

Elektronički navigacijski uređaji autonomnih brodova

Klanac, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zadar / Sveučilište u Zadru**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:162:974269>

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

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



Sveučilište u Zadru
Universitas Studiorum
Jadertina | 1396 | 2002 |

Repository / Repozitorij:

[University of Zadar Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište u Zadru
Pomorski odjel - Nautički odsjek



Završni rad

Elektronički navigacijski uređaji autonomnih brodova
Electronic navigational devices of autonomous vessels

Karlo Klanac

Zadar, 2024.

Sveučilište u Zadru

Pomorski odjel - Nautički odsjek

Preddiplomski sveučilišni studij nautike i tehnologije pomorskog prometa

(jednopedmetni - izvanredni)

Završni rad iz predmeta: Elektronička navigacija

**Elektronički navigacijski uređaji autonomnih
brodova**

**Electronic navigational devices of autonomous
vessels**

Student:

Karlo Klanac

Broj indeksa:

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivan Toman

Zadar, 2024.



Izjava o akademskoj čestitosti

Ja, **Karlo Klanac**, ovime izjavljujem da je moj **završni rad** pod naslovom **Elektronički navigacijski uređaji autonomnih brodova** rezultat mojega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na izvore i radove navedene u bilješkama i popisu literature. Ni jedan dio mojega rada nije napisan na nedopušten način, odnosno nije prepisan iz necitiranih radova i ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem da ni jedan dio ovoga rada nije iskorišten u kojem drugom radu pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj, obrazovnoj ili inoj ustanovi.

Sadržaj mojega rada u potpunosti odgovara sadržaju obranjenoga i nakon obrane uređenoga rada.

Zadar, 18. veljače. 2024

SAŽETAK

Autonomni brodovi predstavljaju revoluciju u pomorstvu i kao ideja predstavljaju gotovo idealan scenarij za brodare i brodarsku industriju kada su u pitanju zarada i troškovi. Elektronički navigacijski uređaji na autonomnim brodovima jedan su od stupova sigurnosti tih brodova s obzirom na količinu detalja koji se uzimaju u obzir kada je autonomna navigacija u pitanju. Podaci dobiveni elektroničkim navigacijskim uređajima trebali bi pomoći autonomnom brodu da na vrijeme poduzme ispravne operacije i manevre štiteći sigurnost vlastitog broda i okoline. Tehnologija autonomnih brodova uza sve prednosti, sa sobom nosi i niz izazova kao što su automatsko manevriranje u skućenim lučkim prostorima, izbjegavanje sudara te kibernetički napadi. Riječ je konceptu koji se konstantno razvija i koji traži još dodatnih istraživanja i poboljšanja performansi, s naglaskom na navigacijskim uređajima i senzorima.

Ključne riječi: *autonomni brodovi, elektronički navigacijski uređaji, izbjegavanje sudara, kibernetički napadi*

ABSTRACT

Autonomous ships represent a revolution in maritime industry and, as a concept, offer almost an ideal scenario for shipowners and the shipping industry in terms of earnings and costs. Electronic navigation devices on autonomous vessels are one of the cornerstones of their safety, considering the amount of detail taken into account when it comes to autonomous navigation. Data obtained from electronic navigation devices should assist autonomous ships in timely and accurate operations and maneuvers, protecting the safety of the vessel itself and its surroundings. Despite the numerous advantages, autonomous ship technology also brings a set of challenges such as automatic maneuvering in confined port spaces, collision avoidance, and cyber-attacks. It is a concept that is constantly evolving and requires further research and performance improvements, with a focus on navigation devices and sensors.

Keywords: *autonomous ships, electronic navigation devices, collision avoidance, cyber attacks*

SADRŽAJ

1. UVOD1

2. TEHNOLOGIJA AUTONOMNIH BRODOVA2

2.1. POVIJEST RAZVOJA AUTONOMNIH BRODOVA3

2.2. STUPNJEVI AUTONOMIJE AUTONOMNIH BRODOVA5

3. TEHNOLOGIJA AUTONOMNIH BRODOVA8

4. ELEKTRONIČKI NAVIGACIJSKI SUSTAVI AUTONOMNIH BRODOVA10

4.1. GNSS10

4.2. DNSS12

4.3. RADAR12

4.4. LIDAR16

4.5. ENC17

4.6. INERCIJALNI NAVIGACIJSKI SUSTAV19

4.7. eLORAN20

4.8. OPTIČKO-TERMALNI SENZORI21

4.9. DUBINOMJERI22

4.10. BRZINOMJERI23

4.11. VIDEO-KAMERE24

5. IZAZOVI ZA BUDUĆNOST25

5.1. OPERACIJE PRIVEZA I ODVEZA25

5.2. COLREG26

5.3. KIBERNETIČKI NAPADI27

6. ZAKLJUČAK31

LITERATURA33

POPIS SLIKA41

1. UVOD

Autonomni brodovi predstavljaju revolucionarni napredak u pomorskoj industriji. Autonomni brodovi opremljeni su najsuvremenijim tehnologijama koje im omogućuju navigaciju i rad bez izravnog ljudskog posredovanja, otvarajući put za povećanu učinkovitost, sigurnost i ekonomičnost u pomorskom prijevozu.

Tehnološka jezgra autonomnih brodova leži u njihovim elektroničkim navigacijskim uređajima, koji obuhvaćaju niz sofisticiranih sustava dizajniranih za olakšavanje autonomne navigacije i procesa donošenja odluka. Ti uređaji uključuju globalne navigacijske satelitske sustave (engl. *Global Navigation Satellite System*, GNSS) te sustave za poboljšanje točnosti kao što su diferencijalni sustavi (DGNSS; engl. *Differential GNSS*), koji pružaju precizne informacije o položaju plovila. RADAR (engl. *Radio Detection and Ranging*) i LIDAR (*Light Detection and Ranging*) sustavi pružaju poboljšanu situacijsku svijest detektirajući i prateći objekte i prepreke u okolini broda. Elektroničke nautičke karte (ENC) pružaju detaljne digitalne karte plovnih putova, luka i navigacijskih opasnosti, dok inercijalni navigacijski sustavi pružaju kontinuirano ažuriranje položaja na temelju senzora na brodu. Dodatno, eLORAN (engl. *Enhanced Long-Range Navigation*) sustavi, optičko-termalni senzori, dubinomjeri, brzinomjeri i video kamere dodatno doprinose navigacijskim sposobnostima plovila. Iako integracija ovih elektroničkih navigacijskih uređaja otključava ogroman potencijal za autonomne operacije, cjelokupni princip autonomnih brodova suočava se sa značajnim izazovima. Daljnji razvoj bazira se na probleme poput autonomnih operacija priveza i odveza, izbjegavanja sudara na moru i potencijalne prijetnje kibernetičkih napada usmjerenih na autonomne brodove.

U ovom radu je istražena uloga elektroničkih navigacijskih uređaja autonomnih brodova kroz analizu njihove funkcionalnosti, prednosti i ograničenja. Nadalje, raspravlja se o izazovima i razmatranjima za njihovu budućnost, uključujući složenosti autonomnih manevara i rizike kibernetičkih napada povezanih. Cilj rada je detaljnije prikazati tehnologiju autonomnih brodova, opisati i objasniti uloga elektroničkih navigacijskih uređaja na njima te dati pregled izazova s kojima se njihov razvoj susreće.

2. TEHNOLOGIJA AUTONOMNIH BRODOVA

Autonomna vozila, kao vrhunac tehnološkog napretka u transportnom sektoru, predstavljaju ključni element u smanjenju potrebe za ljudskim radom. Pomorska industrija također prepoznaje važnost autonomnih brodova kao odgovor na buduće zahtjeve tržišta, povećanje sigurnosti plovidbe te postizanje održivosti [1]. Svjetska pomorska organizacija, IMO (engl. *International Maritime Organization*) definira autonomne brodove kao operativne sustave sposobne za donošenje i izvršavanje odluka bez potrebe za ljudskom intervencijom [2], dok ih Pomorski zakonik Republike Hrvatske klasificira kao plovne objekte koji mogu ploviti bez posade ili s reduciranom posadom, ovisno o stupnju automatizacije i potrebama nadzora [3]. Ključna razlika između „broda bez posade“ i „autonomnog broda“ leži u tome što potonji može samostalno izvršavati zadatke bez ili s minimalnim nadzorom posade [2].

Godine 2015., Rolls-Royce najavljuje vođenje projekta razvoja autonomnih brodova, financiranog od strane finske agencije TEKES, koji okuplja različite dionike kako bi istražili ekonomska, socijalna, pravna i tehnološka pitanja vezana uz implementaciju autonomnih brodova [4]. Istovremeno, *Automated Ships Ltd.* i *Kongsberg* započinju izgradnju prvog autonomnog broda Hrönn, namijenjenog znanstvenim istraživanjima, hidrografiji i podršci marikulturnim postrojenjima [5]. U istoj godini, Kongsberg je objavio planove za izgradnju prvog kontejnerskog broda za komercijalnu upotrebu koji će biti potpuno bez emisije stakleničkih plinova, *Yara Birkeland*, čija je prva potpuno autonomna plovidba započela na proljeće 2022. godine [6]. Slika 1 prikazuje Yaru Birkenland.



Slika 1. Yara Birkeland [7]

Također, Rolls-Royce i tvrtka *Svitzer* demonstriraju daljinski upravljeno tegljenje, dok tvrtka *Sea Machines Robotics* predstavlja autonomni softverski sustav *Sea Machines 300* za daljinsku i autonomnu kontrolu konvencionalnih brodova [8].

Podjela autonomnih brodova prema Međunarodnoj pomorskoj organizaciji započela je 2018. godine s konceptom pomorskih autonomnih površinskih brodova (engl. *Maritime Autonomous Surface Ships* - MASS). Ovaj proces obuhvaća definiranje različitih stupnjeva autonomije i pravne okvire koji će regulirati njihovu primjenu u pomorskom prometu [2]. Ovo se smatra ključnim korakom prema integraciji autonomnih tehnologija u pomorsku industriju.

Odbor za pomorsku sigurnost IMO-a (engl. *Maritime Safety Committee* - MSC) odigrao je važnu ulogu u ovom procesu, odobravajući pravnu regulativu koja objedinjuje inicijalne definicije MASS brodova i razine autonomije. Ovaj pravni okvir uključuje i metodologiju za provođenje vježbi te plan rada, što je ključno za testiranje i provjeru sigurnosti autonomnih brodova u stvarnim uvjetima [9].

2.1. POVIJEST RAZVOJA AUTONOMNIH BRODOVA

Povijesni razvoj autonomnih brodova seže u patent Nikole Tesle iz 1898. godine, koji je predstavio metode za kontrolu pokretnih vozila bez upotrebe električnih vodiča, već putem signala koji se prenose elektromagnetskim valovima kroz različite medije poput vode, zraka ili tla. Više od stoljeća kasnije, započinje automatizacija plovila (USV - engl. *Unmanned surface vessels*), a u posljednjem desetljeću došlo je i do pojave podvodnih plovila bez posade (UUV - engl. *Unmanned underwater vessels*) koja se primjenjuju u pomorskoj industriji, posebice u podvodnim radovima nafte i plina [10].

Projekt MUNIN (engl. *Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks*), financiran od strane Europske komisije, istraživao je tehničku, ekonomsku i legalnu izvedivost autonomnih brodova od 2012. do 2015. godine. Glavne karakteristike projekta uključivale su integriranje autonomnih sposobnosti brodova uz sustav za nadgledanje i upravljanje s kopna, smanjenje rizika od sudara u skladu s međunarodnim pravilima i upotrebom senzora za aktivno traženje objekata u blizini [11]. Projekt je razvio koncept autonomnog broda za prijevoz rasutog tereta, koji je pokazao značajno smanjenje operativnih troškova i utjecaja na okoliš, posebno zbog smanjene potrošnje goriva, uklanjanja posade te mogućnosti efikasnijeg dizajna broda. Analize projekta pokazale su i značajno smanjenje rizika od pomorskih nesreća, ističući kako većina nesreća proizlazi iz ljudske greške i umora [12].

Rolls Royce je 2015. godine pokrenuo AAWA inicijativu (engl. *Advanced Autonomous Waterborne Applications*) vrijednu 6.6 milijuna eura, koju financira finska agencija za inovacije. Cilj je bio istražiti tehničke, ekonomske i legalne aspekte autonomnih brodova. Projekt je okupio različite dionike pomorske industrije kako bi istražili izazove poput regulatornih prilagodbi i potrebe za promjenom konzervativnog pristupa industrije novim tehnologijama [13]. AAWA je zaključila da su autonomni brodovi tehnički izvedivi, ali su potrebne značajne regulatorne i legalne prilagodbe. Također, istaknuto je da bi pomorska industrija trebala prihvatiti nova rješenja i surađivati s različitim dionicima [14].

Nadalje, Rolls Royce je u suradnji s finskom kompanijom Finferries pokrenuo projekt SVAN (engl. *Safer Vessel with Autonomous Navigation*) u svibnju 2018. Projekt je demonstrirao autonomno putovanje trajekta Falco od Parainenaa do Nauvoa u Finskoj. Opremljen raznim sensorima, trajekt je uspješno izbjegao prepreke i samostalno se pozicionirao na vezu u Nauvo-u [15]. Važan detalj je integracija glavnog upravljačkog sustava u obliku malog kontejnera na brodu, što je omogućilo lakšu integraciju s postojećim sustavima bez potrebe za značajnim preinakama. Treba napomenuti da je Rolls-Royce Commercial u travnju 2019. godine preuzet od strane Kongsberg Maritime, što je rezultiralo integracijom obiju kompanija i provedbom projekata autonomnih brodova pod novim okvirom [16].

