću brzinomjera. [2]

Senzori brzine koriste se za mjerenje brzine objekta ili vozila. Postoje brojne vrste senzora brzine poput senzora brzine okretaja, brzinomjera, LiDAR senzora, Doppler radara i slično. [54]

7.1. ELEKTROMAGNETSKI BRZINOMJER

Elektromagnetski brzinomjeri mjere brzinu broda kroz vodu koja se temelji na induciranoj promjeni magnetskog polja u senzoru, a javlja se kao posljedica vožnje broda. Ovakve dubinomjere odlikuje visoka točnost jer nemaju pokretnih dijelova, stoga je jako bitno ispravno postavljanje i kalibracija. [2]

Na tržištu postoje brojni proizvođači brzinomjera, no valja istaknuti tvrtke BEN Marine te Sperry Marine. Elektromagnetski brzinomjer „ANTHEA EM“ proizvođača BEN Marine koristi se na trgovačkim i putničkim brodovima. Uređaj odlikuje 48 milimetarski senzor kojeg je moguće integrirati s ostalim proizvodima navedenog proizvođača. Greška u mjerenju iznosi 0,5% mjerene brzine broda. Glavne karakteristike brzinomjera su: automatska kontrola osjetljivosti uređaja, mogućnost testiranja ispravnosti rada te mogućnost podešavanja parametara za oglašavanje alarma. Uređaj u potpunosti zadovoljava IMO zahtjeve. [41]

Sperry Marine-ov proizvod NAVIKNOT Multisensor dizajniran je s najmodernijom tehnologijom te je prikladan za sve vrste brodova. Pogodnosti koje izbor ovakvog uređaja nosi su: niska cijena, jednostavna instalacija, cjelodnevna tehnička podrška, velik broj funkcija i sl. Karakteristike NAVIKNOT Multisensora su sljedeće: preciznost mjerenja brzine od +/- 1 % ili 0,1 čvor, odnosno što je veće, zaslon u boji, ograničenje brzine za određene otklone kormila, mogućnost postavljanja alarma, funkcija preuzimanja kontrola s glavnog na sporedni uređaj, brojač prijeđene udaljenosti (dnevno ili ukupno) i sl. Tablica 9. prikazuje usporedbu ova dva brzinomjera. [53]

Tablica 9. Usporedba uređaja ANTHEA EM i NAVIKNOT

Uređaj	ANTHEA EM	NAVIKNOT
Greška mjerenja	0,5 % izmjerene brzine	1% izmjerene brzine ili 0,1 čvor, ovisno što je veće
Alarmiranje korisnika	Da	Da
Integracija s ostalom opremom proizvođača	Da	Da

7.2. ULTRAZVUČNI BRZINOMJER

Ultrazvučni brzinomjeri mjere brzinu broda na temelju Dopplerova efekta koji otkriva svako valno gibanje kao povećanje frekvencije ako se izvor valova i prijemnik međusobno približavaju, odnosno kao smanjenje frekvencije kada se udaljavaju. Za mjerenje brzine koristi se snop ultrazvučnih signala koji je usmjeren od kobilice broda prema morskom dnu. Kako bi se poništili učinci gibanja broda, u predajniku postoje dva vibratora koji usmjeruju snopove ultrazvučnih signala, te mjere srednje vrijednosti brzine preko dna. Ovakvo mjerenje brzine moguće je za dubine do 200 metara. Uslijed povećanja dubine, uređaj koristi odraz gušćeg sloja vodene mase i tada pokazuje brzinu broda kroz vodu. Također, uređaj ima mogućnost prikaza brzine kroz vodu i za manje dubine. [2]

Među boljim ultrazvučnim dubinomjerima valja istaknuti FURUNO DS-60 i JRC JLN-740 seriju. FURUNO DS-60 je precizan, ultrazvučni dubinomjer koji zadovoljava zahtjeve IMO-a. Dizajniran je za brodove preko 50000 BT. Zbog stabilizacije u tri osi, poništava se negativni utjecaj, valjanja, posrtanja i zaošijanja, te se tako omogućava točna informacija o brzini broda. Podatak o brzini može biti prikazan kao brzina preko dna ili brzina kroz vodu, te se prikazuje kao kretanje broda naprijed-natrag i lijevo-desno. Precizno mjerenje brzine prilikom dokovanja, pristajanja ili kod uskih kanala bitno je za sigurnost plovidbe broda. Točnost podataka o brzini preko dna kada je brzina broda manja od 1 čvor iznosi +/- 0,01 m/s, odnosno vrijednost koja je veća. Ako je brzina broda veća od 1 čvor, točnost iznosi +/- 1 % izmjerene brzine ili +/- 0,1 čvor, odnosno uzima se podatak koji je veći. Netočnost podataka o brzini kroz vodu iznosi +/- 1 % izmjerene brzine ili +/- 1 čvor, odnosno podatak koji je veći. Brzinu preko dna moguće je mjeriti do dubine od 200 m. [48]

JRC JLN-740 serija zadovoljava IMO standarde te je primjenjiva na sve brodove iznad 300 BT. Točnost mjerenja brzina kod ovog uređaja iznosi 0,03 čvora ili 0,3 % izmjerene brzine. Uređaj ima mogućnost otkrivanja mjehurića zraka na primopredajniku te

obavještava korisnika o smanjenoj preciznosti. Ovo je zasad jedini uređaj s ovakvom opcijom. [65]

Tablica 10. Usporedba uređaja FURUNO DS-60 i JRC JLN-740

Uređaj	FURUNO DS-60	JRC JLN-740
IMO zahtjevi	Da	Da
Točnost mjerenja	+/- 1% izmjerene brzine ili +/- 1 čvor kod brzine iznad 1 čvora	0,03 čvora ili 3% izmjerene brzine
Otkrivanje mjehurića na primopredajniku	Ne	Da
Stabilizacija u tri osi	Da	Ne

7.3. SATELITSKI BRZINOMJER

Satelitski brzinomjer javlja se pojavom GNSS-a. Osim pozicioniranja, sustav omogućuje mjerenje brzine i prevaljenog puta. Pojavom DGPS-a, omogućena je velika točnost pozicioniranja, a samim time i mjerenja brzine. Točnost DGPS-a iznosi do 0,1 čvor. [39]

Princip rada uređaja je sljedeći: satelitski senzor koristi GPS satelitske signale kako bi odredio uzdužnu i poprečnu brzinu broda kroz vodu. Dva GPS prijemnika, trostupanjski žiroskop te dvostruka antena određuju smjer, brzinu i kurs broda. Smjer se može zamijeniti linijom uzdužnice broda, dok se brzina i kurs mogu zamijeniti vektorima kretanja, odnosno smjerom kretanja broda nad dnom. Sateliti šalju podatke o smjeru koji se obrađuju u elektroničkoj jedinici. Vektori kretanja koriste se za razlučivanje između translacijskog i rotacijskog kretanja plovila kako bi se odredila brzina pramca i krme. [52]

