

E - Loran

Grahovac, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:954255>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-04**



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

Repository / Repozitorij:

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



uniri DIGITALNA
KNJIŽNICA



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

MARIN GRAHOVAC

**E-LORAN
ZAVRŠNI RAD**

Rijeka, 2023.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

E-LORAN
ZAVRŠNI RAD

Kolegij: Elektronička navigacija

Mentor: izv. prof. dr. sc. David Brčić

Student: Marin Grahovac

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112055156

Rijeka, svibanj 2023.

Student: Marin Grahovac

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112055156

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom E-LORAN izradio samostalno pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Davida Brčića.

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

Student



Marin Grahovac

Student: Marin Grahovac

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112055156

IZJAVA STUDENTA – AUTORA O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG
RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta. U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima Creative Commons licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student - autor



SAŽETAK

Kako se elektronička navigacija razvijala kroz radio i radarsku navigaciju, novi način određivanja položaja našao se u hiperboličkoj navigaciji. Hiperbolička navigacija koristi krivulje zvane hiperbole koje spajaju mjesta jednake udaljenosti od žarišta kako bi se u njihovom presjecištu pronašla pozicija broda. Kroz povijest su se razvijali razni hiperbolički uređaji kao što su Consol, Decca, Gee, Loran-A, Loran-C, Chayka te kao napredna verzija Loran-C sustava, E-Loran. Satelitska navigacija je uslijedila nakon hiperboličkih sustava. Prvi satelitski sustavi funkcionirali su na temelju Dopplerovog efekta te je njihova primjena bila isključivo predviđena za vojne usluge. Globalni sustav za određivanje položaja (GPS) je od 2007. godine potpuno funkcionalan i dostupan čak i za civilnu upotrebu. GPS usprkos činjenici da je najsofisticiraniji sustav za pronalazak položaja na zemlji posjeduje određene mane koje znaju uzrokovati razne probleme. Osim što se ti problemi očituju izravno na korisnika već i neizravno stvaraju probleme za ekonomiju i gospodarstvo. E-Loran kao glavna tema ovoga rada se u nekoliko navrata u zadnjih 20 godina nudio kao rješenje upravo u trenucima kada oslanjanje na GPS nije moguće. Trenutna alternativa za GPS ne postoji, a pomutnje zbog interferencije i dalje ostaju problematika. Svojstva e-Loran signala upućuju na potrebu da se provedu testiranja, jer snažni i teško ometajući signali mogu biti jako dobra zamjena kada je to neophodno. Kako je to sustav koji je korišten još 1940-ih pod nazivom Loran-A i kasnije Loran-C uz sav napredak tehnologije koji je do sada postignut nova nadograđena verzija može biti preciznija i pouzdanija. Kako se satelitska navigacija počela sve više razvijati praksa korištenja hiperboličke navigacije počela se manje koristiti. Upravo to je razlog zbog kojeg nije iskorišten puni potencijal hiperboličkih uređaja i zahtjeva provedbu dodatnih istraživanja.

Ključne riječi: *hiperbolički navigacijski sustavi; e-navigacija; e-Loran sustav; eD-Loran*

SUMMARY

How electronic navigation developed through radio and radar navigation, a new way of determining position was found in hyperbolic navigation. Hyperbolic navigation uses curves called hyperbolas that connect places of equal distance from the focal points to find the position of a ship at their intersection. Various hyperbolic devices were developed throughout history, such as Consol, Decca, Gee, Loran-A, Loran-C, Chayka, and an advanced version of the Loran-C system, E-Loran. Satellite navigation followed the hyperbolic systems. The first satellite systems were based on the Doppler effect and were intended exclusively for military use. Global Positioning System (GPS) has been fully functional since 2007 and available even for civilian use. Despite being the most sophisticated system for locating positions on Earth, GPS has certain drawbacks that can cause various problems. In addition to the problems that directly affect the user, they also indirectly create problems for the economy. E-Loran, the main topic of this paper, has been offered several times in the last 20 years as a solution precisely when relying on GPS is not possible. Currently, there is no alternative to GPS, and interference disruptions continue to be problematic. The properties of the E-Loran signal suggest the need for testing because strong and highly interfering signals can be a very good replacement when necessary. As a system that was used as early as the 1940s under the name Loran-A and later Loran-C, with all the technological advancements achieved so far, a new upgraded version can be more precise and reliable. As satellite navigation began to develop more and more, the practice of using hyperbolic navigation began to decline. This is precisely why the full potential of hyperbolic devices has not been exploited and requires additional research.