Kongsberg Maritime, vodeća norveška kompanija za razvoj autonomnih brodova, surađivala s britanskom tvrtkom Automated Ships Ltd na projektu Hrönn, autonomnog broda za različite obalne operacije. Hrönn je osmišljen za energetske, znanstvene, hidrografsku i ribogojilišnu industriju te ima mogućnosti istraživanja, lansiranja i prikupljanja ROV-a i AUV-a, prijevoza tereta i opskrbe od obalnih postrojenja. Planiralo se da Hrönn počne ploviti kao brod na daljinsko upravljanje, postupno prelazeći na potpunu autonomiju kako se razvijaju kontrolni algoritmi [17].

Također, Kongsberg je u suradnji s norveškom tvrtkom Yara inicirao projekt Yara Birkeland, prvog električnog u potpunosti autonomnog broda za prijevoz kontejnera. Projekt je značajan za razvoj autonomnih brodova i planiran je kao tranzicija s broda s posadom na daljinsko upravljanje do potpune autonomije. Testiranja su se provodila u norveškim vodama zbog nedostatka pravne regulative IMO-a kada su u pitanju autonomni brodovi, posebno u uskim kanalima i složenom obalnom arhipelagu južnog dijela Norveške [7].

2.2. STUPNJEVI AUTONOMIJE AUTONOMNIH BRODOVA

MASS brodovi su brodovi koji, ovisno o stupnju automatizacije, mogu nezavisno vršiti operacije bez ljudskog djelovanja. Razlikuju se u četiri osnovne skupine prema stupnju autonomije:

- brodovi s automatskim procesima i podrškom u odlučivanju
- brodovi na daljinsko upravljanje s posadom
- brodovi na daljinsko upravljanje bez posade
- potpuno autonomni brodovi [2].

Stupnjevi autonomije podrazumijevaju različite razine automatizacije i ljudskog nadzora. Na primjer, brodovi s automatskim procesima i podrškom u odlučivanju omogućuju pomorcima da upravljaju i nadziru brodske sustave, dok brodovi na daljinsko upravljanje s posadom na brodu omogućuju kontrolu broda s druge lokacije uz prisustvo posade na brodu [2].

NFAS (Norveški forum za autonomne brodove) stupnjeve autonomije rangira od nula do pet, pri čemu nulti i prvi stupanj odgovaraju prvom stupnju prema MSC-u [18]. Različita klasifikacijska društva poput britanskog *Lloyd's register of Shipping* (LRS) i francuskog klasifikacijskog društva *Bureau Veritas* (BV) također imaju svoje podjele stupnjeva autonomije, što dodatno doprinosi raznolikosti u tumačenju autonomnih tehnologija u pomorskom sektoru. [57]

Brod na daljinsko upravljanje s posadom na brodu omogućava kontrolu i nadziranje broda s udaljenog položaja, dok je posada prisutna na brodu kako bi mogla preuzeti kontrolu i upravljati brodskim sustavima u slučaju potrebe. Različita klasifikacijska društva imaju svoje definicije ovog stupnja autonomije, pri čemu LRS navodi stupnjeve AL 3 i AL 4 (engl. *Autonomy Level*) kao najpogodnije za opis ovog scenarija [19]. Prema NFAS-u, ovaj stupanj odgovara drugom stupnju podjele MSC-a, gdje se brod bez posade nadzire kontinuirano iz obalnog centra, pri čemu čovjek nadzire automatske odluke računala putem odabranih parametara [18]. BV definira drugu razinu autonomije kao razinu na kojoj sustav prikuplja i analizira informacije te izvršava radnje uz ljudsku odluku, dok posada može biti na brodu ili na obali u svojstvu operatera [20]. Brod na daljinsko upravljanje bez posade, treći stupanj autonomije prema IMO-u, omogućava brodu potpunu autonomiju u donošenju odluka i izvršavanju radnji bez potrebe za ljudskom intervencijom [2]. Različita klasifikacijska društva imaju svoje definicije ovog stupnja autonomije, pri čemu BV navodi treću razinu automatizacije kao najprikladniju za opis ovog scenarija [20]. Prema NFAS-u, treći i četvrti stupanj

automatizacije odgovaraju ovom stupnju, gdje brod može izvršavati složene zadatke bez posade na mostu i s minimalnim ili bez nadzora obalnog centra [18]. Potpuno autonomni brod omogućava operacijskom sustavu broda samostalno donošenje odluka i izvršavanje potrebnih radnji bez ikakve ljudske intervencije. Različita klasifikacijska društva imaju svoje definicije ovog stupnja autonomije, pri čemu LRS navodi šesti stupanj autonomije (AL 6) [19], dok NFAS i BV opisuju peti stupanj automatizacije kao potpunu autonomiju broda [20] [18]. Ovdje sustav samostalno izvršava radnje prema unaprijed definiranim parametrima, a čovjek može preuzeti nadzor u slučaju potrebe za sigurnošću [21]. Posljednje, jedna od preciznijih skala razine automatizacije, poznata kao „Sheridanovi stupnjevi automatizacije“ prepoznaje deset razina automatizacije, kako prikazuje tablica.

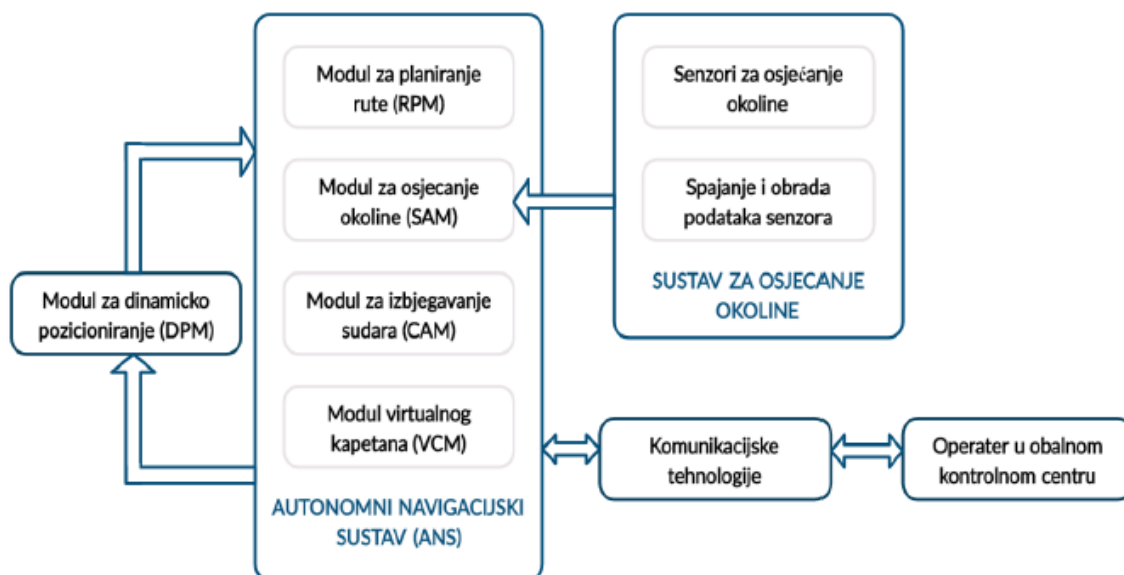
Tablica 1. Sheridanovi stupnjevi automatizacije [22]

Razina automatizacije	Opis
1	Čovjek izvodi sve zadatke bez potpore kontrolnog sustava.
2	Sustav nudi čitav set alternativnih postupaka koje čovjek odabire po potrebi.
3	Sustav nudi mali broj učinkovitih postupaka čovjeku. Čovjek odabire da li će se mali broj tih postupaka izvršiti ili ne, i djeluje se prema čovjekovoj odluci.
4	Sustav daje jednu ponudu čovjeku. Čovjek odlučuje da li će je izvesti ili ne, i djeluje se prema čovjekovoj odluci.
5	Sustav nudi najučinkovitiji postupak (opciju) čovjeku. Ako je čovjek prihvati, sustav je izvršava.
6	Sustav daje jednu ponudu čovjeku. Ako čovjek ne da veto unutar datog vremena, sustav sam vrši postupak.
6.5	Sustav daje jedan prijedlog i simultano ga već provodi.
7	Sustav odlučuje i automatski izvodi prijedlog (akciju) i obavještava čovjeka o poduzetim postupcima.
8	Sustav automatski odabire i izvodi sve postupke te obavještava čovjeka o poduzetim postupcima, ako to čovjek zatraži.
9	Sustav automatski odabire i izvodi sve postupke. Čovjeka se obavještava o

	poduzetim postupcima samo ako sustav smatra da je to potrebno.
10	Sustav automatski odabir i izvodi sve postupke.

3. TEHNOLOGIJA AUTONOMNIH BRODOVA

Inicijativa AAWA predstavlja sustavnu arhitekturu za autonomne brodove nazvanu Autonomni navigacijski sustav (engl. *Autonomous navigational system - ANS*), čiji je ključni modul Modul virtualnog kapetana (VCM - engl. *Virtual captain module*). VCM je srce sustava koje integrira podatke iz različitih dijelova ANS-a, kao i podatke s kontrolne postaje na obali (engl. *Shore control station - SCC*), kako bi donio odluke o trenutnom stanju broda i odgovarajućem načinu rada. Ovo omogućuje VCM-u da koordinira funkcionalnosti ostalih modula i sustava na brodu, osiguravajući optimalnu sigurnost i učinkovitost plovidbe [13]. Slika 2 prikazuje koncept autonomnog navigacijskog sustava brodova.



Slika 2. Koncept autonomnog navigacijskog sustava brodova [13]

Modul dinamičkog pozicioniranja (engl. *Dinamic positioning module - DPM*) omogućuje brodu automatsko održavanje pozicije ili kursa koristeći različite brodske sustave, kao što su kormilo, elise i pramčani potisnici. S obzirom da DPM posjeduje informacije o manevarskim sposobnostima broda, može predvidjeti buduću poziciju, što olakšava Modulu izbjegavanja sudara (engl. *Collision avoidance module - CAM*) preciznije planiranje putovanja i reakciju na opasne situacije [13].

Modul planiranje rute (engl. *Route planning module - RPM*) odgovoran je za planiranje putovanja od njegovog početka do kraja, koristeći unaprijed definirane točke okreta i izbjegavajući prepreke na temelju sustava elektroničkih karata (engl. *Electronic chart and*

display information system - ECDIS). RPM omogućuje brodu da slijedi siguran put, prateći propisane rute i izbjegavajući potencijalne opasnosti na putu [13].

Modul osjećanja okoline (engl. *Situation awareness module* - SAM) integrira podatke s različitih senzora kako bi pružio detaljne informacije o lokalnom okruženju broda. Ove informacije koristi CAM za procjenu rizika od sudara i sigurnu navigaciju, a također optimizira komunikaciju s obalom i drugim brodovima smanjenjem veličine podataka dobivenih od senzorskih uređaja [13].

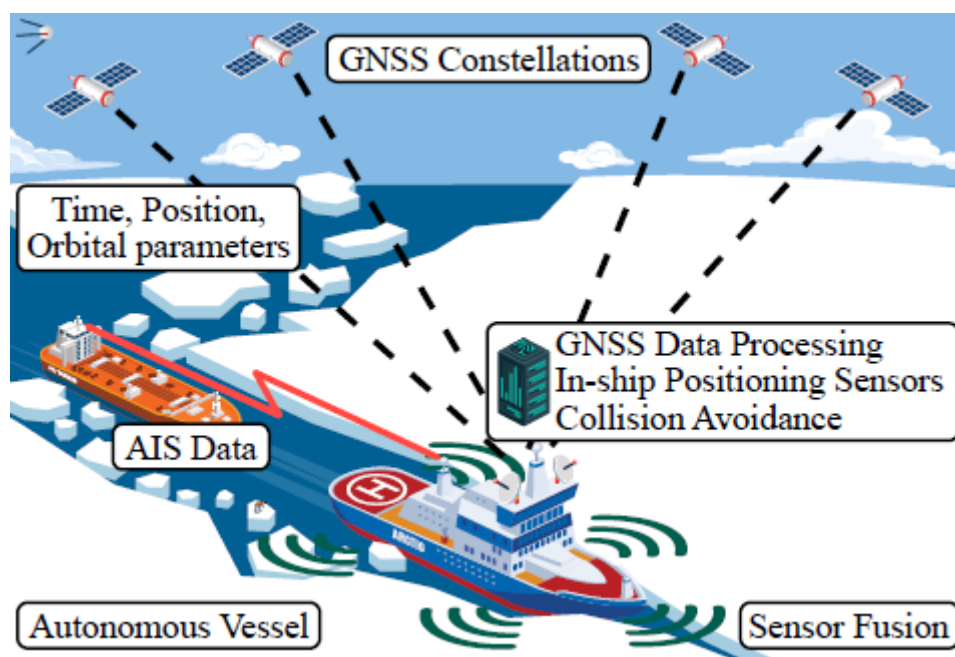
U standardnom autonomnom načinu rada, brod samostalno obavlja zadatke prema prethodno definiranom planu putovanja. U ovom modu, komunikacija između broda i operatera svedena je na minimum, te se prenose samo ključni podaci kao što su trenutni položaj, kurs, brzina, procijenjeno vrijeme dolaska na sljedeću točku okreta, te bitne informacije o stanju broda i okoline. Ovo omogućuje operateru nadziranje više brodova istovremeno, dok autonomni brodovi slijede zadane misije u skladu s planom [13]. Međutim, u slučaju nekih specifičnih situacija ili potrebe za ljudskom intervencijom, autonomni navigacijski sustav može zatražiti veću razinu interakcije s operaterom. Primjer može biti skretanje s predviđenog kursa unutar zadanih sigurnosnih granica, sustav će obavijestiti operatera i pružiti mu mogućnost kratkotrajne intervencije, poput potvrde promjene kursa ili aktiviranja manualnog načina rada putem VHF radio-telefonije za komunikaciju s drugim brodovima ili obalom [13].