Primjeri satelitskih brzinomjera su FURUNO GS-100 i Wärtsilä SATLOG SLS 4120. Oba brzinomjera zadovoljavaju zahtjeve IMO-a te se primjenjuju na brodovima preko 50000 BT. Uređaj FURUNO GS-100 ima mogućnost prikaza longitudinalne brzine broda i transverzalne brzine pramca i krme. Zbog ugrađenog satelitskog kompasa moguće je dobiti transverzalnu brzinu broda na bilo kojoj poziciji broda. Također, uređaj daje podatke o nagibu, valjanju i posrtanju koje prosljeđuje radaru, ECDIS-u i AIS-u. GS-100 daje točnost brzine od +/- 0,02 čvora. [63]

Wärtsilä SATLOG SLS 4120 mjeri brzinu preko dna koristeći podatke dobivene od zvrčnog kompasa. Ako uređaj koristi signal GPS-a, točnost pozicioniranja iznosi oko 5 metara, dok DGPS signal daje točnost od 1 metra. Kod mjerenja brzine, GPS signal daje

točnost od 0,2 čvora ili 2 % izmjerene brzine, odnosno uzima se veća izmjerena vrijednost. DGPS točnost iznosi 0,1 čvor ili 1 % izmjerene brzine, a uzima se veća izmjerena vrijednost. Tablica 11. prikazuje njihovu međusobnu usporedbu. [72]

Tablica 11. Usporedba uređaja FURUNO GS-100 i Wärtsilä SATLOG SLS 4120

Uređaj	FURUNO GS-100	Wärtsilä SATLOG SLS 4120
IMO zahtjevi	Da	Da
Točnost mjerenja	+/- 0,02 čvora	0,2 čvora ili 2% izmjerene brzine
Ugrađeni satelitski kompas	Da	Ne
Prikaz longitudinalne brzine broda	Da	Ne
Prikaz transverzalne brzine pramca i krme	Da	Ne

8. KOMUNIKACIJA AUTONOMNIH BRODOVA

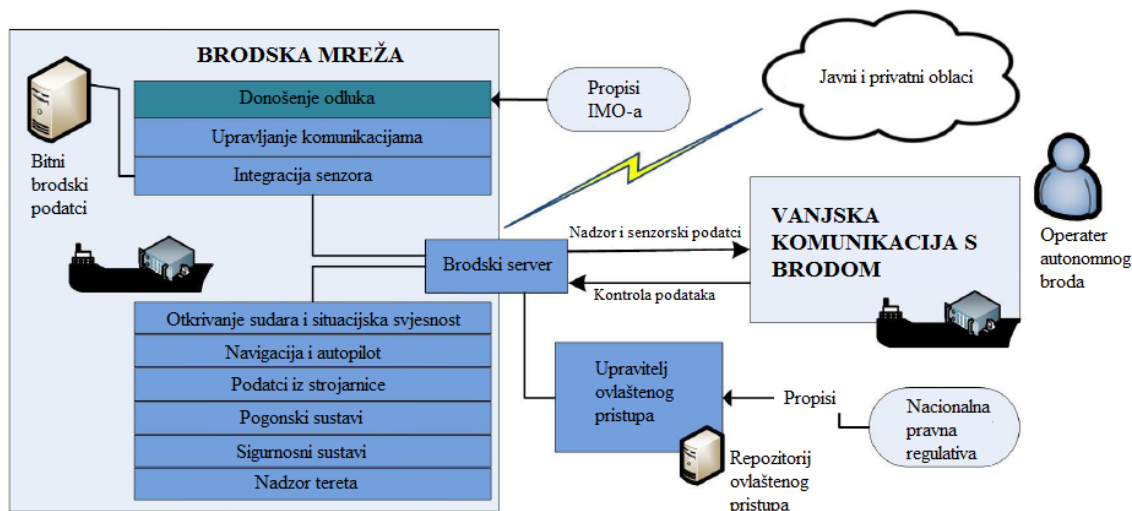
Komunikacija predstavlja jednu od najvećih prepreka za razvoj autonomnih brodova. Općeniti zahtjev za komunikacijom nalaže da budući brodovi trebaju dobivati informacije od ljudi s kopna, čime je komunikacija između broda i obale ključna. Kako bi se omogućila dovoljna zalihost i smanjio rizik, komunikacija mora biti točna, usklađena s drugim sustavima i neometana. Trenutna tehnologija ne zadovoljava ove zahtjeve, no nadolazeća 5G tehnologija zajedno s budućim mrežama imat će mogućnost interkonektivnosti. Interkonektivnost se definira kao mogućnost komunikacije kod koje korisnik koristi dvije ili više različitih mreža s različitim pristupnim tehnologijama. [12]

Autonomni i daljinski upravljani brod prikupljat će podatke zahvaljujući velikom broju senzora poput LiDAR-a, radara, infracrvenih kamera, senzora temperature i sl. Korištenje visokorazlučivih senzora dovodi do povećanja kvantitete podataka, stoga je neophodna integracija senzora kako bi se slale samo neophodne informacije ljudskom operateru ili sustavu za odlučivanje. Ovim se izbjegavaju mogući problemi preopterećenja sustava. Uvijek bi trebala postojati dostupna komunikacija između „virtualnog zapovjednika“ i ljudskog operatera kako bi se mogla donijeti ispravna odluka kada autonomni sustav za odlučivanje ne može riješiti problem. [12]

Uspješna i pouzdana komunikacija zahtjeva kvalitetan brodski server koji bi omogućavao interoperabilnost različitih mreža s ostalim brodskim uređajima, uključujući satelite. Server bi predstavljao brodsku poveznicu koja spaja senzore i aktuatora sa sustav odlučivanja, a potom i s vanjskim svijetom. Također, uloga servera uključivala bi komunikacijsku vezu između javnih i privatnih „oblaka“, čime bi se omogućila izvanmrežna podrška i kontrola svih brodskih uređaja u stvarnom vremenu. Podatci o brodu slali bi se u „oblak“ odakle bi operateri imali pristup za korištenje upravljačkih podataka kako bi se spojili na brodsku mrežu gdje mogu kontrolirati razne uređaje. Zaštićeni brodski server otežava neovlašteni pristup u brodsku mrežu, čime se povećava cyber-sigurnost autonomnih brodova. [12]

Radiofrekvencijski spektar važan je za postojeće satelitske i terestričke sustave. Širina radiofrekvencijskog pojasa je ograničena, no moguće je proširenje za buduće zahtjeve autonomnih brodova. Prvi način je otvaranje određene širine pojasa za pomorske komunikacije u visokofrekventnom području. Drugi način uključivao bi pojasno dijeljenje podataka. Primjer pojasnog dijeljenja podataka je ponovno iskorištavanje mobilnih

frekvencija za satelitsku komunikaciju u nacionalnim i međunarodnim vodama. Kako bi se omogućio ovaj način rada, potrebni su telekomunikacijski operateri. Slika 8. prikazuje blok shemu koja je neophodna za sigurne komunikacije [12]



Slika 9. Shematski prikaz komunikacijske mreže autonomnih brodova [12]

8.1. SUSTAV UPRAVLJANJA KOMUNIKACIJA

Upravitelj komunikacija odgovoran je za održavanje dvostrane komunikacije i izmjenu podataka, koristeći pritom najbolju dostupnu radio tehnologiju. Uobičajeno je da se brod istovremeno nalazi u području koje pokriva nekoliko različitih komunikacijskih tehnologija poput satelitskog sustava i mobilnih mreža. Glavni zadatci upravitelja komunikacija su:

- odabir optimalne mreže i dodjeljivanje podataka dostupnim komunikacijskim kanalima,
- osiguravanje protočnog pojasa kako bi se podaci mogli neometano prenositi,
- osiguravanje da poslani podaci stignu na odredište nepromijenjeni i unutar granica dozvoljenog kašnjenja,
- pružanje podrške svim okolnim brodovima kako bi se osigurala neometana komunikacija. [12]

Brojne pogodnosti 5G mreže poput nadzora kvalitete podataka, postavljanja prioriteta komunikacija, te dijeljenje iste mreže većem broju korisnika moguće je koristiti u integriranom satelitsko-terestričkoj komunikacijskoj arhitekturi kako bi se osigurala

komunikacija između autonomnog broda i obalnog operatera. Satelitske i visokofrekventne mreže omogućuju komunikaciju na oceanskim područjima. Razvija se prilagodba postojeće 4G i 5G infrastrukture za pomorske potrebe, čime bi se postigla komunikacija s plovilima do 100 km od obale. Poseban način komunikacije predstavljala bi područja luka koja bi koristila jako brze privatne 4G, 5G i bežične mreže. Komunikacijske mreže pružale bi podršku prilikom lučkih operacija, nadzora plovidbe, logistike i sl. Brod bi se spojio na lučku mrežu prilikom dolaska u lučki akvatorij, čime bi se znatno ubrzale sve lučke operacije. [12]

Proces primopredaje trebao bi biti takav da se osigura ista razina kvalitete podataka tijekom promjene komunikacije. Nakon zahtjeva za promjenom mreže, upravitelj komunikacija mjeri parametre kvalitete podataka poput kašnjenja, protočnosti kanala, kvalitete signala i sl. Nakon mjerenja, odabire se optimalni komunikacijski kanal između autonomnog broda i obalnog operatera. Komunikacija se održava dok god postoje podatci koji se trebaju poslati ili stabilna veza. Moguće je slanje podataka istovremenim korištenjem većeg broja kanala s različitim zahtjevima za kvalitetom podataka i različitim komunikacijskim mrežama. [12]

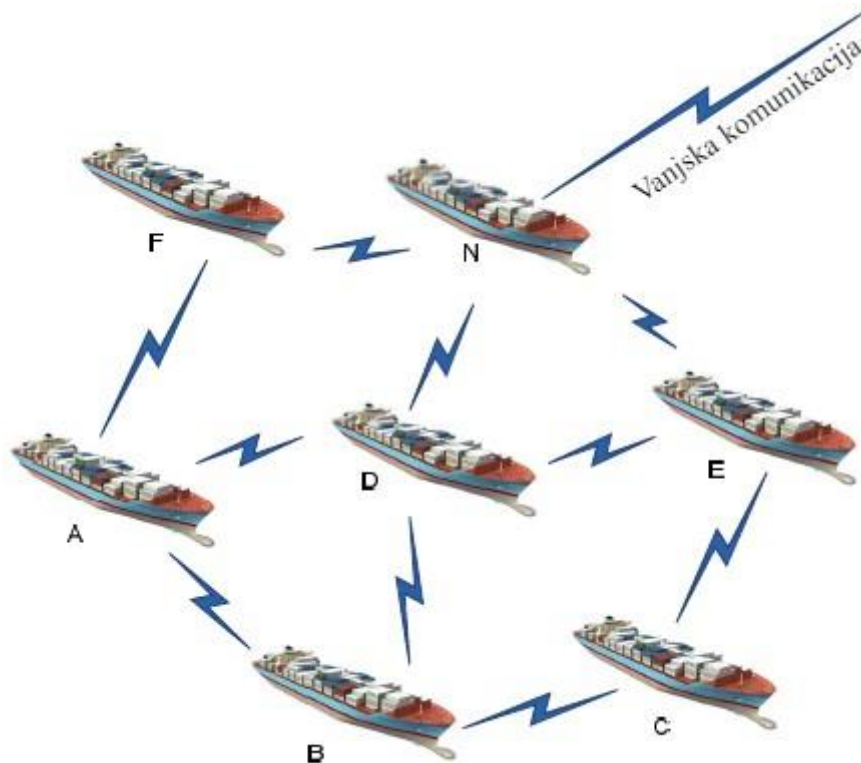
Razvoj autonomnih i daljinski upravljanih brodova dovest će do novih načina napada na brodove. Svi brodski sustavi, uključujući komunikaciju, moraju biti dizajnirani tako da mogući kvarovi ne mogu značajno utjecati na sposobnost upravljanja brodom. Također, brod se ne smije oslanjati na satelitsko pozicioniranje zbog opasnosti od ometanja signala. Razvoj zaštite GNSS signala od ometanja i sekundarni načini pozicioniranja povećavaju sigurnost brodova. Najveće prijetnje komunikaciji autonomnih brodova su: gubitak podataka, promjena podataka i krađa podataka. Mora postojati zalihost u komunikacijskim mrežama, dobro kodiranje i cyber-sigurnosni protokoli koji će otkloniti navedene prijetnje. Autentikacija korisnika ključna je kako bi se spriječilo neovlašteno upravljanje autonomnim brodom. [12]

8.2. BUDUĆI KOMUNIKACIJSKI TRENDOVI I PREPREKE

Postoje brojne prepreke koje sprječavaju autonomnu plovidbu međunarodnim vodama, ali i Arktičkim područjima. Jedna od takvih prepreka jest postojeći hibridni satelitsko-terestrički sustav. Praktično rješenje problema komunikacije autonomnih brodova moguće je integracijom postojeće satelitske i terestričke tehnologije. Glavni problem ovog sustava je izgradnja hibridne infrastrukture i komunikacijske mreže koja bi omogućavala visoku kvalitetu podataka u svim područjima plovidbe. [13]

Sljedeća prepreka je integracija senzorskih podataka i njihovo odašiljanje obalnom kontrolnom centru. Automatsko pristajanje i siguran odlazak iz luke zahtijevaju visoku točnost senzora i slanje podataka u stvarnom vremenu. Svi podaci koji se razmjenjuju između autonomnog broda i obalnog kontrolnog centra moraju biti nepromijenjeni i zaštićeni. [13]

Jedan od zanimljivijih budućih koncepata zasigurno je tzv. brodska mega konstelacija. Autonomni brodovi na određenom području imali bi mogućnost mrežnog povezivanja korištenjem „višestrukih skokova“ između stotina okolnih brodova. Za mogućnost ovakve komunikacije potrebna je visokoprotočna komunikacijska oprema poput 5G radija. Podatci koji bi se izmjenjivali unutar ove mreže bili bi izrazito otporni na krađu i neovlašteno korištenje. Slika 9. grafički objašnjava način kounikacije brodova u mega konstelaciji. [13]



Slika 10. Koncept autonomne mega konstelacije brodova [13]