Keywords: *hyperbolic navigation systems; e-navigation; e-Loran system; eD-Loran*

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. HIPERBOLIČKA NAVIGACIJA	3
2.1. ULOGA HIPERBOLE.....	3
2.2. ODREĐIVANJE POLOŽAJA BRODA HIPERBOLIČKOM NAVIGACIJOM ..	5
2.3. HIPERBOLIČKI NAVIGACIJSKI SUSTAVI.....	7
3. E-LORAN SUSTAV	14
3.1. RAZVOJ, INFRASTRUKTURA I TRENUTNO STANJE	17
3.2. FUNKCIJE E-LORAN SUSTAVA	21
3.3. UTJECAJ OMETANJA NA SATELITSKE NAVIGACIJSKE SUSTAVE	31
3.4. E-LORAN KAO RJEŠENJE	36
4. PRIMJENA E-LORAN SUSTAVA	38
4.1. KONCEPT E-NAVIGACIJE	38
4.2. UPOTREBA E-LORAN SUSTAVA	42
4.3. UPOTREBA KAO PODRŠKA GNSS SUSTAVIMA	45
4.4. NOVE VERZIJE I NADOGRAĐNJA	47
5. ZAKLJUČAK.....	51
POPIS LITERATURE	52
POPIS KRATICA.....	56
POPIS ILUSTRACIJA	57

1. UVOD

Pomorska navigacija razvila se od navigacije temeljene mjerenjem položaja pomoću zvijezda do praćenja položaja brodova pomoću satelita. Kroz povijest, pomorci su koristili pomorske navigacijske alate za određivanje brzine, položaja i smjera putovanja. Dok su ti alati u početku bili primitivni, kasniji napredak u matematici i znanosti doveo je do razvoja sofisticiranijih navigacijskih alata koji su uvelike proširili mogućnosti putovanja morem. Do početka 20. stoljeća navigacija na moru postala je precizna i sustavna. Također, metode navigacije nastavile su se razvijati, proizvedeći brzi napredak u navigacijskoj tehnologiji sve dok nije stvoren globalni sustav za određivanje položaja (engl. *Global Positioning System* - GPS). Uspostavom GPS sustava razvija se globalni navigacijski satelitski sustav (engl. *Global Navigation Satellite System* – GNSS) koji radikalno mijenja pomorsku navigaciju, čime sustav postaje glavni izvor informacija o položaju i vremenu. Paralelno s razvojem hiperboličkih navigacijskih sustava razvio se i Loran sustav navigacije dalekog dometa (eng. *Long Range Navigation*), u svrhu poboljšanja dometa signala prijarnika te njegove točnosti. Loran sustav razvio se u nekoliko verzija od kojih je Loran-C pružala visokofrekventne signale.

Nakon naznaka potencijalne ranjivosti globalnog navigacijskog satelitskog sustava i otkrivanja ograničenja globalnog sustava za određivanje položaja javlja se potreba za razvojem navigacijskog sustava koji će biti alternativa sustavu GNSS. Pojavom ponovnog interesa za navigacijom dalekog dometa javlja se nova međunarodno standardizirana usluga pozicioniranja, navigacije i mjerenja vremena koherentna globalnom navigacijskom satelitskom sustavu nazvana e-Loran sustav. Navigacijski sustav e-Loran poboljšan je u smislu složenosti opreme, sofisticiranosti i raznolikosti u usporedbi sa sustavom kao što je bio Loran-C. Neosporni problem ostaje potreba većeg broja ispitivanja e-Loran sustava kako bi se utvrdila njegova pouzdanost u ulozi potpore GPS sustavu. Stoga se javlja potreba za kombinacijom ili samostalnim sustavom kako bi se osigurala unakrsna provjera i zadovoljili različiti zahtjevi za preciznošću, pouzdanošću i drugim značajnim čimbenicima.

Cilj ovog rada je dati uvid u značajke i rad navigacijskog sustava e-Loran kao i njegov dosadašnji razvoj te smjernice njegovog budućeg razvoja. Kroz rad se nastoji prikazati funkcije sustava i njegovu preciznost u određivanju položaja a tako i njegovu

integraciju s postojećim navigacijskim sustavima. Svrha rada je prikazati značaj e-Loran sustava, njegove primjene i svrhe u pomorstvu. U radu su korištene induktivna i deduktivna metoda istraživanja, metoda analize i sinteze. Pored navedenih korištene su i metoda klasifikacije i deskripcije te matematičke metode.