Složenije situacije zahtijevaju dublju interakciju s operaterom. Na primjer, kada je potrebno promijeniti rutu na način da se planira potpuno nova točka okreta, autonomni navigacijski sustav predlaže alternativne rute, a operater donosi konačnu odluku nakon procjene dostupnih opcija. U situacijama gdje autonomni sustav nije u mogućnosti samostalno riješiti navigacijske izazove, kao što je plovidba u području gustog prometa, sustav automatski obavještava operatera o potrebi za intervencijom, a brod može aktivirati unaprijed definirane strategije za postupanje u hitnim situacijama [13]. Dinamička prilagodba razine autonomije omogućuje ANS-u da se prilagodi različitim uvjetima i situacijama. Kako tehnologija i algoritmi za upravljanje napreduju, autonomni brodovi će biti sposobni samostalno rješavati sve složenije situacije, smanjujući potrebu za intervencijom operatera. Međutim, dok se ne uspostave jasni standardi za razmjenu informacija između autonomnih i tradicionalnih brodova te dok ne bude dovoljan broj autonomnih brodova za međusobnu komunikaciju, operater će ostati neophodan u određenim situacijama kako bi se osigurala sigurna i efikasna navigacija [13].

4. ELEKTRONIČKI NAVIGACIJSKI SUSTAVI AUTONOMNIH BRODOVA

4.1. GNSS

Globalni navigacijski satelitski sustav (GNSS) omogućuje precizno određivanje brzine, položaja i drugih parametara objekata korištenjem satelitskih radio signala. Arhitektura sustava osmišljena je uz pretpostavku da autonomno brod plovi u zahtjevnim navigacijskim uvjetima. U tom kontekstu, plovilo koristi Dinamički pozicijski (engl. *Dynamic Positioning* - DP) sustav opremljen sensorima za situacijsku svijest (svijest o okolini) kako bi izbjegao sudare te ažurira svoje informacije o položaju pomoću automatskog sustava identifikacije (AIS) u komunikaciji s drugim plovilima. Glavni dijelovi GNSS-a uključuju svemirski, kontrolni i korisnički segment. Svemirski segment obuhvaća konstelaciju GNSS satelita. Za precizno pozicioniranje broda potrebna je vidljivost najmanje četiri satelita u svakom trenutku. Što je veći broj vidljivih satelita, to će procjena pozicije biti pouzdanija, a točnost veća. Svaki GNSS sustav razlikuje se po visini orbite, postavci satelita u orbiti i broju satelita u konstelaciji (GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou). Slika 3 prikazuje arhitekturu, odnosno komponente GNSS-a.



Slika 3. GNSS [23]

Kontrolni segment GNSS sustava odgovoran je za upravljanje konstelacijom satelita. To uključuje praćenje, raspored i održavanje sustava. Uobičajeno, kontrolni segment sastoji se od tri ključna podsustava: Glavna kontrolna stanica (engl. *Main control station* - MCS), mreža od četiri zemaljske antene i mreža nadzornih stanica. Glavna kontrolna stanica nadzire status

satelitskih prijenosnika te održava performanse. Zemaljske antene prate satelite, dok nadzorne stanice prate prijenose [24]. Korisnički segment sastoji se od radio prijarnika na frekvencijskom pojasu L i procesora koji rješavaju navigacijske jednadžbe [25].

Različite su potrebe za preciznošću pozicioniranja ovisno o okruženju u kojem se primjenjuje, bilo da je riječ o navigaciji otvorenim morem ili o preciznom pozicioniranju u uvjetima visoke gustoće prometa poput lučkog okruženja. Na moru, naravno precizno pozicioniranje osigurava autonomnom brodu da stigne do odredišta na siguran i ekonomičan način. Potreba za točnim pozicioniranjem u luci je ključna zbog kratkih udaljenosti, velikog prometa plovila i mogućih prepreka koje otežavaju manevriranje [23]. Jedan od glavnih sustava koji olakšavaju precizno pozicioniranje autonomnih brodova jest GNSS s pozicioniranjem u stvarnom vremenu (engl. *Real-time kinematic* - RTK) i dinamičko pozicioniranje (engl. *Dynamic Positioning* - DP).

RTK pozicioniranje je tehnika koja ima za cilj poboljšati satelitsko pozicioniranje korištenjem referentnog radijskog signala s fiksne bazne stanice. Ova metoda omogućuje točnost od 0,01 do 0,03 metra korištenjem faznih ispravaka izmjerene pogreške u realnom vremenu. Ipak, primjenjivost ove metode je ograničena jer referentna stanica mora biti blizu prijarnika kako bi pružila podršku [26]. Glavne komponente DP sustava uključuju sam sustav pozicioniranja, DP računalo i potisnike. Autonomni brod se održava na željenom kursu i položaju na temelju izračuna DP računala, koje upravlja potisnicima za manevriranje i vijcima. Sustav za pozicioniranje na brodu dopunjuje DP sustav pružanjem referenci o objektima oko plovila. Koristeći te reference, sustav za izbjegavanje sudara korigira putanju ili upozorava na moguće sudare [27]. Najčešće metode referenci za pozicioniranje uključuju GNSS satelite i diferencijalni GNSS, koji kombinira GNSS pozicioniranje s fiksnom referentnom stanicom na tlu. Međutim, ove metode same po sebi nisu dovoljno točne za sve pomorske primjene, uglavnom zbog degradacije signala uzrokovane atmosferskim smetnjama ili blokadom vidnog pravca prema satelitu [23].

GNSS se sastoji od 24 satelita u orbiti oko Zemlje, a svaki satelit emitira radijske signale na L1 i L2 frekvencijama. Međutim, postoje izazovi u korištenju GNSS-a za autonomne brodove, uključujući nedostatak preciznosti u područjima s višestrukim odrazima signala, mogućnost ometanja signala te pouzdanost informacija o smjeru [28]. Valja napomenuti kako se GNSS može koristiti i kao kompas mjereći faznu razliku GNSS signala na dvije ili više antena istog uređaja - naziv za ovo je satelitski kompas. Različiti algoritmi i tehnologije su razvijeni kako bi se riješili ti problemi, uključujući korištenje zemaljskih i satelitskih sustava za nadopunu podataka, specijalizirane algoritme za otkrivanje i blokiranje interferencija te razvoj točnih

satelitskih kompasa. Postojeći i planirani poboljšanja u točnosti i pouzdanosti GNSS sustava od vitalnog su značaja za autonomne brodove, s ciljem postizanja visoke razine preciznosti i pouzdanosti u određivanju položaja [29].

4.2. DNSS

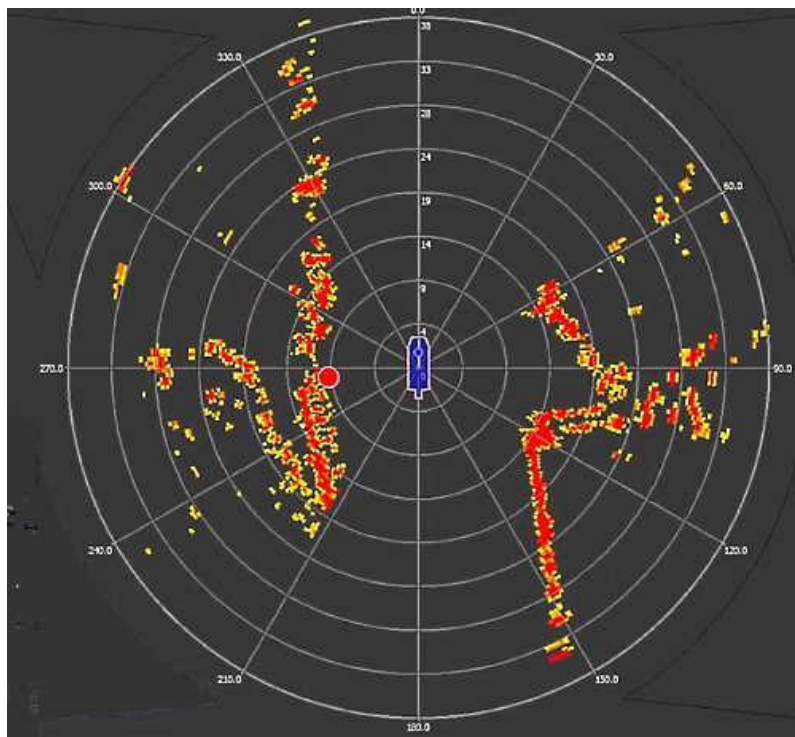
Diferencijalni sustav globalnog pozicioniranja (DGNSS) poboljšava točnost GNSS-a postavljanjem kontrolnih stanica na poznatim pozicijama - referentnim točkama. Ove stanice prate signale GNSS satelita, izračunavajući korekcijske vrijednosti radi poboljšanja točnosti pozicioniranja [29]. Koristeći DGNSS, moguće je postići točnost od oko 2 metra u krugu nekoliko stotina kilometara od kontrolne stanice. Korisnici trebaju posjedovati DGNSS prijemnik i program za obradu korekcijskih podataka kako bi koristili DGNSS korekcije [28]. DGNSS nudi prednost povećane točnosti pozicioniranja za 2 do 3 metra na rasponu do 1000 kilometara od bazne stanice, pri čemu se točnost dodatno poboljšava kako se prijemnik približava baznoj stanici. Istraživanje provedeno na turskom sveučilištu METU u Ankari pokazalo je da je DGPS značajno točniji od klasičnog GPS-a, s horizontalnom greškom od samo 2,299 metara u usporedbi s 10,305 metara kod GPS-a. Vertikalna greška DGPS-a također je bila manja u usporedbi s DGPS-om [30]. Augmentacija GNSS sustava, poput SBAS-a (engl. *Satellite - based Augmentation System* – Satelitski augmentacijski sustav) i GBAS-a (engl. *Ground-based Augmentation System* – Zemaljski augmentacijski sustav), dodatno poboljšava navigacijske sustave koristeći vanjske informacije kako bi se postigla veća točnost, pouzdanost i dostupnost. RTK tehnika GBAS augmentacije koristi se kod DGNSS-a kako bi se postigla centimetarska preciznost pozicioniranja, koristeći načelo mjerenja faze signala nosioca [31].

4.3. RADAR

RADAR je ključni dio navigacijske opreme na suvremenim brodovima, omogućujući otkrivanje i smjerenje objekata pomoću radiovalova. Postoje dvije glavne vrste pomorskih radara: „X-band“ i „S-band“, s različitim karakteristikama i namjenama. X-band radar pruža sliku veće jasnoće i razlučivosti, dok S-band omogućuje bolju sliku u lošim vremenskim uvjetima. Milimetarski valovi (mmW) su nova tehnologija u radarskom segmentu koja koristi elektromagnetske valove kratke duljine, što omogućuje visoku točnost. Iako su ti sustavi vrlo složeni i skupi, imaju prednost male veličine antene i visoke preciznosti.

Korištenjem viših frekvencija od konvencionalnog radara za navigaciju, millimetarski valovni radar omogućuje detekciju manjih objekata na kratkim udaljenostima i drugih plovila u

prometnim vodama s većom preciznošću. Integrirajući različite senzore poput radara, kamera vidljive svjetlosti i infracrvenih kamera, millimetarski valovni radar pruža stabilan pregled situacije oko plovila, neovisno o vremenskim ili svjetlosnim uvjetima [32]. Sustavi mmW koriste frekvencije između 76 i 81 GHz, što rezultira visokom preciznošću. Iako su ovi sustavi složeni i skupi te troše više električne energije zbog visokih frekvencija, njihova integracija u MASS plovila doprinosi povećanju svjesnosti o okolini. Primjena mmW radara na autonomnim brodovima omogućuje pokrivenost oko broda bez mrtvih kutova, što je ključno za brzu reakciju u izbjegavanju sudara na moru. Slika 4 prikazuje zaslon tzv. E-band radara koji koristi mmW frekvencije.



Slika 4. E-band radar [33]

Jedna od ključnih karakteristika E-band radara je njegov domet koji doseže do 600 metara te mu omogućava detaljno prikupljanje informacija o okolnom pomorskom okruženju, što pruža cjelovito razumijevanje okoline. S ovakvim dometom, radar autonomnog broda može otkriti i pratiti objekte poput drugih plovila, plutača, prepreka i potencijalnih opasnosti unutar definiranog radijusa. E K i slični-band radar ne može potpuno zamijeniti X ili S band zbog premalog dometa, ali je dobar za precizne potrebe poput manevriranja u lukama. Nadalje, pomorski radarski sustav ima širinu zrake od 15 stupnjeva po vertikali i 2 stupnja po horizontali. Širina zrake od 15 stupnjeva po vertikali korisna je za kompenzaciju nagnjanja broda. Ova konfiguracija poboljšava preciznost i točnost radara u otkrivanju i analizi objekata unutar svog

vidnog polja. Zbog uske širine zrake, radar može usmjeriti energiju i skenirati s višim detaljima, što rezultira jasnijom i preciznijom slikom situacijske svijesti [33].

Širina zrake od 15 stupnjeva po vertikali osigurava optimiziranu vertikalnu pokrivenost, što omogućuje radaru da detektira objekte s različitim visinama ili prisutne na različitim nadmorskim visinama. U horizontalnom smjeru, širina zrake od 2 stupnja omogućuje precizno praćenje i lokalizaciju objekata. Uska zraka pomaže u razlikovanju između blisko postavljenih ciljeva i omogućuje radaru pružanje točnih informacija o položaju, brzini i kursu obližnjih plovila ili objekata [33]. Radar i LIDAR koriste se za detekciju objekata i analizu refleksija, dok sonar koristi zvučne valove za otkrivanje podvodnih prepreka. Kamere pružaju vizualne podatke za prepoznavanje drugih brodova, navigacijskih oznaka i potencijalnih opasnosti. Umjetna inteligencija djeluje kao „mozak“ autonomnih brodova, procesirajući informacije s senzora i drugih izvora te donoseći odluke. Strojno učenje omogućuje brodovima učenje iz iskustava i poboljšavanje odluka s vremenom. Navigacija autonomnih brodova oslanja se na sofisticirane sustave poput satelitske navigacije (GNSS) i inercijalnih navigacijskih sustava, osiguravajući točne informacije o položaju i brzini za planiranje ruta [34].