9. INTEGRACIJA NAVIGACIJSKIH SENZORA AUTONOMNIH BRODOVA

Razvoj autonomnih brodova javlja se zbog povećanja sigurnosti plovidbe, smanjenja operativnih troškova, te smanjenja zagađenja okoliša. Procjenjuje se da je ljudska greška uzrok između 74 do 94 % svih pomorskih nezgoda. Pomorci i troškovi njihova života na brodu procjenjuju se između 30 do 44 %. Također, pomorska industrija zagađuje između 2,8 do 3,1 % svjetske proizvodnje stakleničkih plinova. Koncept autonomnih brodova zahtijeva zamjenu zapovjednika broda s automatikom. Kako bi se postigao takav cilj, potrebno je razviti precizne, točne i pouzdane senzore koji bi nadomjestili čovjeka. Senzori autonomnih brodova mogu se podijeliti u tri velike skupine: površinski senzori, podvodni senzori te svemirski senzori. Površinski i podvodni senzori pružaju informacije o brodu u stvarnom vremenu, podatke o okolini, te njihov prikaz. Svemirski senzori omogućavaju pristup podacima na svjetskoj razini, odnosno informacijama vanjskih izvora koji nisu povezani s brodom. [11]

9.1. SENZORSKI ZAHTJEVI AUTONOMNIH BRODOVA

Karakteristike senzora daljinski kontroliranih i autonomnih brodova moraju biti takvi da ne repliciraju vid i sluh pomoraca, već i da nadilaze njihove sposobnosti koristeći kontinuirani vizualni nadzor cijelog broda kroz četiri dimenzije (x, y, z te vremenska dimenzija), pritom pružajući što veću razlučivost i točnost nego što to može čovjek. Ovaj zahtjev uključuje sposobnost noćnog gledanja u svim vremenskim uvjetima poput valovitog mora, guste magle, obilne kiše, snijega i sl. Također, autonomni brod mora biti sposoban slušati zvukove povezane s navigacijskim pomagalicama i okolinom kao što su zvučni signali. Potrebna je i sposobnost broda da „vidi“ ispod morske površine i oko broda kako bi pravovremeno mogao otkriti neucrtane navigacijske opasnosti te donijeti odluku o najboljoj mogućoj akciji. Obvezni brodski senzori koje IMO propisuje uključuju ljudski vid i sluh. Ovi zahtjevi IMO-a dopunjeni su radarom i drugim navigacijskim pomagalicama. Radar se koristi za otkrivanje i izbjegavanje drugih brodova ili navigacijskih opasnosti. Ultrazvučni dubinomjer potreban je za kontinuirani nadzor dubine ispod kobilice. ECDIS integriran s drugim navigacijskim pomagalicama prikazuje najnovije hidrografske podatke u području plovidbe broda, kao i sve navigacijske opasnosti. AIS pruža informacije o brodovima u blizini poput pozicije, brzine, identifikacije i odredišta. GNSS daje podatke o geografskoj

poziciji, brzini i smjeru plovidbe broda. Svi navedeni senzori pomažu vođenju sigurne navigacije te poboljšavaju osjetila vida i sluha pomoraca. Međutim, IMO zaostaje za razvojem novih tehnologija koje mogu pridonijeti povećanju sigurnosti konvencionalnih brodova. Uvođenjem daljinski kontroliranih i autonomnih brodova, nove senzorske tehnologije dobivaju priliku u pomorstvu. Neke od njih poboljšavaju funkcionalnost postojećih sustava, dok druge uvode potpuno nove mogućnosti koje nisu bile moguće u prošlosti. Integracija brodskih senzora s vanjskim informacijama i podacima prikupljenim preko svemirskih senzora, te komunikacijskih sredstava ključna je za uspješnu komunikaciju obalnih operatera i autonomnih brodova prilikom donošenja odluka. Također, lokalnim umrežavanjem koristeći mrežu širokog područja (engl. *Wide Area Network* - WAN) poboljšava se razmjena informacija između drugih autonomnih brodova. [11]

9.1.1. Površinski senzori

Povećanje broja obveznih IMO senzora potrebno je kako bi se postigla zadovoljavajuća razina situacijske svijesti MASS plovila, a sve to s ciljem odgovarajućeg nadzora i praćenja prilikom donošenja odluka. Takvi senzori doprinose povećanju sposobnosti postojećih senzora, ali i uvođenju novih mogućnosti koje dotad nisu bile ostvarive. Fuzija podataka iz različitih izvora vodi do zadovoljavajućih razina situacijske svijesti MASS plovila. Primjeri novih senzora koji zadovoljavaju kriterije MASS brodova za sigurnom navigacijom, vizualnim i auditivnim zahtjevima te prijenosom podataka u stvarnom vremenu zasigurno su: INS, LiDAR, milimetarski radar, video kamere, infracrvene kamere te mikrofoni. Na morskoj površini, ali i iznad nje mogu se koristiti dronovi sa sličnim sensorima kako bi se dobilo više podatka prilikom donošenja odluka. Meteorološki instrumenti integrirani u brodsku senzorsku mrežu mogu pružati podatke u stvarnom vremenu, kao što su informacije o smjeru i snazi vjetera, temperaturi zraka i mora, atmosferskom tlaku te vlazi. Svi navedeni podatci iznimno su važni zbog donošenja odluka o kompenzaciji utjecaja vjetera, struja i drugih pojava koje utječu na MASS plovilo prilikom putovanja. Posebnu pozornost pridodaje se navigacijskim pomagalicama poput kopnenih oznaka i plutača koje se koriste za sigurno navođenje broda. Vizualni senzori na MASS brodovima moraju imati sposobnost prepoznavanja takvih oznaka s odgovarajućom rezolucijom kako bi se mogle jasno vidjeti njihove karakteristike, uspješno ih identificirati, te naposljetku odrediti poziciju upotrebom GNSS-a i ECDIS-a. Vizualni senzori mogu biti upotpunjeni radarom te pramčanim navigacijskim uređajem za površinsko određivanje

udaljenosti zvukom (engl. *Sound Navigation Ranging - Sonar*) s ciljem određivanja pozicije u stvarnom vremenu. [11]

9.1.2. Podvodni senzori

Pomorci svojim iskustvom mogu predvidjeti brojne promjene u okolišu koje mogu ukazivati na opasna stanja mora i morskog dna. Vidljivi indikatori uključuju promjenu boje mora prilikom dolaska u plitke vode, promjenu temperature, nastanak valova ili područja bez valova usred oluje. Jedino navigacijsko pomagalo koje daje podatke o dubini jest dubinomjer, dok navigacijske karte mogu imati podatke o dubinama koji su stari desetljećima, ili čak stoljećima. Daljinski upravljani i autonomni brodovi moraju nadoknaditi nedostatak iskustva naspram ljudi, kao i nedovoljno precizne dubine na karti. Ovaj problem može se riješiti sensorima koji mogu u stvarnom vremenu očitavati konfiguraciju morskog dna te uvjete na dnu. Primjeri senzora koji bi omogućili preciznu i sigurnu navigaciju uključuju ultrazvučne dubinomjere te bočne sonare. Ovim uređajima omogućila bi se zadovoljavajuća razina praćenja reljefa morskog dna u visokoj rezoluciji, kao i podvodnih navigacijskih orijentira koji bi se mogli iskoristiti za određivanje pozicije broda. Navigacijski sonar s mogućnošću snimanja po pramcu može pružiti batimetrijske snimke visoke razlučivosti koji se potom mogu usporediti s ECDIS-om za pomoćnu navigaciju, otkrivanje navigacijskih opasnosti i prepreka ili za izbjegavanje sudara s velikim sisavcima poput kitova. Moguće je koristiti bespilotna podvodna vozila kako bi se poboljšala situacijska svjesnost MASS plovila, osobito u lukama i područjima uskih kanala. [11]