Pored uvoda i zaključka rad se sastoji od tri međusobno povezana dijela. Drugi dio rada bavi se problematikom hiperboličke navigacije, odnosno značaja hiperboličkih navigacijski sustava. Prikazana je uloga hiperbole te način određivanja položaja broda hiperboličkom navigacijom. Pored navedenog, prikazani su i opisani hiperbolički navigacijski sustavi. Sustav e-Loran detaljno je prikazan i opisan u trećem dijelu rada. Prije svega, daje se osvrt u razvoj, infrastrukturu i trenutno stanje sustava. Nakon pregleda sustava, opisane su njegove osnovne funkcije kao i funkcije Loran podatkovnog prometa. Nadalje, opisane su prednosti i nedostaci sustava, značaj i uloga glavne stanice te princip određivanja položaja e-Loran sustavom. U trećem dijelu raspravlja se o problematici ometanja GPS signala, posljedicama takvog ometanja na posadu te pojedinostima kojima e-Loran donosi sigurnost kao alternativa GPS sustavu. Mala količina ometanja, koja može biti uzrokovana namjernim ili ne namjernim izvorom dovoljna je da stvori pomutnju pa čak i ekonomske gubitke. Upravno se zbog tih razloga e-Loran nameće kao rješenje zbog nisko frekventnih, snažnih i dalekometnih signala koje je jako teško ometati. Četvrtim dijelom daje se uvid u primjenu e-Loran sustava s posebnim naglaskom na primjenu u pomorstvu. Prije svega, razmatra se značaj pojave e-navigacije i njena uloga u pomorstvu i određivanju položaja brodova. Prikazana je i objašnjena upotreba e-Loran sustava. U ovom dijelu detaljnije je opisana integracija e-Loran sustava s postojećim GPS sustavom kao njegova podrška. Pored navedenog dan je prikaz nove verzije sustava e-Loran sustava i njegove nadogradnje.

2. HIPERBOLIČKA NAVIGACIJA

U prošlosti je navigacija bila vođena uz pomoć raznih metoda za određivanje položaja kao što su opažanja nebeskih tijela. U obalnim područjima plovidba se temeljila na osmatranju obalne crte i objekata poznatog položaja na kopnu. Važan pomak u ovom području dogodio se početkom 20. stoljeća kada se za određivanje trenutne lokacije objekata počela koristiti radiotehnologija čime je stvoreno novo područje znanja i tehnologije, nazvano radionavigacijom. Sljedeći korak u razvoju radionavigacije bio je razvoj hiperboličkih sustava. Međutim, u drugoj polovici prošlog stoljeća, sa satelitskom tehnologijom započela je era radiolokacije objekata na temelju radijskih signala odašiljanih sa satelita i potom primljenih u korisničkom terminalu. Time započinje veliki napredak u radionavigaciji, i dolazi do omogućavanja univerzalnog pristupa radiolokacijskoj službi. Trenutno, najrasprostranjeniji satelitski radionavigacijski sustav je američki GPS.¹

Hiperbolički navigacijski sustav je sustav u kojem dvije odašiljačke stanice odašilju određene vrste radio valova, prema naznačenom vremenskom slijedu, i u kojem korisnik sustava pronalazi svoj položaj mjereći razliku u udaljenosti između sebe i dviju odašiljačkih stanica. Teorija koja stoji iza rada hiperboličkih radionavigacijskih sustava bila je poznata kasnih 1930-ih, no tek tijekom Drugog svjetskog rata ubrzao se razvoj sustava u praktičnu upotrebu. Do početka 1942. godine Britanci su imali operativni hiperbolički sustav u upotrebi dizajniran za pomoć u navigaciji, dok je do 1943. godine obalna straža SAD upravljala lancem hiperboličkih navigacijskih odašiljača koji su postali dio sustava Loran-A. Kasnih 1940-ih i ranih 1950-ih, eksperimenti s niskom frekvencijom Loran sustava proizveli su točniji sustav većeg dometa koji se razvio u radionavigacijski sustav Loran-C.²U ovom dijelu rada prije svega objašnjena je uloga hiperbole i značaj hiperboličke navigacije za određivanje položaja broda.

2.1. ULOGA HIPERBOLE

Položaj broda se dobije iz presjecišta dvaju ili više linija pozicija koje se nazivaju stajnice. Na poziciju dobivenu pomoću dvije stajnice ne može se sa sigurnošću osloniti te se zbog toga određuje treća kontrolna stajnica. Stajnice mogu biti: pravci, kružnice, nepravilna

¹Katulski, R.J., Sadowski, J., Stefanski, J., Siwicki, W.: **Hyperbolic Asynchronous Method of a Radio Navigation Technique**, Applied Science, Vol. 10., 2020., p.1-2

²Bowditch, N.: **The American Practical Navigator: An Epitome of Navigation**, DMAHT Center, 1995., p.189

krivulja i hiperbole. Pravac je linija koja spaja brod s određenim markantnim objektom pomoću smjerne ploče, kompasa ili drugih navigacijskih uređaja. Kružnica kao stajnica dobiva se mjerenjem udaljenosti, vertikalnog ili horizontalnog kuta ili visine nebeskog tijela. Udaljenost se mjeri sredstvima za mjerenje udaljenosti, a vertikalni i horizontalni kut sekstantom. Rezultat bilo kojeg od ovih mjerenja daje stajnicu u obliku kružnice.³