Sljedeći su tranzistorski radari, preciznije FMCW (engl. *Frequency-Modulate Continuous-Wave Radar*) i *solid-state* radar. FMCW radar emitira stalnu prijenosnu snagu slično kao obični radar s kontinuiranim signalom (engl. *Continuous-Wave - CW-Radar*). Za generiranje elektromagnetskih valova ne koriste magnetron već tranzistore. FMCW radar može dinamički mijenjati svoju radnu frekvenciju tijekom mjerenja, što znači da se prijenosni signal modulira u frekvenciji ili fazi. Tehnički gledano, mogućnosti radarskog mjerenja putem vremenskih mjerenja ostvarive su samo uz ove promjene u frekvenciji ili fazi.

Jednostavni radari s kontinuiranim signalom bez modulacije frekvencije imaju nedostatak što ne mogu precizno odrediti udaljenost objekta zbog nedostatka vremenske reference koja je potrebna za precizno određivanje ciklusa prijenosa i primanja signala te pretvaranje toga u udaljenost. Za mjerenje udaljenosti stacionarnih objekata koristi se vremenska referenca generirana modulacijom frekvencije prijenosnog signala. U ovom procesu, signal s periodičkim promjenama u frekvenciji šalje se, a kašnjenje Δt (prema pomaku vremena) nastaje kada se primi odjek, što je slično impulsnom radaru. Ipak, za razliku od impulsnog radara gdje se vrijeme prolaska mora izravno mjeriti, FMCW radar mjeri razlike u fazi ili frekvenciji između stvarno poslanog i primljenog signala.

Osnovne prednosti FMCW radara uključuju:

- Mogućnost mjerenja vrlo malih udaljenosti do objekta, gdje se minimalna izmjerena udaljenost može usporediti s valnom duljinom prijenosa
- Mogućnost mjerenja udaljenosti objekta i njegove relativne brzine u isto vrijeme
- Vrlo visoku preciznost mjerenja udaljenosti
- Simultano mjeri udaljenost do objekta i brzinu
- Brzo ažuriranje mjerenja u usporedbi s impulsnim radarskim sustavima, zahvaljujući kontinuiranim radio-emisijama [35]

Princip mjerenja FMCW radara je usporedba frekvencije primljenog signala s referencom, obično direktnim prijenosnim signalom [36].

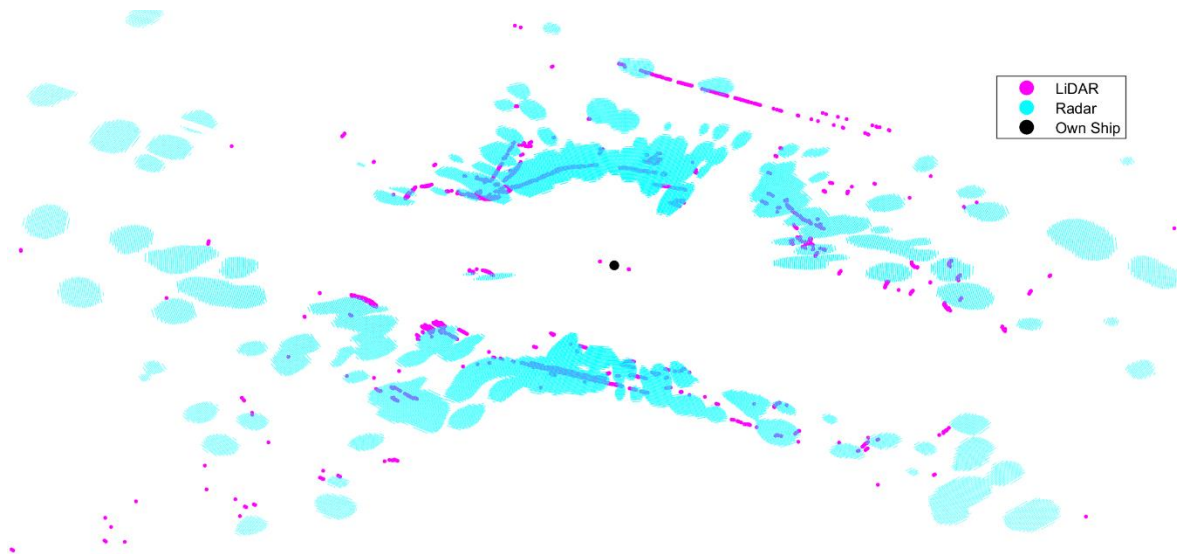
Solid-state radari prvenstveno rade koristeći znatno manju količinu snage, zahvaljujući osjetljivim prijamnicima i tehnologiji procesiranja signala. Kompresija impulsa ovih radara omogućava im stvaranje slika visoke rezolucije, uz to što se bliži objekti vide bolje, odnosno „čišće“ bez slijepih (mrtvih) kutova. Izlazni signal im je precizniji i konzistentniji u odnosu na impulsne radare, što je izuzetno važno u kontekstu autonomnih brodova [37]. Nemodulirani signal procesira se na temelju Dopplerovog efekta bilježeći razlike u frekvenciji ili valnoj duljini preko tzv. *Target Analyzer*-a koji svaki objekt koji se približava brodu smatra potencijalno opasnim [38]. Najnoviji radari koriste antenske fazne nizove (engl. *Phased array*) koji predstavljaju grupu senzora postavljenih na različitim točkama kako bi se relativne faze senzorskih signala mijenjale tako što se efektivni uzorak propagacije niza rezonantno pojačava u željenom smjeru, odnosno smanjuje u neželjenim smjerovima. Ovaj princip je omogućio stvaranja radarskih sustava koji elektronički skeniraju horizont bez potrebe za stvarnim mehaničkim kretanjem [39] i danas su u upotrebi na vojnim plovilima, dok je primjena u trgovačkoj mornarici trenutno u eksperimentalnom stadiju. Fazni nizovi koriste više antenskih elemenata i elektronička vremenska kašnjenja kako bi se stvorilo snopove stvaranjem i uklanjanjem interferencije. Prednosti u odnosu na klasične antene su to što se snopom može upravljati te što se snop može fokusirati bez pomicanja transduktora [40].

I posljednji, MIMO (engl. *Multiple Input Multiple Output*) radarski sustavi s više antena. Svaka antena podrazumijeva proizvoljni valni oblik neovisno o drugim antenama. Različiti valni oblici omogućavaju povratnim signalima da budu primljeni u jednoj pojedinačnoj prijenosnoj anteni. MIMO radarski sustavi poboljšavaju prostornu razlučivost (veća kutna rezolucija) [41] i otporniji su na smetnje. Omjer signala i šuma je poboljšán, pa je povećána i vjerojatnost otkrivanja objekata. Mogu biti s koordiniranim antenama (engl. *Mono-Static*) ili sa široko razmaknutim antenama (engl. *Bi-Static*) [42].

4.4. LIDAR

LIDAR (engl. *Light Detection and Ranging*), ili svjetlosni radar, koristi laserske zrake za mjerenje udaljenosti i dobivanje visoko razlučivih trodimenzionalnih podataka. Ova tehnologija može se koristiti u različitim okruženjima poput kopna, vode, zraka i svemira. Laserska zraka se emitira prema tlu, a zatim skenira s jedne strane na drugu dok letjelica prelazi preko istraživanog područja. Nakon što laserska zraka pogodi objekt i reflektira se natrag, podaci se obrađuju kako bi se odredila udaljenost koristeći informacije iz GPS-a, inercijalnog navigacijskog sustava i drugih GPS stanica na tlu [43].

LiDAR omogućuje precizno prikupljanje podataka u stvarnom vremenu, neovisno o vremenskim uvjetima, što omogućuje precizno određivanje udaljenosti objekata i infrastrukture. Također pruža sposobnost razlikovanja pojedinačnih brodova, uključujući i male brodove, te se može integrirati s različitom navigacijskom opremom poput radara, AIS-a i ECDIS-a [43]. Slika 5 prikazuje preklapanje radara i LiDAR-a, odnosno tzv. fuziju koja prikazuje prednosti, odnosno nedostatke svakog od njih.



Slika 5. RADAR i LiDAR fuzija [13]

Vidi se kako radar ima veći domet detekcije, ali je manje precizan u mjerenjima u usporedbi s LiDAR-om, gdje se može razlikovati više detalja obale i privezanih plovila uz nju. Kako bi se iskoristile prednosti oba senzora, radar se može koristiti za početno otkrivanje ciljeva na većoj udaljenosti, dok se LiDAR može koristiti za točno određivanje položaja objekata koji su bliži. Kod autonomnih brodova, podatci dobiveni RADAR-om se koriste za dobivanje azimuta i udaljenosti objekata, a zatim se preslikavaju na objekte segmentirane od strane kamera. Uz to,

LiDAR se koristi i za mjerenje zagađenja koje brodovi stvaraju. Postavljanjem senzora blizu ispušnih cijevi, LiDAR može precizno mjeriti emisije i učinkovitost motora u različitim uvjetima. Ovo je važno za procjenu utjecaja plovila na okoliš i za praćenje usklađenosti s regulativama o emisijama [44].

Primjeri LiDAR-a uključuju OPAL 3D LiDAR i LADAR, koji se koriste za detekciju, praćenje i klasifikaciju objekata u 3D prikazu. OPAL koristi valnu duljinu od 1550 nm i ima domet do 1000 metara, dok LiDAR koristi valnu duljinu od 520 nm i može otkriti objekte na udaljenosti do jedne nautičke milje. Ovi senzori omogućuju brodovima da precizno detektiraju objekte u njihovom okruženju te da reagiraju na promjene i prijetnje na putu [45]. Slika 6 prikazuje OPAL 3D LiDAR.



Slika 6. OPAL 3D LiDAR [45]

Važno je iskoristiti sve dostupne podatke poput GPS-a, AIS-a, ARPA i ECDIS-a kako bi se postigla maksimalna razina pouzdanosti u autonomnoj navigaciji i izbjegavanju sudara [13].

4.5. ENC

Autonomni brodovi (stupanj četiri) ne mogu se osloniti na tradicionalne elektroničke navigacijske karte (ENC). Iako je MASS svjestan svoje okoline koristeći tehnologije osjeta i izbjegavanja, dalje treba navigacijske podatke kako bi se kretao od točke A do točke B, izbjegavao opasna ili regulirana područja ili se prilagodio različitim zahtjevima prilikom ulaska u određena područja. Problemi koji se pojavljuju kada je u pitanju MASS-ovo korištenje digitalnih ENC podataka leži u njihovom trenutnom obliku, odnosno tome što su ENC i dalje osmišljene za čitanje i interpretaciju od strane ljudske posade te se koriste kako bi informirali

pomorca i pomogli mu u donošenju odluka na temelju informacija s karte, vlastitog znanja i vizualnih opažanja. Drugi problem je to što mnogi ENC-ovi proizlaze iz tradicionalnih tehnika proizvodnje papirnatih karata, te kao takve mogu naslijediti subjektivne kartografske prakse (kao što je generalizacija podataka) i stoga možda ne predstavljaju apsolutnu istinu. Isto tako, ENC-ovi često pate od nedosljednosti u podacima (npr. značajke nisu uvijek prikazane na kartama koje pokrivaju isto područje na različitim razinama detalja, obično zbog kartografskih praksi), što ljudski korisnik može prepoznati i riješiti te što često imaju horizontalne nepodudarnosti (npr. preklapanje rubova jednog ENC-a s drugim može otkriti razlike, obično zbog kartografskih praksi), što ljudski korisnik može prepoznati i riješiti [46].

Sadašnji način navigacije temelji se na obučenoj posadi koja stječe iskustvo u sigurnom vođenju brodova i postupno napreduje do preuzimanja odgovornosti na mostu. Nautičari se oslanjaju na svoje osjetila - vizualna promatranja kroz prozor, osjećaj ravnoteže i sluh te na senzore broda poput radara i AIS-a. Stvaraju mentalnu sliku ili situacijsku svijest, usklađujući je s kartom i pažljivo proučavajući informacije o približavajućim prijetnjama ili navigacijskim uputama na karti [13]. Na temelju tih informacija donose odluke o promjeni smjera ili brzine. Kroz stoljeća, informacije dostupne na nautičkim kartama, radarima i drugim navigacijskim alatima su prilagođene ljudskom opažanju. Previše informacija može uzrokovati zbrku, dok premalo može rezultirati gubitkom važnih detalja. Kontekstualne informacije, poput tekstualnih opisa ograničenja ili uvjeta u plovnom području, često se nalaze u okvirima na kartama. Iako se ove informacije ne prikazuju slikovito na karti, već se opisuju riječima, one su ključne za sigurnu navigaciju. Očekuje se da će moderna autonomna plovila ovisiti o GPS-u za određivanje položaja i donošenje navigacijskih odluka [46].