9.1.3. Svemirski senzori

Od 2018. godine, u Zemljinoj orbiti se nalazilo oko 4600 satelita, od kojih je oko 2000 operativno. Međutim, nije moguće svakodnevno pratiti točan broj lansiranja i padanja satelita, stoga su navedene brojčane vrijednosti informativne. Pomorska industrija koristi tek manji broj satelita za potrebe komunikacija i pozicioniranja. Uz pomoć terestričke korekcije signala, moguće je pružiti točnost od 1 cm. Brojni sateliti koriste se u pomorskim operacijama za prikupljanje meteoroloških i oceanografskih informacija te za terestričko snimanje. Povećani broj lansiranja posljedica je nove, manje generacije satelita koji su odaslani u donju zemljinu orbitu s ciljem razvoja globalne širokopojasne komunikacije. Međunarodna pomorska satelitska organizacija (engl. *International Maritime Satellite Organisation - INMARSAT*) objavila je da je njihova globalna komunikacijska mreža prešla 10000 brodova koji ju koriste u 2017. godini, što pokazuje porast pomorskog

komunikacijskog trenda. Satelitska komunikacija od iznimne je važnosti za nadzor operacija MASS plovila, kao i za dijeljenje velikog broja podataka koji se koriste prilikom donošenja odluka. [11]

9.2. AUTONOMNA PLOVIDBA

Svaka plovidba brodom započinje fazom planiranja putovanja. Prilikom planiranja plovidbe autonomnih brodova, obalni operater, osim klasičnih navigacijskih izazova, mora uzimati u obzir moguće nedostatke koji utječu na daljinsku kontrolu broda. Širokopojasna satelitska komunikacija neophodna je za održavanje autonomnih brodova u željenom režimu rada. Neki režimi rada zahtijevaju visokuprotočnost podataka i jako malo kašnjenje koje nadilazi trenutne mogućnosti satelitske tehnologije, stoga operater treba planirati rutu broda područjima dobre komunikacijske pokrivenosti gdje god je to moguće. Definiranje daljinske kontrole ili autonomne plovidbe za svaki ucrtani kurs bitan je dio planiranja putovanja. Kada se postave parametri za svaki kurs, operater definira rezervnu strategiju koja će se primjenjivati u slučaju nepredviđenih okolnosti ili uslijed gubitka komunikacije. Ova strategija sastoji se od:

- preuzimanja ručne kontrole nad autonomnim brodom,
- smanjenja brzine i pokušaja izvršenja zadanog kursa,
- zaustavljanja broda i održavanja pozicije pomoću dinamičkog pozicioniranja,
- vraćanja na prethodnu međutočku,
- plovidbe do sigurnog zakloništa. [16]

Autonomni brod mora imati automatski sustav za potvrđivanje spremnosti broda za plovidbu. Većinu sustava moguće je provjeriti daljinski, dok ostali sustavi zahtijevaju pregled obalne posade prije početka plovidbenog pothvata. [16]

Sustavi za vez na autonomnom brodu mogu biti potpuno automatizirani ili djelomično automatizirani. U slučaju potpuno automatiziranog sustava, cjelokupni privez i odvez broda moguće je daljinski kontrolirati ili je automatski izvršeno zahvaljujući autonomnom sustavu na brodu. Djelomično automatizirani sustav omogućuje dostavu konopa do obale, ali je potrebna ljudska pomoć kako bi se osigurao vez. [16]

Prilikom isplovljavanja broda iz luke, operater može preuzeti izravnu daljinsku kontrolu ili vršiti nadzor zahvaljujući senzorskoj integraciji koja poboljšava situacijsku svjesnost broda. Operacija nadzora zahtjeva visoko propusne komunikacijske kanale s malim kašnjenjem. Daljinska kontrola označava upravljanje brodom preko upravljača (engl.

joystick). Režimi rada kod ovog načina upravljanja preuzeti su iz sustava za dinamičko pozicioniranje poput zaključavanja brzine ili kursa broda. Praktičniji način upravljanja uključuje slanje informacija brodu o željenoj međutočki, a kontrola propulzije vršila bi se pomoću autonomnog brodskog sustava i sustava za dinamičko pozicioniranje. [16]

U normalnom autonomnom režimu rada, brod izvršava unaprijed određeni plan putovanja.

Razmjena podataka između broda i obalnog operatera svodi se samo na kritične statusne podatke (kurs, brzina, pozicija), te podatke o situacijskoj svjesnosti i stanju brodskih sustava. Moguće je da operater upravlja s više brodova istovremeno, stoga razina autonomije svakog broda ovisi o uspješnosti izvršavanja plovidbenog pothvata. U slučaju da sustav za autonomno odlučivanje i situacijska svjesnost broda prijeđu postavljene parametre, potrebna je intervencija operatera. Ovim se omogućuje dinamička razina autonomije u slučaju odstupanja od zadanog plana putovanja. Odluke operatera ovisit će o različitim situacijama. Primjerice, ako brod odstupa sa zadanog kursa, ali ostaje u zadanim okvirima sigurne plovidbe, autonomni sustav obavještava operatera o razlogu promjene kursa i donosi odluku koju operater može poništiti ako je smatra neosnovanom. Kod sudarne opasnosti, operater može preuzeti kontrolu nad brodom, kontaktirati drugi brod koristeći radiokomunikaciju te se dogovoriti o manevru koji zadovoljava sigurnosne parametre oba broda. Moguće je da autonomni sustav ne može donijeti ispravnu odluku zbog kompleksnosti problema. Takav primjer uključivao bi područje gustog prometa gdje algoritmi za predviđanje kretanje ne mogu riješiti problem. U tom slučaju, autonomni sustav obavještava operatera s porukom hitnosti „pan-pan“ koja označava potrebu za neposrednom intervencijom. U slučaju da operater ne može donijeti odluku, brod prosljeđuje prema unaprijed određenoj rezervnoj strategiji. Vođenje plovidbe autonomnih brodova uvelike će ovisiti o vanjskim čimbenicima. S vremenom se očekuje razvoj kontrolnih logaritama i mogućnost samostalnog rješavanja kompleksnijih problema. [16]



Slika 11. Uključenost operatera s obzirom na situaciju [16]

Prilikom dolaska broda u luku, operater može odabrati optički način upravljanja brodom ili povećani nadzor broda. Način rada određuje lučki kontrolni centar, ovisno o zahtjevima za peljarenje. Postoje razne mogućnosti kako bi se moglo obavljati peljarenje autonomnih brodova. Jedna od mogućnosti je da pilot preuzme kontrolu nad brodom, odnosno operater autonomnih brodova trebao bi imati valjanu peljarsku dozvolu za određeno područje. Sigurno pristajanje broda obavljat će se korištenjem kamera i radarskih sustava. [16]

10. ZAKLJUČAK

Autonomni brodovi značajan su iskorak prema budućem razvoju pomorske djelatnosti. Međutim, postoje brojne tehničke i pravne prepreke koje se moraju zadovoljiti. Pravna regulativa nalaže da autonomni brodovi imaju iste ili veće mogućnosti od ljudskih sposobnosti, a to je moguće samo razvojem umjetne inteligencije. Kvalitetni i pouzdani senzori neophodni su za pružanje „osjetila“ umjetnoj inteligenciji, što bi moglo donijeti revoluciju pomorskog prometa.