Krivulje koje povezuju mjesta iste dubine zovu se izobate, ucrtane su na pomorskim kartama i mogu se koristiti kao stajnice. Izmjerena dubina dubinomjerom s broda reducira se na razinu karte koja se u navigaciji može koristiti samo kao pomoćna metoda. Određivanje stajnice mjerenjem dubine najčešće se primjenjuje za provjeru već određene pozicije, ali i u uvjetima slabe vidljivosti kada je nemoguće promatrati obalne objekte, što je ponekad i jedini način da se odredi pozicija broda. Naime; nije moguće odrediti točnu stajnicu bez pogreške, iz razloga što se pogreške javljaju uslijed niza uzroka u koje spadaju nesavršenost nautičkih instrumenata, ljudskog oka (subjektivne greške čovjeka), pogrešaka koje se javljaju uslijed valjanja i posrtanja broda, meteoroloških prilika u atmosferi i sl.⁴

Hiperbola kao stajnica dobiva se iz razlika vremena (impulsni hiperbolički navigacijski sustavi), fazne razlike (fazni hiperbolički navigacijski sustavi) ili razlike u vremenu i fazi (impulsno-fazni hiperbolički sustavi) istovremeno odašiljanih signala sinkroniziranih s dvije ili više obalnih stanica. Hiperbola je geometrijsko mjesto točaka u ravnini koje imaju jednaku razliku udaljenosti između dva izvora⁵. Bolje rečeno, značajka neke točke na hiperboli je razlika udaljenosti od dvaju žarišta, a to je zapravo konstanta.

Svi hiperbolički sustavi za određivanje položaja definiraju hiperbolu kao stajnicu mjerenjem razlike u vremenu prijenosa između signala koji se prenose istovremeno ili s fiksnim kašnjenjem kroz dvije fiksne postaje koje predstavljaju žarišta hiperbole. Za generiranje popravka moraju se generirati dvije stajnice i potrebna je treća stanica, koja služi kao glavna za svaku od dvije podređene stanice. Pogreška vremenske razlike čini liniju stvarne pozicije neodređenom između dvije susjedne linije pozicije. Ta se udaljenost naziva širinom trake i odgovara polovici valne duljine odašiljane frekvencije. Koristi se impulsni ili kontinuirani prijenos valova, dok neki sustavi koriste kombinaciju navedenih

³Benković, F. et.al.: **Terestrička i elektronska navigacija**, Hidrografski Institut Ratne Mornarice, Split, 1986., p.687

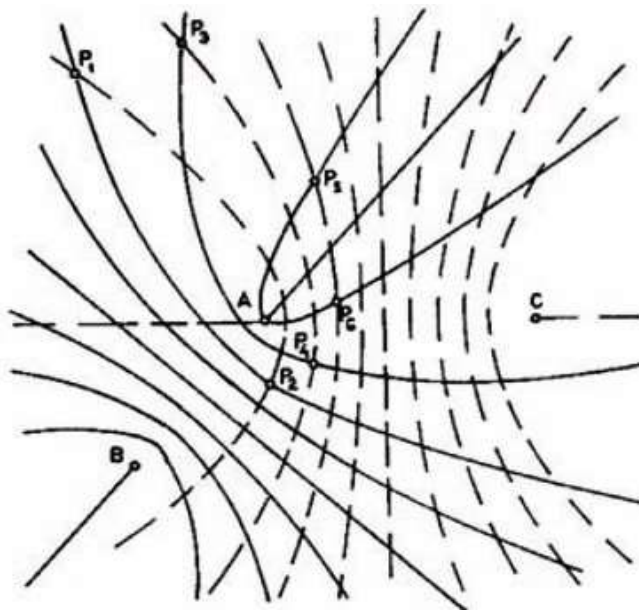
⁴Kos, S.: **Terestrička navigacija – geometrijske osnove položaja broda**, skripte sa predavanja

⁵Benković, F. et.al.: **Terestrička i elektronska navigacija**, Hidrografski Institut Ratne Mornarice, Split, 1986., p.

prijenosa.⁶ Hiperboličkom navigacijom može se odrediti precizan položaj objekta, i kao takva ima značajnu ulogu u određivanju pozicije broda što je detaljnije pojašnjeno u sljedećem potpoglavlju.