Ažuriranje navigacijskih podataka je ključno kako za tradicionalne tako i za autonomne brodove. Trenutni proces ažuriranja proizvoda može biti ograničen nedostatkom brzine u distribuciji podataka, posebno kada se brodovi nalaze izvan luke. Stoga je potrebno istražiti nove načine ažuriranja podataka kako bi se osigurala točnost i pouzdanost navigacijskih sustava. Potencijalna rješenja uključuju uvođenje podataka visoke rezolucije o dubini mora koji bi omogućili preciznije navigacijske odluke. Ova nova tehnologija bi omogućila autonomnim brodovima stvaranje realističnije slike morskog dna i izbjegavanje rizika poput nasukanja ili sudara. Stoga je važno istražiti nove metode i tehnologije kako bi se osigurala sigurna i učinkovita navigacija u budućnosti. Korištenjem tehnologije 3D moguće je kreirati digitalni model obale i pripadajućih karakteristika, uključujući efekte osvjetljenja te prikaze tijekom dana i noći. Takav model bio bi dostupan MASS-u kako bi usporedio digitalni prikaz s onim

što vidi putem svojih senzora te na temelju toga odredio svoj položaj u odnosu na te karakteristike. Osim toga, moguće je prekriti visokorezolucijske satelitske snimke preko LiDAR ili terenskih modela kako bi se stvorio još realističniji model stvarnog svijeta koji bi mogao služiti za navigaciju. Alternativne navigacijske metode poput astronomske navigacije mogu biti izvedive za plovidbu na otvorenom moru, a kako tehnologija napreduje, ova bi se alternativa mogla razviti kao zamjena za GPS ako se pokaže potreba [46].

4.6. INERCIJALNI NAVIGACIJSKI SUSTAV

Inercijalni navigacijski sustav (INS) predstavlja ključni dio autonomnih navigacijskih sustava koji omogućuje brodovima da određuju svoj položaj, brzinu i orijentaciju u prostoru bez potrebe za vanjskim referentnim točkama. INS koristi senzore koji mjere ubrzanje i promjene brzine u tri dimenzije (x, y, z) kako bi kontinuirano pratili gibanje plovila. Riječ je o sensorima poput akcelerometara i žiroskopa koji omogućuju INS-u da samostalno izračuna pomak plovila i odredi koliko je daleko prevaljeno od početne točke [47]. Važno je napomenuti da INS ne zahtijeva vanjske informacije o položaju ili brzini, što ga čini neovisnim i pouzdanim sustavom. Također, ovisno o postavljanju senzora, INS može pratiti različite parametre gibanja, kao što su ljuljanje, posrtanje i zaoštavanje, pružajući tako cjelovitu sliku o stanju gibanja broda [47]. Mehanički žiroskopi su ključni dijelovi INS-a koji omogućuju precizno mjerenje kuta u različitim osima. Postoje različite vrste mehaničkih žiroskopa, od onih s jednim stupnjem slobode gibanja do kontinuirano-linearnih momentnih žiroskopa. Njihova uloga je osigurati stabilnost i preciznost mjerenja orijentacije plovila u prostoru [47].

Zvrčni kompas, kao dio autonomnih navigacijskih sustava, predstavlja važan element sigurnosti. Integracija GPS-a i zvrčnog kompasa omogućuje brodu precizno praćenje svojeg položaja i kursa, čak i u slučaju gubitka signala satelitskog kompasa [48]. Ovi je ključno za sigurnu navigaciju i praćenje rute, a komunikacija između GPS-a i žiroskopa osigurava točnost podataka i funkcionalnost cijelog navigacijskog sustava. Greške u ovim uređajima mogu ozbiljno utjecati na navigaciju broda, stoga je važno da podaci budu precizni i pouzdani [49]. Optički žiroskopi, kao što su *Fiber-Optic Gyro* (FOG), koriste Sagnacov efekt za mjerenje kutne brzine rotacije. Sagnacov efekt opisuje interferenciju svjetlosnih snopova u optičkom kabelu koji putuju u suprotnim smjerovima [50]. Kada se žiroskop ne rotira, oba snopa dolaze na fotodetektor u isto vrijeme [47]. Međutim, rotacijom žiroskopa, dolazi do razlike u vremenu dolaska svjetlosnih snopova na fotodetektor. Ova razlika u vremenu proporcionalna je kutnoj

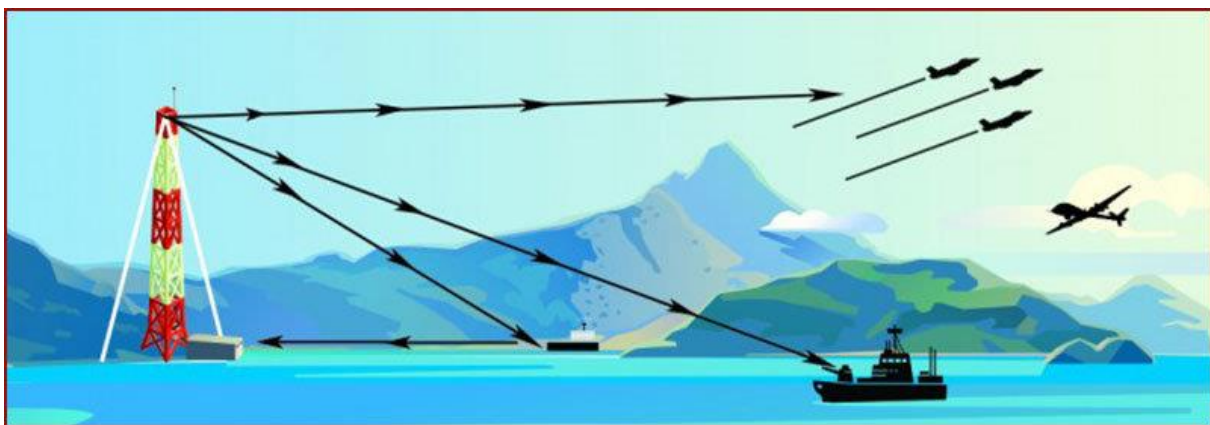
brzini rotacije, što omogućuje žiroskopu da odredi kutnu brzinu i tako pruži informacije o rotaciji [47].

Laserski žiroskopi, poput *Ring Laser Gyro* (RLG), također koriste Sagnacov efekt, ali na drugačiji način. Ovdje se svjetlosni snopovi usmjeravaju u zatvorenu putanju kroz optičke elemente, poput zrcala, što omogućuje precizno mjerenje kutne brzine rotacije [51].

Optički žiroskopi omogućuju precizno određivanje smjera rotacije Zemlje i pravog sjevera. Koristeći složene algoritme poput Kalmanovih filtera, moguće je kombinirati signale dobivene unutar žiroskopa kako bi se dobio pouzdan smjer rotacije i pravog sjevera. Ključni su za preciznu navigaciju u autonomnim sustavima gdje je važno pouzdano određivanje orijentacije i rotacije [51].

4.7. eLORAN

eLoran sustav predstavlja evoluciju Loran-C sustava s poboljšanim performansama i dodatnim servisima. Ova nadogradnja omogućuje preciznije određivanje pozicije, veći integritet, dostupnost i kontinuitet, čime se pruža podrška satelitskim navigacijskim sustavima. Koristeći postojeće Loran-C odašiljače, eLoran koristi frekvenciju od 100 kHz i precizne pulseve za određivanje pozicije s vremenskom točnošću u nanosekundama. Sinkronizacija vremena temelji se na Cezijevim satovima usklađenim s koordiniranim svjetskim vremenom (UTC), čime se osigurava neovisnost o GNSS sustavima [49]. Bitna razlika između Loran-C i eLoran sustava je u uvođenju Loran Data Channela (LDC), koji omogućuje prijenos digitalnih poruka putem širokopojsnog kanala spore brzine. Ovaj kanal koristi se za prenošenje DGPS ispravki i informacija o manjim varijacijama signala u lukama gdje se traži visoka točnost. Iako je prijenos podataka spor, omogućuje se emitiranje visokoprioritetnih informacija korisnicima [49]. Slika 7 prikazuje princip rada eLorana.



Slika 7. Princip rada eLORAN-a [52]

eLoran sustav je otporniji na ometanje od GNSS-a zbog jačeg signala i potrebne velike snage za ometanje. Trenutno je eLoran jedini sustav koji može potpuno zamijeniti GPS i pružiti pouzdanu alternativu. Njegove ključne prednosti uključuju međunarodno standardizirana odašiljanja, vremensku sinkronizaciju s UTC-om, otpornost na ometanje i vremenske smetnje [49]. Sustav eLoran zadovoljava stroge standarde preciznosti, dostupnosti, cjelovitosti i integriteta koji su bitni za različite sektore, uključujući aeronautiku, navigaciju kopnenih vozila i pristupe lukama. Primjena eLorana omogućuje preciznije pozicioniranje od 10 metara u lučkim područjima te prijenos podataka u stvarnom vremenu uz vremensku točnost od 100 nanosekundi [53]. Sustav je već aktiviran u nekim dijelovima svijeta, a mogao bi postati ključan dio razvoja autonomnih brodova kao pouzdan „backup“ GNSS sustavima [49].

4.8. OPTIČKO-TERMALNI SENZORI

Optičko-termalni senzori, poput videonadzora i VIDAR tehnologije, pružaju koristi u pomorstvu kroz poboljšanje sigurnosti na brodu, olakšani nadzor teže dostupnih dijelova broda te pomoć u istraživanju pomorskih nezgoda. VIDAR tehnologija, koja omogućuje otkrivanje i mjerenje udaljenosti, može poboljšati pokrivenost područja do 80 puta u usporedbi s drugim elektro-optičkim i termalnim sensorima, što je korisno za autonomne i daljinski upravljane brodove [54]. Koriste se i razvijaju tehnologije poput FLIR M500, koji kombinira termalnu kameru visoke rezolucije s mogućnostima povećanja, automatskim praćenjem objekata i radarskom integracijom za praćenje plotiranih radarskih objekata kamerom. Ova tehnologija omogućuje otkrivanje čovjeka u moru na udaljenosti do 4,9 NM i brodova na udaljenosti do 8,3 NM .

Video kamere i infracrvene kamere predstavljaju ključne komponente autonomnih sustava za dobivanje detaljnih informacija o okolini. Video kamere koriste se za snimanje slika oslanjajući se na vidljivo svjetlo. Međutim, njihova učinkovitost ovisi o raspoloživosti svjetlosti i vremenskim uvjetima, što ih čini ograničenima u uvjetima slabog osvjetljenja ili noću. S druge strane, infracrvene kamere, poznate i kao termalne kamere, hvataju infracrveno zračenje koje emitiraju objekti, čime omogućuju snimanje slika čak i u potpunom mraku ili teškim uvjetima osvjetljenja [55]. Infracrveno zračenje ima veće valne duljine od vidljive svjetlosti i nije vidljivo ljudskom oku, ali termalne kamere mogu registrirati i interpretirati ove valove, pružajući sliku temeljenu na različitim temperaturama objekata [56].

Integracija video i infracrvenih kamera omogućuje autonomnim navigacijskim sustavima stvaranje sveobuhvatnije slike okoline. Ovaj kombinirani pristup omogućuje bolje

razumijevanje okoline, prepoznavanje objekata i situacija te donošenje brzih i preciznijih odluka. Na primjer, definiranje jasnih linija horizonta, detektiranje objekata u okolini i identifikacija potencijalnih opasnosti postaju mogući uz korištenje ovih senzora [57]. Obrada podataka dobivenih iz video i infracrvenih kamera zahtijeva sofisticirane algoritme za obradu slika. Ti algoritmi omogućuju analizu i interpretaciju vizualnih informacija kako bi se identificirali objekti, praćenje njihovog kretanja te procjena okolnih uvjeta. Ovaj složeni proces omogućuje autonomnim sustavima da djeluju na temelju stvarnih podataka o okolini, što je ključno za sigurnu i učinkovitu navigaciju u različitim uvjetima [56].

4.9. DUBINOMJERI

Podvodni senzori su od vitalne važnosti za autonomno upravljanje brodovima jer omogućuju neposredno praćenje stanja morskog dna u stvarnom vremenu. Dubinomjeri i sonari su neki od primjera sustava za otkrivanje podvodnih prostora koji pružaju precizne podatke o dubini. Trenutno se koriste dvije različite vrste navigacijskih sonara za postizanje ovog cilja. [58]. Postoje dvije različite vrste sonara koje se koriste u ovom kontekstu. Jedna vrsta koristi metodu svjetlosne kružnice, usmjeravajući sonarni snop prema naprijed od broda i neprestano generira nova očitavanja. Druga vrsta sonara koristi pojedinačni zvučni impuls kako bi prikupila akustične podatke, koji se potom analiziraju kako bi se pružila relevantna očitavanja. Ti podaci se koriste za stvaranje slike podvodnog prostora ispred broda, s detaljima o dubini i drugim značajkama [58].

Navigacijski sonar s mogućnostima pregleda ispred broda pruža vrlo važne podatke za vođenje broda i usporedbu s podacima na elektroničkim navigacijskim kartama. Ti podaci omogućuju usporedbu stvarnih morskih značajki s onima prikazanim na kartama, što doprinosi sigurnosti i točnosti navigacije. Ova tehnologija omogućuje brodovima da precizno ocijene dubinu vode i identificiraju eventualne prepreke ili opasnosti ispred sebe [58]. Kod mjerenja dubine, jedan od najčešće korištenih uređaja za mjerenje dubine je dubinomjer, koji omogućuje precizno određivanje dubine mora ispod plovila. U današnjici, ultrazvučni dubinomjeri su postali standardna oprema na većini plovila. Ultrazvučni dubinomjeri koriste zvučne impulse koji se odašilju iz dna plovila prema morskom dnu, a zatim se prati vrijeme koje je potrebno zvučnom valu da se vrati natrag u prijemnik. Na temelju poznate brzine zvuka u vodi, dubina ispod kobilice plovila se precizno izračunava [59]. Slika 9 prikazuje standardni oblik ultrazvučnog dubinomjera.



Slika 8. Ultrazvučni dubinomjer [60]

Princip rada ultrazvučnih dubinomjera temelji se na sposobnosti zvuka da se širi kroz vodu putem vibracija čestica u mediju. Ova tehnologija omogućuje slanje vibracija s vrlo malom amplitudom radi mjerenja velikih dubina. Postoje dva osnovna pristupa dobivanju zvučnih valova: magnetostruktivni i piezoelektrični. Magnetostruktivni pristup koristi promjenu duljine feromagnetskih materijala pod utjecajem magnetskog polja, dok piezoelektrični pristup koristi svojstvo kristala da generira vibracije kada se stisne ili rastegne. Nakon što se zvučni valovi emitiraju prema morskom dnu, oni se reflektiraju od dna u obliku odjeka, koje prijemnik detektira i pretvara u električne signale [61].