Diferencijalni sustavi pozicioniranja pružaju visoku razinu točnosti koja je neophodna za buduće autonomne brodove. Najizglednija rezerva sustava za pozicioniranje je hiperbolni terestrički sustav eLoran. Prednost eLorana nad satelitskim sustavima je otpornost na ometanje signala, čime bi se osiguralo neometano pozicioniranje autonomnih brodova u slučaju gubitka signala GNSS-a. Trenutna točnost pozicioniranja iznosi između 2 i 5 metara. Integracija GNSS-a s optičkim zvrčnim kompasom neophodna je za ispravan rad ostalih navigacijskih sustava poput autopilota, ARPA radara, satelitske komunikacije i sl.

Autonomni brod trebao bi koristiti VIDAR tehnologiju zbog mogućnosti otkrivanja plutajućih objekata na velikim udaljenostima, čime se pridonosi povećanju situacijske svjesnosti i samostalnom donošenju odluka autonomnih brodova. Najveći nedostatak ove tehnologije je visoka cijena. Uz klasični radar i VIDAR, autonomni brod trebao bi integrirati LiDAR i mmW radar kako bi se zadovoljili zahtjevi COLREG-a za izviđanje i držanje straže. Upotrebom LiDAR tehnologije, operater autonomnog broda imao bi pristup trodimenzionalnom prikazu otkrivenih objekata, dok bi mmW osigurao vrlo visoku razinu točnosti podataka. Evolucija mjerenja dubine izgledna je korištenjem višeslojnih dubinomjera. Prikazom reljefa morskog dna u trodimenzionalnom prostoru moguće je odrediti poziciju broda koristeći podvodne planine i druge istaknute objekte. Usporedbom podataka različitih tipova brzinomjera može se zaključiti da su satelitski brzinomjeri trenutno najtočniji na tržištu. Mogući nedostatak je gubitak signala između broda i satelita, a to je moguće riješiti ugradnjom sekundarnog ultrazvučnog dubinomjera. Svi navedeni senzori i uređaji trebaju slati podatke u stvarnom vremenu kako bi se omogućila potpuna autonomija broda. Razvoj pete generacije mreža koristi vrlo visoke brzine protoka podataka uz malo kašnjenje, stoga je razvoj ove generacije od iznimne važnosti za neometanu komunikaciju između operatera i broda. Integracija svih senzora i njihovih podataka važna je za kvalitetan i pouzdan brodski inteligentni sustav.

LITERATURA

- [1] Gracin, T.: *Differential GPS*, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2006.
- [2] Krleža, M.: *Pomorska enciklopedija 1, drugo izdanje*, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1972.
- [3] Krleža, M.: *Pomorska enciklopedija 2, drugo izdanje*, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1975.
- [4] Kučić, A.: *Diplomski rad*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [5] Plantosar, M.: *Primjena senzora u električnim strojevima*, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2017.
- [6] Webster, J. G.; Eren, H.: *Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook, Second Edition*, CRC Press, Baton Rouge, 2014.
- [7] Ahuja, D.; Parande, D.: *Optical sensors and their applications*, Journal of Scientific Research and Reviews, 1 (5), 2012, str. 60-68.
- [8] Bhattacharjee, S.: *Marine Radars and Their Use in the Shipping Industry*, 2019, URL: <https://www.marineinsight.com/marine-navigation/marine-radars-and-their-use-in-the-shipping-industry/>, (pristupljeno 25.01.2020.).
- [9] Czaplewski, K.; Weintrit, A.: *The identification of possible applications of the e-Loran system*, Annual of navigation, 25, 2018, str. 165-186.
- [10] Felski A.; Zwolak, K.: *The Ocean-Going Autonomous Ship - Challenges and Threats*, Journal of Marine Science and Engineering, 8, 41, 2020, str. 1-16.
- [11] Glenn Wright, R.: *Intelligent Autonomous Ship Navigation using Multi-Sensor Modalities*, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 3, 13, 2019, str. 503-510.
- [12] Höyhty, M.: *Connectivity manager: Ensuring robust connections for autonomous ships*, 2nd International Conference on Intelligent Autonomous Systems, Singapore, 2019, str. 86-90.
- [13] Höyhty, M.; Huusko, J.; Kiviranta, M.; Solberg, K.; Rokka, J.: *Connectivity for Autonomous Ships: Architecture, Use Cases and Research Challenges*, International Conference on Information and Communication Technology Convergence, Jeju, str. 345-350.

- [14] Iovescu, C.; Rao, S.: *The fundamentals of millimeter wave sensors*, 2017, Texas Instruments Incorporated, URL: <http://www.ti.com/lit/wp/spyy005/spyy005.pdf>, (pristupljeno 27.01.2020.).
- [15] Jain, P.: *Position sensor: types of position sensor*, 2012, URL: https://www.engineersgarage.com/article_page/position-sensor-types-of-position-sensor/, (pristupljeno 12.01.2020.).
- [16] Jokioinen, E.: *Introduction*, Advanced Autonomous Waterborne Application Position Paper, 2016, str. 3-13.
- [17] Kardasz, P.; Doskocz, J.; Hejduk, M.; Wiejkut, P.; Zarzycki, H.: *Drones and Possibilities of Their Using*, Journal of Civil & Environmental Engineering, 6, 3, 2016, str. 1-7.
- [18] Kos, T.; Grgić, M.; Krile, S.: *Hiperbolni i satelitski sustavi za navigaciju*, Naše more, 51, 5-6, 2004, str 189-199.
- [19] Kos, T.; Grgić, S.; Krile, S.: *Poboljšanje sustava satelitske navigacije*, Naše more, 52, 1-2, str. 57-63.
- [20] Kuter, N.; Kuter, S.: *Accuracy comparasion between GPS and DGPS: A field study at METU campus*, Italian Journal of Remote Sensing, 42 (3), 2010, str. 3-14.
- [21] Marjanović Kavanagh, R.: *Žiroskopi za orijentaciju i inercijalni navigacijski sustavi*, Kartografija i geoinformacije, 6 (spec), 2007, str. 255-271.
- [22] Pribyl, T. S.; Weigel, M. A.: *Autonomous vessels: how an emerging disruptive technology is poised to impact the maritime industry much sooner than anticipated*, The Journal of Robotics, Artificial Intelligence & Law (Fastcase), Washington, 1, 1, 2018, str. 17-25.
- [23] Rødseth, J. Ø.; Nordahl, H.: *Definitions for Autonomy levels for merchant ships*, Norwegian Forum for Autonomous Ships, 2017, str. 3-18.
- [24] Rødseth, J. Ø.; Nordahl, H.: *Definitions for autonomous merchant ships*, Norwegian Forum for Autonomous Ships, 2017, str. 3-21.
- [25] Sage-Fuller, B.: *Legal framework for unmanned vessels*, University College Cork, Hamburg, 2015, str. 2-17.
- [26] Tesla, N.: *Method of and apparatus for controlling mechanicsm of moving vessels or vehicle*, US patent 613809A, 1898, str. 1-2.
- [27] Upadhyaya, S. K.; Pettygrove, G. S.; Oliveira, J. W.; Jahn, B.R.: *An introduction - global positioning system*, 2014, str. 1-12.