2.2. ODREĐIVANJE POLOŽAJA BRODA HIPERBOLIČKOM NAVIGACIJOM

Jedan od osnovnih pojmova za određivanje položaja u hiperboličkoj navigaciji je multilateracija. Multilateracija je tehnika mjerenja; osnovni način funkcioniranja hiperboličkih sustava uz pomoć udaljenosti poznatih stanica (fiksni) koje odašilju signal u poznato vrijeme radi pronalaska njihove međusobne razlike u udaljenosti. Ono što je drugačije kod mjerenja udaljenosti između dvaju odašiljača u odnosu na apsolutnu udaljenost ili kutove je beskonačni broj položaja koji zadovoljavaju mjerenje. Upravo ti položaji kreiraju hiperbolu nakon što ih se ucrtaju. Slika 1. prikazuje hiperbolni lanac.



Slika 1. Hiperbolni lanac

Izvor: Lušić, Z., Kos, S., Krile, S.: **Strukturna analiza metoda pozicioniranja na moru**, Naše more: znanstveni časopis za more i pomorstvo, Vol. 55, No. 1-2, 2008., p.7

⁶Benković, F. et.al., op.cit., p.692

Za proračun hiperbole potrebni su prijammnik za proračun razlike vremena dolaska signala te dvije odašiljačke radiopostaje. Razlika vremena dvaju signala odredit će se u razliku udaljenosti za što će biti potrebna brzina signala koja je jednaka brzini svjetlosti. Prijammnik pri tome proračunava razliku udaljenosti između pomoćne i glavne radiopostaje. Vrijeme odašiljanja glavne i pomoćne radiopostaje mora biti sinkronizirano kako bi se uklonila dvoznačnost mjerenja, zbog simetrične funkcije kakva je hiperbola (posjeduje dvije grane). Pomoćna stanica mora imati određen vremenski pomak kako bi kasnila s odašiljanjem u odnosu na glavnu, čime se uklanja dvoznačnost. Međutim, prijammnik s njima nije usklađen odnosno sinkroniziran jer bi potreba za usklađenošću povisila cijenu sustava. Formula za izračun razlike udaljenosti je sljedeća (1):⁷

$$\Delta d = d_1 - d_2 = (t - t_1) \cdot c - (t - t_2) \cdot c \quad (1)$$

Gdje je:

d_1 i d_2 - udaljenosti od fokusa do točke hiperbole

t - vrijeme

c - brzina svjetlosti

Određenoj razlici udaljenosti od radiopostaja pripada neka hiperbola, to jest samo ona grana hiperbole bliža predajnoj postaji od koje je signal prije primljen. Za određivanje pozicije, potrebne su barem dvije hiperbole s dva para stanica, pozicioniranim tako da tvore povoljne kutove. U praksi se to naziva lanac (engl. *Loran chain*) kojeg tvore glavna i dvije pomoćne stanice odnosno više njih. Postaje lanca raspoređene su tako da omogućuju pozicioniranje uz pomoć samo tog lanca, što ne znači da se, po potrebi, ne može koristiti postajama drugih lanaca istog sustava. Dvije se hiperbole mogu sjeći na dva mjesta, no izbor točne pozicije se lako odabire jer je međusobna udaljenost između njih velika. Uz pomoć zbrojene pozicije (koja se u praksi kontinuirano provodi) usporedit će se koja je od dobivenih pozicija bliže njoj. U slučaju nejasnoća, problem se rješava uspoređivanjem promjene položaja stajnica s promjenom kursa.⁸

⁷Lušić, Z., Kos, S., Krile, S.: **Strukturalna analiza metoda pozicioniranja na moru**, Naše more: znanstveni časopis za more i pomorstvo, Vol. 55, No. 1-2, 2008., p.7

⁸Ibidem

S obzirom na način rada, postoje razni hiperbolički navigacijski sustavi:⁹

- impulsni - mjere razliku vremena prijama dvaju impulsa (npr. Loran-A),
- fazni - mjere razliku u fazi prijama signala (npr. Decca),
- azimutni - mjere smjer na radiopredajnik (npr. Consol),
- frekvencijski - mjere razliku u frekvenciji primljenih signala (npr. Transit),
- kombinirani - najčešće impulsno-fazni (npr. Loran-C).