Dobiveni električni signali zatim se mogu koristiti za grafički prikaz dubineorskog dna na ekranu ili ih se može poslati na pisaač radi stvaranja papirnate karte dubine. Ultrazvučni dubinomjeri omogućuju precizno mjerenje dubine i igraju ključnu ulogu u sigurnoj navigaciji plovila.

4.10. BRZINOMJERI

Senzori brzine su ključni uređaji za mjerenje brzine vozila ili objekta. Postoje različite vrste senzora brzine, uključujući elektromagnetske brzinomjere, brzinomjere okretaja, LiDAR senzore, Doppler radare i druge [62]. Elektromagnetski brzinomjeri su posebno korisni za mjerenje brzine broda kroz vodu. Oni se oslanjaju na inducirane promjene magnetskog polja u senzoru koje proizlaze iz kretanja broda. Poznati su po visokoj točnosti, budući da nemaju pokretnih dijelova, ali je ključno pravilno postavljanje i kalibracija [63].

Doppler logovi omogućuju vrlo precizna mjerenja brzine plovila, bez obzira jesu li dobivena akustičkim putem putem Doppler-sonara ili radio interferometrijskim putem putem Dopplerove mjere satelitskih signala poput GPS-a. Također, ultrazvučni senzori brzine koriste dva

ultrazvučna pretvarača koji emitiraju ultrazvučne impulse kroz vodu koja prolazi pokraj trupa broda. Računajući razliku u vremenu propagacije impulsa od jednog senzora do drugog, uređaj precizno izračunava brzinu broda kroz vodu [64].

4.11. VIDEO-KAMERE

Računalno zahtjevan dio obrade podataka na autonomnim brodovima je analiza podataka dobivenih kamerama, jer kamere visoke rezolucije generiraju velike količine podataka. Prvi korak u analizi slike je segmentacija podataka kako bi se odvojili bitni podaci od nebitnih. Složeni algoritmi se zatim primjenjuju za praćenje i klasifikaciju objekata. Podaci od drugih senzora se koriste kako bi se olakšao ovaj proces [13]. Postoji nekoliko načina spajanja podataka od različitih senzora. Spajanje niske razine se koristi kada se podaci još nisu obradili, dok se kod spajanja visoke razine podatci obrađuju individualno i detekcije senzora se spajaju na razini objekta. Najčešće se koristi kombinacija visoke i niske razine spajanja za maksimalnu učinkovitost [13]. Senzorske sposobnosti na autonomnim brodovima omogućuju neprekidno nadziranje okoline u 360 stupnjeva u stvarnom vremenu, uključujući vidljivost u mraku i lošim vremenskim uvjetima poput jake kiše, snijega i magle. Također, senzori moraju moći detektirati prijetnje ispod vode, ispred i oko broda kako bi se izbjegli sudari i nasukavanja. Prema standardima IMO-a, senzori uključuju ljudski vid, slušanje, radar za otkrivanje drugih plovila i kopna te dubinomjer za nadzor dubine vode.

5. IZAZOVI ZA BUDUĆNOST

5.1. OPERACIJE PRIVEZA I ODVEZA

Zbog ograničenog prostora u lukama i česte gužve, sudari tijekom operacije veza (i odveza) česta su pojava. Istraživanje operacija veza i odveza autonomnih brodova predstavlja ključno područje u razvoju tehnologije za autonomnu navigaciju plovila. S obzirom na to da vez/odvez uključuje manevriranje broda malim brzinama u ograničenim područjima, vanjsko okruženje ima značajan utjecaj na sustav upravljanja brodom [65]. Veliki brodovi, zbog svoje veličine i brzine, stvaraju značajnu količinu energije tijekom ovog manevra. Složene hidrodinamičke karakteristike brodova pri niskim brzinama čine ih teškim za predvidjeti. Stoga su zapovjednik, peljari, tegljači i kadar na obali od vitalnog značaja za precizno upravljanje brzinom, kutom pristupa broda i brzinom okreta kako bi se izbjegla oštećenja trupa i infrastrukture luke. Za postizanje autonomnog veza MASS-a, kontrolni modul mora precizno procijeniti stanje gibanja broda prilikom donošenja odluka [66].

Iako su postignuti određeni napreci u automatizaciji, uključujući autonomno izbjegavanje sudara i planiranje ruta, sam vez/odvez i dalje predstavlja veliki izazov za industriju brodogradnje. U pogledu veza, riječ je o problemu tzv. „posljednje nautičke milje“ kod autonomnih brodova još uvijek nije potpuno riješen, što zahtijeva daljnja istraživanja i razvoj [67]. Arhitektura sustava za autonomno usidranje obuhvaća različite aspekte kao što su planiranje putanje, optimalna kontrola, raspodjela snage i drugi parametri potrebni za inteligentno upravljanje brodom. S obzirom na razlike u plovidbi uz obalu, gdje brodovi često plove sporom brzinom pod velikim kutom *drifta*, istraživanja se trenutno usredotočuju na smanjenje duljine puta i vremenskih troškova. Unatoč tome, važno je uzeti u obzir i vanjske faktore poput okolišnih promjena i fizičkih ograničenja, koji mogu imati značajan utjecaj na performanse upravljanja brodom [68].

Prvi pristup uključuje korištenje sustava za vez na obali. Različite tehnologije poput sonarskih sustava, ultrazvučnih senzora i inteligentnih vizualnih nadzornih sustava koriste se za praćenje udaljenosti i brzine prilikom usidranja. Također, laserski sustavi za mjerenje udaljenosti pokazali su se kao učinkoviti alati za precizan vez autonomnih brodova [69]. Drugi pristup uključuje sustave za vez na samim brodovima. Korištenje DGPS-a, radara i LiDAR sustava omogućuje precizno pozicioniranje broda u odnosu na obalu i druge objekte u okolini [70].

5.2. COLREG

Tijekom godina, razmatrane su mogućnosti modificiranja i primjene pravila COLREG-a (Pravila za izbjegavanje sudara na moru) za operacije autonomnih pomorskih sustava. Jedno od ključnih pitanja u vezi s ovom temom nije samo kako dobro autonomni brod može poštovati postojeća ili potencijalno prilagođena pravila COLREG-a, već i da li takvo plovilo ima sposobnost fleksibilnog odlučivanja, što je očekivano u situacijama koje zahtijevaju odstupanje od standardnih pravila kako bi se osigurala sigurnost plovidbe [71].

Većina istraživanja i studija usredotočena je na to kako autonomna plovila mogu biti usklađena s pravilima COLREG-a. Nedavni primjeri istraživanja pokazuju kako se autonomna plovila mogu uspješno uklopiti u postojeće pomorske prometne scenarije pod nadzorom neovisnih vlasti. Međutim, unatoč tome, definiranje i razumijevanje takve usklađenosti za bespilotna plovila ostaje izazovno i otvoreno pitanje [72]. Jedan od ključnih izazova u ovom kontekstu je nedostatak jasnih metrika i kriterija za evaluaciju usklađenosti autonomnih plovila s pravilima COLREG-a. Također, tehnološki aspekti mogu biti prepreka, kao što su nedostaci u senzorima ili ograničenja u dometu i učinkovitosti detekcije radara ili drugih senzora [73]. Pitanje koje se često postavlja je i kako različite vrste autonomnih plovila mogu najbolje postići usklađenost s pravilima pomorske sigurnosti. Neki istraživači smatraju da daljinski upravljana plovila mogu lakše postići usklađenost s COLREG-om jer ljudi mogu preuzeti kontrolu kada je to potrebno. S druge strane, drugi ističu potrebu za autonomnim plovilima koja imaju dovoljnu razinu autonomije kako bi sigurno plovila čak i u slučaju gubitka kontakta s nadzornim centrom na obali [71].

S obzirom na tehnološki napredak i stalna istraživanja u području autonomnih pomorskih sustava, očekuje se daljnji razvoj i poboljšanje metoda i tehnologija koje će omogućiti autonomnim plovilima da se uspješno prilagode i poštuju pravila COLREG-a, čime će se unaprijediti sigurnost plovidbe u budućnosti [72]. Stoga je važno istražiti izvedivost korištenja COLREG-a za autonomne sustave i, po potrebi, prilagoditi ih kroz pojašnjenja i izmjene. Međutim, takve izmjene moraju biti prihvatljive samo ako tehnološka rješenja, posebice sposobnosti strojnog učenja, omogućuju autonomnim sustavima da se ponašaju na način koji odgovara sposobnostima iskusnih pomoraca [74]. Jedan od prijedloga jest uvođenje dodatka COLREG-u koji bi se odnosio na potpuno autonomne brodove, umjesto direktnih izmjena samih pravila. Budući da je COLREG osmišljen uz pretpostavku izravne ljudske kontrole, prevođenje tih pravila u upute koje strojevi mogu slijediti predstavlja tehnološki izazov. Posebno je ključno osigurati da algoritmi strojnog učenja mogu prepoznati situacije u kojima

je potrebno odstupiti od pravila radi izbjegavanja opasnosti te odabrati najbolje moguće akcije u skladu s onim što bi razumni pomorac učinio [75]. Još jedan važan aspekt je predviđanje ponašanja posade na drugim plovilima, što također zahtijeva pažnju i razumijevanje softverskih rješenja na autonomnim plovilima [74].

5.3. KIBERNETIČKI NAPADI

U proteklim godinama, međunarodne organizacije kao što su IMO i IACS naglašavale su važnost implementacije kibernetičke sigurnosti na brodovima. Budući autonomni brodovi zahtijevat će istu ili čak višu razinu kibernetičke sigurnosti u usporedbi s trenutačno potrebnom. Stoga je potrebno provesti istraživanje kibernetičke sigurnosti koje se fokusira na primjenu AI tehnologija i autonomnih navigacijskih sustava, uz cjelovito razumijevanje kibernetičkih rizika u pomorskom okruženju [76]. Kroz suradnju i istraživanje među dionicima u brodogradnji, pomorskoj industriji te industriji sigurnosti, trebaju se razviti sigurnosni zahtjevi koji će biti primijenjeni u fazi dizajna kako bi se osigurala sigurnost autonomnih brodova. Postoji uvjerenje da će primjena specifičnih metoda testiranja penetracije i procjene rizika u kontekstu brodova rezultirati detaljnijim sigurnosnim zahtjevima [77].

Jedan od ključnih problema kada je u pitanju sigurnost autonomnih brodova je veći prostor za napad kada su u pitanju kibernetičke prijetnje. Mogućnost hakiranja otvara vrata različitim scenarijima napada, uključujući promjene rute broda ili čak izvođenje 'samoubilačkih' napada. Tu je još i rizik od krađe tereta, financijskog ucjenjivanja ili čak otimanja plovila radi krađe tehnologije broda ili oružanih sustava [76].

Različite prijetnje s kojima se suočavaju autonomna plovila su klasificirane u nekoliko kategorija kao što je ometanje RF signala, manipulacija senzorima i komunikacijskim sustavima, napadi na temeljne IT sustave i napadi na umjetnu inteligenciju korištenu za autonomne operacije [78]. Rješavanje ovih prijetnji zahtijeva primjenu naprednih tehnika i strategija koje uključuju upotrebu adaptivnih sustava antena, korištenje više navigacijskih sustava kako bi se smanjio rizik od ometanja, te implementaciju mehanizama samopopravka u slučaju gubitka komunikacije ili osjetljivosti položaja [76]. Napadi za zavaravanje ili smanjenje učinkovitosti senzora mogu značajno ugroziti sigurnost autonomnih plovila. Napadi mogu ciljati senzore poput GNSS-a, radara, optičkih senzora, ultrazvučnih i akustičnih senzora, čiji su podaci ključni za identifikaciju lokacija brodova i prepreka u okolini [41]. Zavaravanje GNSS-a podrazumijeva slanje lažnih signala prijemnicima s ciljem iskrivljavanja podataka o lokaciji plovila. Iako se često naglašava opasnost od ometanja GNSS signala, zavaravanje GNSS-a

može biti jednako opasno jer lažni signali mogu dovesti brod izvan predviđene rute, što može rezultirati ozbiljnim incidentima [79].

Napadi na senzore često ne zahtijevaju fizički pristup unutrašnjosti plovila. Senzori koji koriste bežične signale za prijenos podataka posebno su osjetljivi na napade poput ometanja RF signala. Osim toga, napadači mogu ciljati i senzore unutar plovila, iako takvi napadi obično zahtijevaju fizički ili logički pristup mrežama plovila [76]. Različite tehnike mogu se koristiti za zaštitu od ovih napada. Postavljanje redundantnih senzora, idealno na različitim lokacijama plovila, može pomoći u osiguravanju kontinuiranog praćenja okoline čak i ako jedan senzor bude oštećen ili onesposobljen. Također je važno koristiti različite tehnologije senzora kako bi se smanjio rizik od simultanog zavaravanja svih senzora. Nadalje, enkripcija GNSS signala može biti ključno za sprečavanje zavaravanja GNSS-a. [80]

Kako bi se dodatno zaštitili od lažiranih poruka AIS-a, autonomna plovila mogu primijeniti tehnike filtriranja lažnih poruka i korištenje drugih senzora poput radara kao dopune. Isti koncept može se primijeniti i kod borbe protiv zavaravanja GNSS-a, gdje enkripcija signala može biti najefikasnija mjera [81]. Presretanje ili izmjena komunikacija može rezultirati neovlaštenim pristupom ili manipulacijom podacima koji se prenose između broda i kontrolnog centra, kao i drugih relevantnih točaka prijena podataka. To može dovesti do različitih opasnosti, uključujući promjenu smjera ili luke dolaska plovila, što može biti izuzetno opasno kada su u pitanju autonomni brodovi [82]. Kao rješenje se navodi implementacija snažnih kriptografskih mehanizama kako bi se osigurala autentičnost, povjerljivost i integritet podataka tijekom njihovog prijena. Uz to, korištenje više komunikacijskih kanala s različitim tehnologijama može pružiti dodatnu razinu sigurnosti. Redundancija omogućuje alternativne načine prijena podataka ako jedan kanal postane kompromitiran ili nedostupan. Također, imajući više kanala, moguće je usporediti podatke primljene iz različitih izvora kako bi se osigurala točnost i integritet informacija [83].