- [28] Ziyang, M.; Yan, Z.; Huiyuan, L.: *Research on Collision Avoidance Method Based on Image Recognition Technology*, Journal of Physics: Conference Series, 1213, 4, 2019, str. 1-9.
- [29] Zrinjski, M.; Barković, Đ.; Matika, K.: *Razvoj i modernizacija GNSS-a*, Geodetski list, 73 (96), 1, 2019. str. 45-65.
- [30] Bureau Veritas guidelines for autonomous shipping, Guidance note NI 641 DT R01 E.
- [31] LR Unmanned Marine Systems Code, Preliminary release.
- [32] Pomorski zakonik (PZ), NN 181/04, 76/07, 146/08, 61/11, 56/13, 26/15, 17/19.
- [33] <http://en.nanoradar.cn/Article/detail/id/410.html>, (pristupljeno 24.02.2020.)
- [34] <http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Regulations/Pages/Default.aspx>, (pristupljeno 12.12.2019.).
- [35] <http://www.lidar-uk.com/what-is-lidar/>, (pristupljeno 30.01.2020.).
- [36] <http://www.neptectechnologies.com/marine-lidar/>, (pristupljeno 30.01.2020.).
- [37] <http://www.sentientvision.com/products/vidar-multicamera/>, (pristupljeno 12.02.2020.)
- [38] http://www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/Teledyne-Hydrosweep-DS_Data-Sheet.pdf, (pristupljeno 22.02.2020.).
- [39] http://www.unizd.hr/Portals/1/nastmat/Terestrika/AG_Terestrika7.PDF, (pristupljeno 06.02.2020.).
- [40] <http://www.unmanned-ship.org/munin/about/the-autonomus-ship/>, (pristupljeno 12.12.2019.).
- [41] https://atos.net/wp-content/uploads/2018/08/BEN_Marine_Catalog_Marine_WEB.pdf, (pristupljeno 15.02.2020.).
- [42] <https://dosits.org/people-and-sound/navigation/how-is-sound-used-to-measure-water-depth/>, (pristupljeno 30.01.2020.).
- [43] https://en.wikipedia.org/wiki/Depth_sounding, (pristupljeno 30.01.2020.)
- [44] <https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar>, (pristupljeno 30.01.2020.).
- [45] https://en.wikipedia.org/wiki/Real-time_kinematic, (pristupljeno 08.02.2020.).
- [46] <https://www.flir.com/products/m500/>, (pristupljeno 12.02.2020.).
- [47] <https://www.furuno.com/en/merchant/echosounder/>, (pristupljeno 22.02.2020.).
- [48] <https://www.furuno.com/files/Brochure/161/upload/ds-60.pdf>, (pristupljeno 17.02.2020.).

- [49] <https://www.gsa.europa.eu/newsroom/news/h2h-leveraging-egnss-safer-maritime-navigation>, (pristupljeno 10.02.2020.).
- [50] <https://www.kongsberg.com/maritime/about-us/news-and-media/news-archive/2016/automated-ships-ltd-and-kongsberg-to-build-first-unmanned-and-fully-autonomous/>, (pristupljeno 15.12.2019.).
- [51] <https://www.oscar-system.com/index-en#technology>, (pristupljeno 12.02.2020.).
- [52] <https://www.sperrymarine.com/naviknot-speed-log>, (pristupljeno 08.02.2020.).
- [53] <https://www.sperrymarine.com/system/files/downloads/23a00395-fe77-d1a4-b542-cb18b8e74791/NAVIKNOT.pdf>, (pristupljeno 15.02.2020.).
- [54] <https://www.watelectronics.com/different-types-of-sensors-with-applications/>, (pristupljeno 05.02.2020.).
- [55] The use of CCTV cameras on ships, 2019, URL: <https://britanniapandi.com/wp-content/uploads/2019/01/Bulletin-CCTV-cameras-on-ships-01-2019-1.pdf>, (pristupljeno 21.01.2020.).
- [56] <http://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/MSC/Pages/MSC-100th-session.aspx>, (pristupljeno 10.01.2020.).
- [57] <http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/08-MS-C-99-MASS-scoping.aspx>, (pristupljeno 10.01.2020.).
- [58] <http://www.unmanned-ship.org/munin/partner/>, (pristupljeno 7.1.2020.).
- [59] <https://cultofsea.com/bridge-equipment/echo-sounder/>, (pristupljeno 02.02.2020.).
- [60] https://en.wikipedia.org/wiki/Closed-circuit_television, (pristupljeno 21.01.2020.).
- [61] <https://knudseneng.com/files/brochures/320N/320N-Rev9.2.pdf>, (pristupljeno 22.02.2020.).
- [62] <https://umsskeldar.aero/vidar/>, (pristupljeno 12.02.2020.).
- [63] <https://www.furuno.com/files/Brochure/240/upload/gs-100.pdf>, (pristupljeno 19.02.2020.).
- [64] https://www.globalspec.com/learnmore/sensors_transducers_detectors/proximity_presence_sensing/collision_avoidance_sensors, (pristupljeno 25.01.2020.).
- [65] <https://www.jrc.co.jp/eng/product/lineup/jln740/pdf/JLN-740.pdf#view=Fit>, (pristupljeno 17.02.2020.).
- [66] <https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/product-documents/em-124-multibeam-echo-sounder>, (pristupljeno 22.02.2020.).
- [67] <https://www.kongsberg.com/maritime/support/themes/autonomous-ship-project-key-facts-about-yara-birkeland/>, (pristupljeno 15.12.2019.).

- [68] <https://www.nautelnav.com/wp-content/uploads/2017/12/Leadership-in-Resilient-PNT-29NOV2017.pdf>, (pristupljeno 24.02.2020.).
- [69] <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2015/pr-02-07-15-rolls-royce-to-lead-autonomous-ship-research-project.aspx>, (pristupljeno 15.12.2019.).
- [70] <https://www.septentrio.com/en/insights/top-3-positioning-challenges-autonomous-marine-navigation>, (pristupljeno 08.02.2020.).
- [71] <https://www.spar3d.com/news/lidar/you-can-fly-drive-or-walk-with-the-lidareteo-mobile-lidar-platform/>, (pristupljeno 24.02.2020.).
- [72] <https://www.wartsila.com/marine/build/navigation-and-communication/navigation-sensors/satlog-sls-4120>, (pristupljeno 19.02.2020.).
- [73] <https://www3.mbari.org/data/mbsystem/sonarfunction/SeaBeamMultibeamTheoryOperation.pdf>, (pristupljeno 19.02.2020.).