Postoje i kružni navigacijski sustavi koji rade na principu poznavanja apsolutnog vremena predaje i prijama s čime se proračunava udaljenost. Bitna je sinkronizacija između prijavnika i predajnika što je financijski zahtjevno. GPS sustav radi slično principu rada kružnog navigacijskih sustava. Naime, GPS sateliti gibaju se u približno kružnim orbitama oko Zemlje kojega prate 24 satelita raspoređena u 6 orbitalnih ravnina s po 4 satelita u svakoj. Sateliti emitiraju radiosignale s pomoću kojih se mogu mjeriti udaljenosti između satelita i prijavnika. Uz odašiljač na satelitu se nalaze precizni atomski satovi, računalo i druga oprema prijeko potrebna za rad. GPS sustav se nadzire s pomoću sustava zemaljskih stanica raspoređenih po cijeloj Zemlji te sadrži glavnu kontrolnu postaju, nadzorne opažачke stanice i zemaljske kontrolne stanice. Glavna kontrolna postaja je u Colorado Springsu te sakuplja podatke nadzornih stanica i računa precizne orbitalne modele satelita, te prosljeđuje te podatke zemaljskim stanicama za slanje korekcija prema satelitima. Kontrolne stanice raspoređene su po čitavoj zemaljskoj kugli u blizini ekvatora, uz ukupno 5 opažачkih stanica. Zemaljske kontrolne stanice odašilju poruke satelitima s podacima o efemeridama i o korekcijama vremena izračunatim u glavnoj kontrolnoj postaji.¹⁰ Sljedećim potpoglavljem rada daje se uvid u hiperboličke navigacijske sustave korištene u pomorstvu.

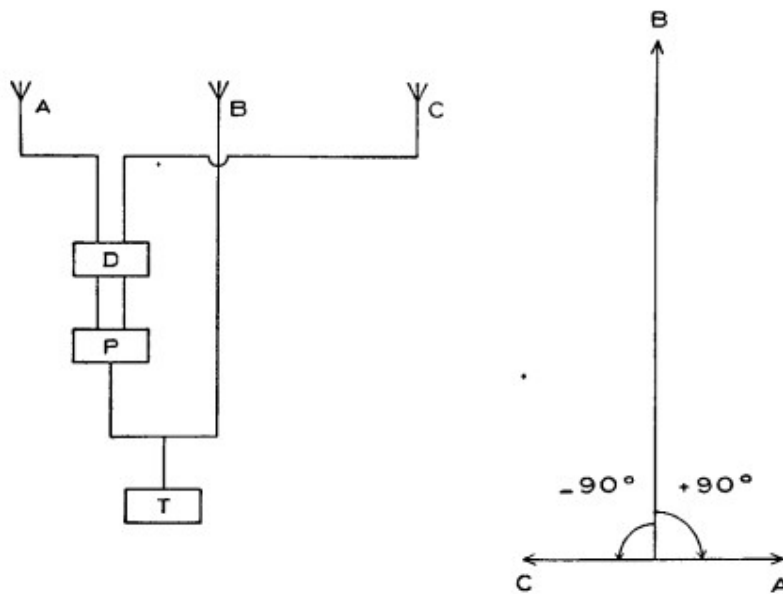
2.3. HIPERBOLIČKI NAVIGACIJSKI SUSTAVI

Consol sustav je prvi sustav hiperboličke navigacije primijenjen u pomorstvu. Bio je pogodan zato što se mogao primjenjivati i na velikim udaljenostima od prijavnika. Druga prednost mu je bila u tome što su se njime mogli služiti brodovi opskrbljeni običnim radioprijamnikom srednje frekvencije (200-300 kHz) uz uporabu consol-karata ili tablica.

⁹Lušić, Z., Kos, S., Krile, S., op.cit, p.10

¹⁰Kos, T., Grgić, M., Krile, S.: **Hiperbolni i satelitski sustavi za navigaciju**, Naše more, Vol. 51, No. 5-6., 2004, p. 193

Consol je koristio tri antene razmaknute na liniji 1.5 milja udaljenosti, odnosno oko tri valne udaljenosti na radnoj frekvenciji od 300 kHz. Identični signal odašiljan je svim antenama, ali na jednoj vanjskoj anteni signal je bio odgođen za 90° fazno dok je na drugoj vanjskoj anteni ubrzan za 90° .¹¹ Tri prijenosne antene A, B i C bile su postavljene u ravnoj liniji; središnja antena B bila je jednako udaljena od vanjskih antena A i C. Zajednička duljina između njih je u praksi bila dva do tri puta veća od valne duljine. Prijenos se ostvarivao pomoću odašiljača T, spojenog s tri antene A, B i C. Slika 2. prikazuje način rada Consol sustava.