Napadi na OT sustave autonomnih brodova uzrokuju kvarove ili prekid usluge. Konvencionalnim industrijskim protokolima nedostaju autentifikacija i enkripcija, što omogućuje napadačima remećenje mrežnih operacija ili manipulaciju porukama kako bi izazvali prekid kontrolnog procesa [76]. Ovi sigurnosni nedostaci mogu ostati čak i kada se koriste protokoli s dodatnim sigurnosnim značajkama. Infiltracija u OT sustav može se izvršiti putem mreže ili fizičkog pristupa komponentama. Zaštita uključuje jačanje sigurnosti, razdvajanje mreža, korištenje jednosmjernih mrežnih uređaja i primjenu fizičkih mjera zaštite [84].

Napadi na IT sustave rezultiraju poremećajima u radu sustava te neovlaštenim otkrivanjem, brisanjem ili izmjenom podataka. Greške u konfiguraciji mrežne segregacije ili drugi sigurnosni propusti mogu omogućiti napadačima pristup osjetljivim informacijama ili ključnim resursima. Naime, IT sustavi mogu sadržavati administrativne računalne sustave, poslužitelje za pohranu podataka ili druge komponente koje podržavaju funkcionalnost plovila [76].

Zaštita IT sustava od kibernetičkih napada zahtijeva uspostavu sigurnosnih praksi koje su jednako važne kao i zaštita OT sustava. Važno je aktivno razmatrati implementaciju sigurnosnih rješenja poput sustava za upravljanje sigurnosnim informacijama i događajima (SIEM) ili sustava za prevenciju upada (engl. *Intrusion prevention system* – IPS). Također, segmentacija mreže i korištenje različitih sigurnosnih slojeva poput VLAN-a, vatrozida i mreža definiranih softverom (engl. *Software defined network* – SDN) mogu ograničiti širenje napada unutar mreže i smanjiti rizik od kompromitiranja ključnih sustava i podataka [85].

Napadi na umjetnu inteligenciju u autonomnim operacijama. AI sustavi često se oslanjaju na strojno učenje (engl. *Machine Learning* – ML), koje stječe znanje iz velikog broja primjera u skupu podataka. Međutim, ako se taj skup podataka ošteti ili „zatrjuje“, ML modeli mogu biti kompromitirani. Napadači ciljaju AI u autonomnim plovilima kako bi uzrokovali pogreške u operacijama ili čak kvar. Posebno je važno osigurati integritet AI u ovim situacijama, gdje je komunikacija sa središnjim upravljačkim sustavom (SCC) nedostupna, a manevriranje ovisi o AI. Tipični napadi uključuju izbjegavanje modela, trovanje modela s otrovnim podacima te otrovanje samih skupova podataka. Osim toga, postoji opasnost od izmjene senzorskih podataka ili predefiniranih postavki vožnje. Zaštita AI od napada zahtijeva osiguranje svih komunikacijskih sučelja, kao i računalnih resursa korištenih za AI operacije [86].

Napadi putem lanaca opskrbe se mogu dogoditi u bilo kojoj fazi životnog ciklusa IT i OT komponenti, uključujući hardver i softver. U situacijama kada autonomni brodovi plovo daleko od središnjeg upravljačkog centra, sigurnosni incidenti se možda neće odmah primijetiti, što može dovesti do ozbiljnih posljedica poput oštećenja ili čak otmice plovila. Napadi se mogu dogoditi na različite načine, uključujući manipulaciju softverskim modulima i otvorenim kodom te „infekciju“ zlonamjnim bibliotekama [86]. Stoga je važno osigurati cjelokupni lanac opskrbe kako bi se spriječila namjerne ili slučajne izmjene tijekom životnog ciklusa komponenti, jer nedostatak sigurnosti može rezultirati ozbiljnim sigurnosnim prijetnjama za OT i IT sustave. Vlasnici plovila trebaju zahtijevati od dobavljača visoku razinu sigurnosti, uključujući certifikate o sigurnosti treće strane poput ISO 27001. Održavanje softverske liste

materijala i redovita provjera integriteta proizvoda prije implementacije također su važni koraci u zaštiti od ovih napada [87].

Napadi fizičkim pristupom autonomnim brodovima posebna su prijetnja na otvorenom moru gdje je pristup brodu neograničen. Pirati mogu preuzeti kontrolu nad brodom, mijenjati rute ili zaustaviti stroj radi otmice. Kako bi se smanjio rizik od takvih napada, važno je zaštititi kablove i mrežne priključke unutar plovila, te instalirati alarmne sustave koji mogu detektirati neovlaštene pristupe [87].

Napadi na kontrolni centar na obali (engl. *Shore control centre* – SCC) predstavljaju problem, posebno zbog nedostatka adekvatne segregacije između kritičnih mreža poput C2 (engl. *Command and Control*) i uredskih mreža unutar SCC-a. Takve slabosti mogu omogućiti napadačima kompromitaciju sustava, što može rezultirati slanjem lažnih ili neovlaštenih naredbi autonomnim brodovima ili čak prekid komunikacije između SCC-a i broda [76].

Sprječavanje takvih prijetnji uključuje implementaciju sustava za upravljanje događajima i informacijskom sigurnošću (SIEM) koji mogu detektirati i reagirati na sumnjive aktivnosti ili prijetnje. Također je važno osigurati fizičku kontrolu pristupa prostorijama SCC-a i implementirati perimetarske sigurnosne mjere kako bi se spriječilo neovlašteno fizičko približavanje sustavima [76].

6. ZAKLJUČAK

Autonomni brodovi transformacija su pomorske industrije te odgovor na buduće zahtjeve tržišta za povećanom učinkovitošću, sigurnošću i održivošću. Tehnološki napredak u području elektroničkih navigacijskih uređaja omogućuje autonomnim brodovima navigaciju i operacije bez potrebe za (izravnim) ljudskim intervencijama, otvarajući prostor za nove mogućnosti i poboljšanja.

Projekti poput MUNIN-a pokazali su izvedivost i potencijal autonomnih brodova u smanjenju operativnih troškova, utjecaja na okoliš te povećanju sigurnosti plovidbe. Integracija različitih tehnologija poput GNSS-a, DGPS-a, RADAR-a i LIDAR-a omogućuje autonomnim brodovima precizno pozicioniranje, detekciju prepreka te donošenje odluka temeljenih na dobivenim podacima.

Novija tehnologija, poput milimetarskih valovnih (mmW) radara, pruža visoku preciznost i omogućuje detekciju manjih objekata na kratkim udaljenostima. Kombinirajući različite senzore poput radara, kamera vidljive svjetlosti i infracrvenih kamera, mmW radari pružaju stabilan pregled okoline oko plovila, neovisno o vremenskim ili svjetlosnim uvjetima. Njihova primjena na autonomnim brodovima omogućuje pokrivenost oko plovila bez mrtvih kutova, ključnu za brzu reakciju u izbjegavanju sudara na moru. LIDAR, ili svjetlosni radar, također predstavlja važnu tehnologiju za prikupljanje trodimenzionalnih podataka visoke razlučivosti o okolini u stvarnom vremenu, bez obzira na vremenske uvjete. Ova tehnologija pruža precizno određivanje udaljenosti objekata i infrastrukture te se može integrirati s različitom navigacijskom opremom.

Napredak u optičko-termalnim sensorima, poput videonadzora i infracrvenih kamera, pridonosi povećanju sigurnosti na brodu i olakšava nadzor okoline, posebno u uvjetima slabog osvjetljenja ili noću. Uz integraciju različitih senzora i naprednih navigacijskih sustava poput GNSS-a i inercijalnih navigacijskih sustava, autonomni brodovi postaju sposobni za samostalno donošenje odluka i sigurno upravljanje svojim putanjama.

Podvodni senzori pružaju izravnu procjenu stanja morskog dna u stvarnom vremenu. Korištenjem dubinomjera i sonara, autonomni brodovi dobivaju precizne informacije o dubini vode i drugim značajkama podvodnog prostora. Sonari omogućuju stvaranje slike podvodnog prostora ispred sebe, što je ključno za sigurno i precizno upravljanje. Ultrazvučni dubinomjeri postali su standardna oprema na većini plovila, omogućujući precizno određivanje dubine mora ispod plovila. Senzori brzine također su važni za mjerenje brzine plovila kroz vodu, koristeći različite tehnologije poput elektromagnetskih brzinomjera i Doppler logova. Analiza podataka

dobivenih kamerama također je važna za autonomne brodove, omogućujući praćenje okoline u stvarnom vremenu. Spajanje podataka od različitih senzora i primjena složenih algoritama za analizu slike ključni su koraci u optimizaciji autonomnog upravljanja brodom.

Operacije veza i odveza predstavljaju izazov za autonomne brodove, zahtijevajući precizno upravljanje brodom u ograničenim područjima s čestim gužvama. Arhitektura sustava za autonomno usidranje obuhvaća različite aspekte kao što su planiranje putanje, optimalna kontrola, raspodjela snage i druge parametre potrebne za inteligentno upravljanje brodom.

Pravila za izbjegavanje sudara na moru (COLREG) igraju ključnu ulogu u sigurnosti autonomnih brodova, no prilagodba ovih pravila za autonomne sustave predstavlja izazov. Potrebno je daljnje istraživanje kako bi se osigurala usklađenost autonomnih brodova s postojećim pomorskim pravilima i unaprijedila sigurnost plovidbe.

Kibernetički napadi predstavljaju ozbiljnu prijetnju autonomnim brodovima, uključujući ometanje senzora, manipulaciju podacima, napade na IT i OT sustave te napade na umjetnu inteligenciju. Zaštita od kibernetičkih napada zahtijeva implementaciju sigurnosnih protokola i tehnologija kako bi se osiguralo integritet sustava i podataka.

LITERATURA

1. *H2H - leveraging EGNSS for safer maritime navigation*, Euspa.europa.eu, 2018. <https://www.euspa.europa.eu/newsroom/news/h2h-leveraging-egnss-safer-maritime-navigation>. (Pristupljeno: 19.1.2024.)
2. *Autonomous shipping*, International Maritime Organization, 2023. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>. (Pristupljeno: 18.1.2024.)
3. Pomorski zakonik 181/04, 76/07, 146/08, 61/11, 56/13, 26/15, 17/19, *Narodne novine*, Zagreb.
4. *Inmarsat partners with Rolls-Royce on autonomous ship project*, Inmarsat.com, 2015. <https://www.inmarsat.com/en/news/latest-news/maritime/2015/inmarsat-partners-with-rolls-royce-on-autonomous-ship-project.html>. (Pristupljeno: 17.1.2024.)
5. *Hronn Autonomous Offshore Support Vessel*, Ship Technology.com, 2017. <https://www.ship-technology.com/projects/hronn-autonomous-offshore-support-vessel/>. (Pristupljeno: 17.1.2024.)
6. MV Yara Birkeland, Yara.com, 2023. <https://www.yara.com/news-and-media/media-library/press-kits/yara-birkeland-press-kit/>. (Pristupljeno: 17.1.2024.)
7. YARA and KONGSBERG enter into partnership to build world's first autonomous and zero emissions ship, Kongsberg, 2017. <https://www.kongsberg.com/maritime/about-us/news-and-media/news-archive/2017/yara-and-kongsberg-enter-into-partnership-to-build-worlds-first-autonomous-and/>. (Pristupljeno: 23.1.2024.)
8. T. S. Pribyl i M. A. Weigel, 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)*, pp. 17-25, 2018.
9. *IMO takes first steps to address autonomous ships*, International Maritime Organization, 2018. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/08-MS-C-99-MASS-scoping.aspx>. (Pristupljeno: 17.1.2024.)
10. N. Tesla, *Method of and apparatus for controlling mechanism of moving vessels or vehicle*, US patent 613809A, 1898.
11. *The Autonomous Ship*, Munin.org, 2021. <https://www.unmanned-ship.org/munin/about/the-autonomus-ship/>. (Pristupljeno: 19.1.2024.)

12. *Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks*, Cordis.europa.eu, 2012. <https://cordis.europa.eu/project/id/314286>. (Pristupljeno: 22.1.2024.)
13. *Autonomous ships - The next step, Ships Intelligence Marine*, 2016.
14. *Rolls-Royce and Finferries demonstrate world's first Fully Autonomous Ferry*, Rolls Royce, 2018. <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2018/03-12-2018-rr-and-finferries-demonstrate-worlds-first-fully-autonomous-ferry.aspx>. (Pristupljeno: 24.1.2024.)
15. *Safer Vessel with Autonomous Navigation SVAN: World's first fully autonomous ferry demonstration*, Rolls Royce, 2018. <https://breakingwaves.fi/wp-content/uploads/2019/06/SVAN-presentation.pdf>. (Pristupljeno: 16.1.2024.)
16. A. Felski i K. Zwolak, *The Ocean-Going Autonomous Ship - Challenges and Threats*, Polish Naval Academy, 2020.
17. *Automated Ships Ltd and KONGSBERG to build first unmanned and fully autonomous ship for offshore operations*, Kongsberg, 2016. <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: 18.1.2024.)
18. *Definition for Autonomous Merchant Ships*, NFAS, Oslo, 2017.
19. I. Kurt i M. Aymelek, Operational and economic advantages of autonomous ships and their perceived impact on port operations, *Maritime Economics and Logistics*, br. 24, 2022.
20. *NI641 Guidelines for autonomous shipping*, Bureau Veritas, 2019. <https://marine-offshore.bureauveritas.com/ni641-guidelines-autonomous-shipping>. (Pristupljeno: 18.1.2024.)
21. *LR Code for Unmanned Marine Systems*, Lloyd's Register, London, 2017.
22. T. B. Sheridan, *Telebotics, Automation and Human Supervisory Control*, The MIT Press, 1992.
23. A. Yastrebova, M. Hoyhtya, S. Boumard i A. Ometov, *Comparative Study on GNSS Positioning Systems for Autonomous Vessels in the Arctic Region*, Oulu: Tampere University, 2020.
24. J. G. Grimes, *Global Positioning System Standard*, Department of Defense, Global Positioning System, 2008.