POPIS TABLICA

Tablica 1. Točnost GPS sustava pozicioniranja	14
Tablica 2. Usporedba točnosti GPS i DGPS sustava pozicioniranja.....	16
Tablica 3. Točnost GLONASS pozicioniranja	17
Tablica 4. Točnost Galileo sustava pozicioniranja.....	18
Tablica 5. Točnost BDS sustava pozicioniranja.....	18
Tablica 6. Prikaz značajki Sentinel i UMS Skeldar uređaja.....	27
Tablica 7. Usporedba jednosnopnih dubinomjera KNUDSEN 320N i FURUNO FE-800.....	34
Tablica 8. Usporedba višesnopnih dubinomjera KONGSBERG EM 124 i HydroSweep DS	35
Tablica 9. Usporedba uređaja ANTHEA EM i NAVIKNOT	37
Tablica 10. Usporedba uređaja FURUNO DS-60 i JRC JLN-740	38
Tablica 11. Usporedba uređaja FURUNO GS-100 i Wärtsilä SATLOG SLS 4120.....	39

POPIS ILUSTRACIJA

Slika 1. Koncept prvog autonomnog trgovačkog broda Yara Birkeland	5
Slika 2. Shematski prikaz važnosti komunikacije zvrčnog kompasa i GPS-a.....	20
Slika 3. Princip rada eLoran sustava	23
Slika 4. Noćni prikaz objekata uređaja FLIR	25
Slika 5. Otkrivanje objekata noću uređajem Oscar	26
Slika 6. Budući koncepti razvoja mmW tehnologije.....	29
Slika 7. Izgled podataka dobivenih LiDAR tehnologijom	31
Slika 8. Princip rada ultrazvučnog dubinomjera	33
Slika 9. Shematski prikaz komunikacijske mreže autonomnih brodova.....	41
Slika 10. Koncept autonomne mega konstelacije brodova.....	43
Slika 11. Uključenost operatera s obzirom na situaciju.....	49

POPIS KRATICA

AIS (engl. <i>Automatic Identification System</i>)	automatski identifikacijski sustav
AL (engl. <i>Autonomy Level</i>)	razine autonomije
ARPA (engl. <i>Automatic Radar Ploting Aid</i>)	automatko radarsko plotiranje
AltBOC (engl. <i>Alternative Binary Carrier Modulation</i>)	alternativna modulacija binarnog signala nosioca
BDS (engl. <i>BeiDou Satellite Navigation System</i>)	beidou satelitski navigacijski sustav
BV (engl. <i>Bureau Veritas</i>)	klasifikacijsko društvo biro veritas
CGCS 2000 (engl. <i>Chinese Geodetic Coordinate System 2000</i>)	kineski geodetski koordinatni sustav 2000
CLL (engl. <i>The International Convention on Load Lines</i>)	međunarodna konvencija o teretnim linijama
COLREG (engl. <i>The International Regulations for preventing Collision at sea</i>)	međunarodna pravila za izbjegavanje sudara na moru
DGPS (engl. <i>Differential Global Positioning System</i>)	diferencijalni globalni sustav za pozicioniranje
eLORAN (engl. <i>Enhanced Long Range Navigation</i>)	poboljšani sustav dalekometne navigacije
FOG (engl. <i>Fyber Optic Gyro</i>)	žiroskop s optičkim vlaknima
GBAS (engl. <i>Ground Based Augmentation System</i>)	kopneni sustav augmentacije
GLONASS (rus. <i>Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema</i>)	ruski globalni navigacijski sustav
GNSS (engl. <i>Global Navigational Satellite System</i>)	globalni satelitski navigacijski sustav
GPS (engl. <i>Global Positioning System</i>)	globalni sustav za pozicioniranje
GTRF (engl. <i>Galileo Terrestrial Referent Frame</i>)	galileo terestrički referentni okvir
IMO (engl. <i>International Maritime Organization</i>)	međunarodna pomorska organizacija
INMARSAT (engl. <i>International Maritime Satellite</i>)	međunarodni pomorski satelitski sustav
INS (engl. <i>Inertial Navigation System</i>)	inercijalni navigacijski sustav
ISM (engl. <i>International Safety Managment Code</i>)	međunarodni kodeks upravljanja sigurnošću
ITRF (engl. <i>International Terrestrial Referent Frame</i>)	međunarodni terestrički referentni okvir
LDC (engl. <i>Loran Data Channel</i>)	loran podatkovni kanal
LORAN (engl. <i>Long Range Navigation System</i>)	sustav dalekometne navigacije
LRS (engl. <i>Lloyd's Register of Shipping</i>)	lloyd registar brodova
LiDAR (engl. <i>Light Detection and Ranging</i>)	svjetlosno otkrivanje i mjerenje

MARPOL (engl. <i>The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships</i>)	međunarodna konvencija o sprječavanju zagađenja s brodova
MASS (engl. <i>Marine Autonomous Surface Ship</i>)	pomorski autonomni površinski brodovi
MLC (engl. <i>The International Maritime Labour Convention</i>)	međunarodna konvencija o radu pomoraca
mmW (engl. <i>Millimeter Wave</i>)	milimetarski val
MSC (engl. <i>Maritime Safety Comitee</i>)	odbor za pomorsku sigurnost
MUNIN (engl. <i>Maritime unmanned navigation through intelligence in networks</i>)	pomorska navigacija bez posade preko inteligencije u mrežama
NAVSTAR (engl. <i>Navigation by Satellite Timing and Ranging</i>)	navigacija pomoću satelitskog mjerenja vremena i udaljenosti
NFAS (engl. <i>Norwegian forum for autonomous ships</i>)	norveški forum za autonomne brodove
P&I (engl. <i>Protection & Indemnity Club</i>)	klubovi za zaštitu i jamstvo
PZ-90 (rus. <i>Parametri Zemli 1990</i>)	parametarska zemlja 1990
RADAR (engl. <i>Radio Detection and Ranging</i>)	otkrivanje i mjerenje radiovalovima
RLG (engl. <i>Ring Laser Gyro</i>)	kružni laserski žiroskop
RTK (engl. <i>Real Time Kinematic</i>)	kinematika u stvarnom vremenu
SAR (engl. <i>Search and Rescue</i>)	traganje i spašavanje
SBAS (engl. <i>Sattelite Based Augmentation System</i>)	satelitski sustav augmentacije
SOLAS (engl. <i>The International Convention for the Safety of Life at Sea</i>)	međunarodna konvencija o zaštiti ljudskih života na moru
SONAR (engl. <i>Sound Navigation Ranging</i>)	zvučna navigacija i mjerenje
STCW (engl. <i>The International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for seafarers</i>)	međunarodna konvencija o standardima izobrazbe, izdavanju svjedodžbi i držanju straže pomoraca
TEKES (fin. <i>Teknologian Kehittämiskeskus</i>)	finska agencija za poticanje razvoja tehnologije i znanosti
UAV (engl. <i>Unmanned Aerial Vehicle</i>)	bespilotna zračna letjelica
URE (engl. <i>User Range Error</i>)	točnost određivanja udaljenosti
UTC (engl. <i>Universal Time Coordinated</i>)	koordinirano svjetsko vrijeme
UUV (engl. <i>Unmanned Underwater Vehicle</i>)	podvodna plovila bez posade
VIDAR (engl. <i>Visual Detection and Ranging</i>)	vizualno otkrivanje i mjerenje