Slika 2. Način rada Consol sustava

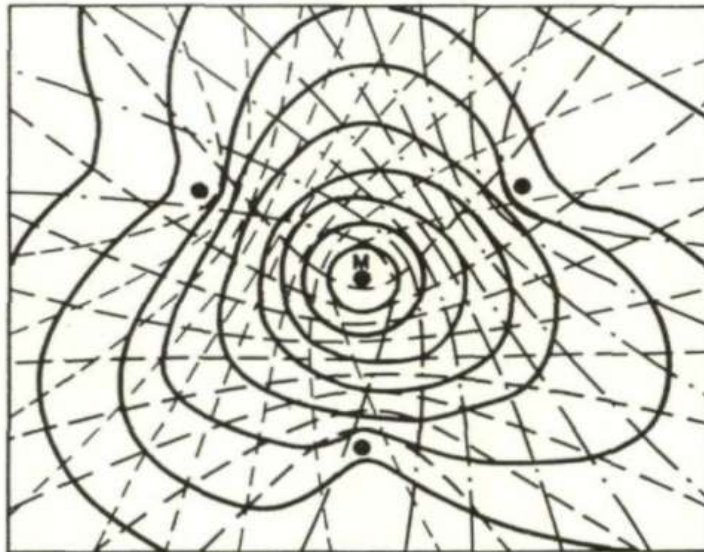
Izvor: Williams, C.: **Describing the Consol Navigation System in general terms**, International Hydrographic Review, Vol. 23., p. 72

Faziranje napojnog kruga vanjskih antena bilo je podležno dvostrukom ciklusu koji se sastojao od nagle promjene defaziranja u skokovima od 180° osim kontinuiranog povećanja defaziranja od 0° do 180° . Naglo defaziranje vršio je defazer P, a kontinuirano povećanje defazer D. Frekvencija prijenosa bila je ista za tri antene; iz praktičnih razloga, međutim, domet središnje antene je bio otprilike četiri puta veći od valova koji zrače

¹¹TimeandNavigation: **Hyperbolic Systems**, URL: <https://timeandnavigation.si.edu/navigating-air/navigation-at-war/new-era-in-time-and-navigation/hyperbolic-systems> (23.07.2022)

vanjske antene. Središnja antena odašiljala je prepoznatljivi pozivni znak kao i višesmjerne valove. Vanjske antene počinjale su djelovati na početku usmjerenog prijenosa u sprezi sa središnjom antenom, utječući na prijenos točkica i crtica i rotaciju signala. Usmjereni prijenos počinjao je početnom promjenom faze od 90° kruga napajanja vanjskih odašiljača u odnosu na središnji odašiljač. Struja A kretala se 90° ispred struje B, a struja C je 90° iza B.¹²

DECCA sustav originalno je osmišljen u SAD te je bio temeljen na usporedbi faze konstantnih signala umjesto mjerenju vremena razlike, što se pokazalo znatno točnijim s obzirom da faza dva signala može biti izmjerena unutar nekoliko stupnjeva. Za izračun pozicije sustav je koristilo znatno jeftiniju opremu koja je omogućavala istovremeno ispitivanje tri signala. Kako su primarni i sekundarni signali odašiljani na drugačijoj frekvenciji, bilo koja količina kašnjenja je mogla biti izračunata u isto vrijeme. Slika 3. prikazuje signale stanica u Decca sustavu.



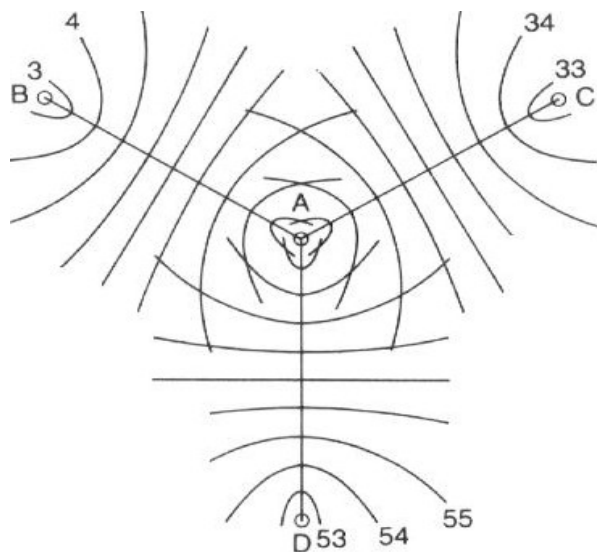
Slika 3. Prikaz signala triju stanica u DECCA sustavu

Lueg, H.: **Decca**, U: Bauss, W.: **Radio Navigation Systems For Aviation and Maritime use**, A Comparative Study, Pergamon Press, 1964., p. 85

¹²Williams, C.: **Describing the Consol Navigation System in general terms**, International Hydrographic Review, Vol. 23., p. 73

U praksi su za izračun tri računa korištene jedna primarna i dvije ili tri sekundarne stanice. Kako su tri signala poslana na tri različite frekvencije isti su istovremeno dekodirani i prikazani na tri dekametra. Sekundarne stanice su bile raspoređene pod kutem od 120° jedna od druge, što je omogućavalo operatoru da pokupi par signala na ekranu koji su poslani od stanica što bliže pravom kutu je moguće. Normalna točnost bi bila unutar 200 metara. Decci je pogodovalo korištenje na kopnu zbog kašnjenja od refleksija koje znaju imati veliki utjecaj na vrijeme impulsa.¹³