25. R. Wu, W. Wang, D. Lu, L. Wang i Q. Jia, Principles of Satellite Navigation System, *Adaptive Interference Mitigation in GNSS*, Springer, 2018, pp. 1-29.
26. A. Loria, T. I. Fossen i E. Panteley, A Separation Principle for Dynamic Positioning of Ships: Theoretical and Experimental Results, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2000, pp. 332-343.
27. H. Zheng, J. Wu, W. Wu i Y. Zhang, Robust Dynamic Positioning of Autonomous Surface Vessels with Tube-based Model Predictive Control, *Ocean Engineering*, br. 199, 2020.
28. T. Gracin, *Differential GPS*, Zagreb: Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2006.
29. N. Kuter i S. Kuter, »Accuracy comparison between GPS and DGPS: A field study at METU campus,« *Italian Journal of Remote Sensing*, svez. 42, br. 3, pp. 3-14, 2010.
30. T. Kos, S. Grgić i S. Krile, Poboljšanje sustava satelitske navigacije, *Naše more*, svez. 52, br. 1-2, pp. 57-63.
31. *GNSS Augmentation*, Gssc.esa.int, 2011. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Augmentation. (Pristupljeno: 18.1.2024.)
32. Towards the digital transformation, Introduction our technologies, 2023. <https://www.furuno.com/en/marine-dx/autonomous/>. (Pristupljeno: 18.2.2024.)
33. *Millimeter Wave Marine Radar*, ELVA-1, 2023. https://elva-1.com/news_events/millimeter-wave-marine-radar-for-drone-boats-usv-and-asv. (Pristupljeno: 16.2.2024.)
34. *Autonomous Ships*, ILS, 2019. <https://www.ils.be/autonomous-ships/#:~:text=Think%20of%20sensors%20as%20the,objects%20and%20analyzing%20the%20reflections..> (Pristupljeno: 3.2.2024.)
35. *What is a FMCW Radar?*, everythingRF, 2022. <https://www.everythingrf.com/community/what-is-a-fmcw-radar>. (Pristupljeno: 26.2.2024.)
36. *Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar (FMCW Radar)*, RadarTutorial.eu, 2023. <https://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequency%20Modulated%20Continuous%20Wave%20Radar.en.html>. (Pristupljeno: 26.2.2024.)

37. *Solid State vs. Magnetron*, Garmin.com, 2024. <https://www.garmin.com/en-US/garmin-technology/marine-technology/radar/solid-state-vs-magnetron/>. (Pristupljeno: 26.2.2024.)
38. *Continuing Evolution of Radar Technology*, Furuno Technology, 2024. <https://www.furuno.com/en/technology/radar/solution/>. (Pristupljeno: 26.2.2024.)
39. V. GIurgiutiu, In Situ Phased Arrays with Piezoelectric Wafer Active Sensors, *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*, pp. 707-805, 2014.
40. Sensing solutions for assessing and monitoring railroad tracks, *Sensor Technology for Civil Infrastructures*, br. 56, pp. 669 - 699, 2014.
41. MIMO radar technology, InnoSenT, 2023. <https://radar-blog.innosent.de/en/mimo-radar-technology/>. (Pristupljeno: 26.2.2024.)
42. *MIMO Radar Systems*, Radar Tutorial.com, 2023. <https://www.radartutorial.eu/02.basics/MIMO-radar.en.html>. (Pristupljeno: 26.2.2024.)
43. I. Buzov, *Navigacijski senzori autonomnih brodova*, Split: Pomoski fakultet , 2020.
44. T. Porathe, Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) and the COLREGS: Do We Need Quantified Rules or is "the Ordinary Practice of Seamen" Specific Enough?, *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, svez. 13, br. 3, pp. 511-518, 2019.
45. M. Issa, A. Ilinca, H. Ibrahim i P. Rizk, Maritime Autonomous Surface Ships: Problems and Challenges Facing the Regulatory Process, *Sustainability*, svez. 14, br. 30, pp. 1-13, 2022.
46. M. Casey, *The future of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) Navigation*, London: UKHO, 2020.
47. R. K. Marjanović, Žiroskopi za orijentaciju i inercijalni navigacijski sustavi, *Kartografija i geoinformacije*, 255-271, 2007.
48. J. Webster i H. Eren, *Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, Baton Rouge: CRC Press, 2014.
49. A. Czaplewski i A. Weintrit, The identification of possible applications of the e-Loran system, *Annual of navigation*, br. 25, pp. 165-186, 2018.

50. P. Langevin, The Sagnac effect and its interpretation, *Comptes Rendus Physique*, svez. 18, br. 9-10, pp. 563-569, 2017.
51. T. Kos, S. Grgić i S. Krile, Hiperbolni i satelitski sustavi za navigaciju, *Naše more*, svez. 51, br. 5-6, pp. 189-199, 2004.
52. Enhanced Long-Range Navigation (eLORAN), Stanford Engineering, 2023. <https://gps.stanford.edu/research/early-gpsnt-research/enhanced-long-range-navigation-eloran>. (Pristupljeno: 18.2.2024.)
53. The use of CCTV camers on ships, Britannia P&I, London, 2019.
54. ViDAR for Uncrewed Systems, Sentinent Vision, 2024. <https://sentientvision.com/products/vidar-for-uas/>. (Pristupljeno: 15.2.2024.)
55. J. R. Ornulf, *Defining ship autonomy by characteristic factors*, Norway, 2018.
56. S. Thombre, Z. Zhao, H. Ramm-Schmidt i J. V. Garcia, Sensors and AI Techniques for Situational Awareness in Autonomous Ships, *IEEE Transaction on intelligent transportation systems*, svez. 23, br. 1, 2022.
57. P. B. Sullivan, D. Santanoo, S. Jordi, M. Rossi, L. Ramundo i S. Trezi, *Maritime 4.0 - Opportunities in Digitalization and Advanced Manufacturing for Vessel Development*, Italy, 2020.
58. *The International Hydrographic Review P - 1*, International Hydrographic Organization, Monaco, 2017.
59. *How is sound used to measure water depth?*, Discovery of Sound in the Sea, 2021. <https://dosits.org/people-and-sound/navigation/how-is-sound-used-to-measure-water-depth/>. (Pristupljeno: 13.2.2024.)
60. *Echo Sounder JFC-800/810*, Japan Radio Co. Ltd, 2023. https://www.jrc.co.jp/en/product/jfc800_810. (Pristupljeno: 17.2.2024.)
61. *An Introduction to Echosounding*, Honeywell ELAC.
62. *Marine instrumentation*, BEN Marine.
63. *Electromagnetic Speed Log on Ships*, Oways Online, 2019. <https://owaysonline.com/electromagnetic-speed-log-on-ships/>. (Pristupljeno: 16.2.2024.)
64. *Speed Log, Querin Ship Supply*, 2023. <https://www.querin-shipsupply.com/navigation/speed-log>. (Pristupljeno: 15.2.2024.)

65. H. X. Xu, M. F. Zhu i W. Z. Yu, Robust adaptive control for automatic berthing of intelligent ships, *Nat. Sci. Ed.*, br. 48, pp. 25-29, 2020.
66. B. Hu, X. Liu, Q. Jing, H. Lyu i Y. Yin, Estimation of berthing state of maritime autonomous surface ships based on 3D LiDAR, *Ocean Engineering*, br. 251, 2022.
67. Y. P. Jia, H. L. Shen, Y. Yin i X. F. Zhang, Simulation of autonomous berthing of unmanned ships based on neural network, *China Navig*, br. 44, pp. 107-111, 2021.
68. G. Chen, J. Yin i S. Yang, Ship Autonomous Berthing Simulation Based on Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy, *J. Mar. Sci. Eng.*, svez. 11, br. 7, pp. 1400-1422, 2023.
69. M. Perkovic, M. Gucma, B. Luin, L. Gucma i T. Brdsko, Accommodating larger container vessels using an integrated laser system for approach and berthing, *Microprocessors and Microsystems*, br. 52, pp. 106-116, 2017.
70. A. B. Martinsen, I. G. Bitar, M. A. Lekkas i S. Gros, Optimization-Based Automatic Docking and Berthing of ASVs Using Exteroceptive Sensors: Theory and Experiments, *IEEE Access*, br. 8, 2020.
71. C. Allen, Determining the Legal Status of Unmanned Maritime Vehicles: Formalism vs Functionalism, *SSRN Electronic Journal*, svez. 49, br. 4, pp. 17-20, 2018.
72. M. R. Benjamin i J. A. Curcio, COLREGS-based Navigation of Autonomous Marine Vehicles, *2004 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles*, pp. 32-39, 2004.
73. K. Woerner, *COLREGS-compliant Autonomous Collision Avoidance Using Multiobjective Optimization with Interval Programming*, Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2014.
74. M. Mudrić i F. Ferreira, Autonomous Surface Vessel and COLREGs: Considering the Amendments, *PPP*, svez. 61, br. 176, pp. 323-361, 2022.
75. T. Porathe, Safety of Autonomous Shipping: COLREGS and Interaction between Manned and Unmanned Ships, *European Safety and Reliability Conference*, Singapore, 2019.
76. S. Cho, E. Orye, G. Visky i V. Prates, *Cybersecurity Considerations in Autonomous Ships*, Tallinn: NATO Cooperative Cyber Defence Centre of Excellence, 2022.
77. J. Yoo i Y. Jo, Formulating Cybersecurity Requirements for Autonomous Ships Using the SQUARE Methodology, *Sensors*, svez. 23, br. 11, 2023.
78. Grover, Jamming and Anti-jamming Techniques in Wireless Networks: A Survey.

79. A. Amick, *The Shadowy World of Submarine and Ship-Launched Torpedo Countermeasures*, The Drive, 2020. <https://www.thedrive.com/the-war-zone/33467/the-shadowy-world-of-submarine-and-ship-launched-torpedo-countermeasures-an-explainer>. (Pristupljeno: 22.2.2024.)
80. *How Radar Jamming & Deception Changed Warfare FOREVER*, Biley Technologies, 2018. <https://blog.bliley.com/radar-jamming-deception-electronic-warfare>. (Pristupljeno: 21.2.2024.)
81. M. Balduzzi, K. Wilhoit i A. Pasta, *A Security Evaluation of AIS*, Trend Micro, 2014. <https://www.trendmicro.de/cloud-content/us/pdfs/security-intelligence/white-papers/wp-a-security-evaluation-of-ais.pdf>. (Pristupljeno: 21.2.2024.)
82. B. R. Wilkins, Common Misconceptions About Radio Waves, Radio Frequency and Wireless Communication, *ISACA Newsletters*, br. 22, 2019.
83. J. Andersson, *Attacking DSMx with Software Defined Radio (Presentation Slides)*, PacSec, 2016. https://pacsec.jp/psj16/PSJ2016_Andersson_Hacking_DSMx_with_SDR_PacSec_2016_English.pdf. (Pristupljeno: 22.2.2024.)
84. *Recommended Practice: Improving Industrial Control System Cybersecurity with Defense-in-Depth Strategies*, U.S. Department of Homeland Security, 2016. https://us-cert.cisa.gov/sites/default/files/recommended_practices/NCCIC_ICS-CERT_Defense_in_Depth_2016_S508C.pdf. (Pristupljeno: 22.2.2024.)
85. *Protecting Industrial Control Systems*, European Union Agency for Cybersecurity, 2011. <https://www.enisa.europa.eu/publications/protecting-industrial-control-systems.-recommendations-for-europe-and-member-states>. (Pristupljeno: 22.2.2024.)
86. *ML Supply Chain Compromise*, Atlas Mitre, 2023. <https://atlas.mitre.org/techniques/AML.T0010/>. (Pristupljeno: 22.2.2024.)
87. Port Cybersecurity - Good Practices for Cybersecurity in the Maritime Sector, European Union Agency for Cybersecurity.
88. L. Wang, Q. Wu, L. S. L. Jialun i R. Negenborn, *State-of-the-Art Research on Motion Control of Maritime Autonomous Surface Ships*, China, 2019.
89. R. Wright, Intelligent Autonomous Ship Navigation using Multi-Senso Modalities, *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, br. 13, pp. 503-510, 2019.

90. K. Czaplewski i A. Weinrit, The identification of possible applications of the e-Loran system, *Annual of navigation*, br. 25, pp. 165-186, 2018.
91. *Situational Awareness for an autonomous inland vessel*, AUTOBarge, 2022.
<https://etn-autobarge.eu/blog/situational-awareness-for-an-autonomous-inland-vessel/>. (Pristupljeno: 14.2.2024.)

POPIS SLIKA

Slika 1. Yara Birkeland.....	2
Slika 2. Koncept autonomnog navigacijskog sustava brodova.....	8
Slika 3. GNSS.....	10
Slika 4. E-band radar.....	13
Slika 5. RADAR i LiDAR fuzija.....	16
Slika 6. OPAL 3D LiDAR.....	17
Slika 7. Princip rada eLORAN-a.....	20
Slika 9. Ultrazvučni dubinomjer.....	23