Hiperbolički navigacijski sustav pod nazivom GEE koristila je Velika Britanija u svojim avijacijskim operacijama tijekom Drugog svjetskog rata. GEE je osim u Velikoj Britaniji imao svoje lance po Francuskoj te na sjeveru Njemačke. Sustav je bio ugašen 1970. godine. Signali su slani na jednoj frekvenciji, a primarna je stanica slala dva signala; „A“ signal koji je označavao početak vremenskog perioda te „D“ signal koji je u principu dva puta „A“ poslan da bi se označio završetak. U svakom periodu jedna od dvaju sekundarnih bi odgovorila naizmjeničnim „B“ i „C“ signalima. Rezultirajuća petlja bi bila „ABD...ACD...ABD“. Slika 4. prikazuje primjer signala GEE sustava.



Slika 4. Primjer signala GEE sustava

Izvor: Blanchard, W.F.: **The GEE System**, URL: <http://www.jproc.ca/hyperbolic/gee.html> (19.12.2022)

¹³TimeandNavigation: **Hyperbolic Systems**, URL: <https://timeandnavigation.si.edu/navigating-air/navigation-at-war/new-era-in-time-and-navigation/hyperbolic-systems> (23.07.2022)

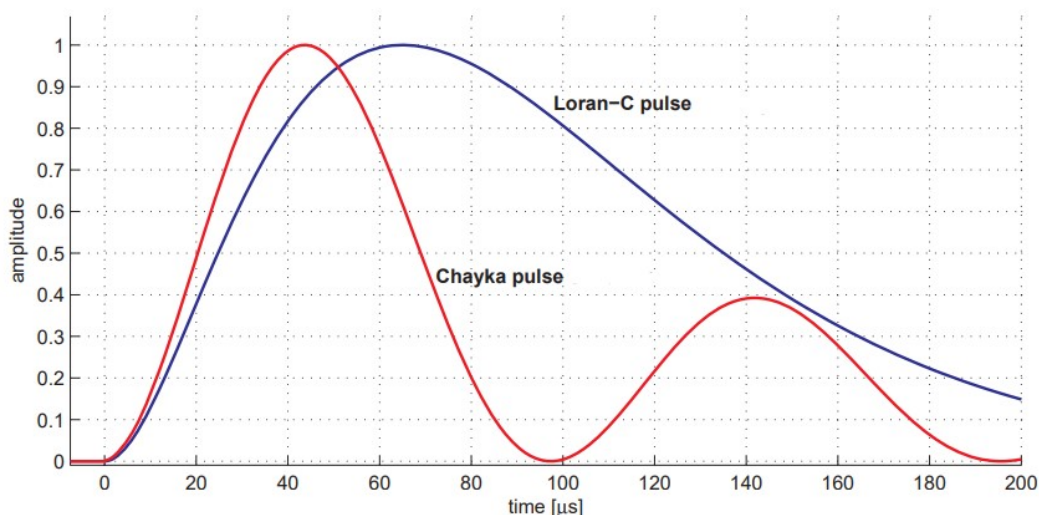
Operator bi na zaslonu vidio tok impulsa, ponekad i impulse drugih obližnjih lanaca. Zatim bi prilagodio oscilator koji je započeo trag osciloskopa kako bi se podudarao sa satom primarne stanice. Potom bi uz pomoć varijabilnog kašnjenja pomaknuo početak signala kako bi jedan od signala „A“ bio skroz na lijevoj strani opsega. Brzina trake kroz ekran bila bi prilagođena tako da bi se „D“impuls vidio na samoj desnoj strani.

Sustav navigacije Chayka bio je dugodometni sustav navigacije koji je razvijen u Sovjetskom Savezu tijekom Hladnog rata. Sustav je prvi put korišten kasnih 1950-ih na sovjetskim podmornicama i površinskim brodovima. Chayka sustav se također koristio u drugim zemljama, uključujući Kinu, Kubu i Indiju. Chayka navigacijski sustav je dizajniran da bude pouzdan i precizan navigacijski sustav koji se može koristiti kako u plitkim tako i dubokim vodama. Također je bio otporan na ometanje, što ga je činilo idealnim navigacijskim sustavom za vojnu upotrebu. Sustav je radio tako što je odašiljao seriju signala iz obalne postaje ili iz zrakoplova. Ti su signali zatim primljeni od strane podmornice ili broda, koji su ih koristili za određivanje položaja. Jedna od prednosti Chayka sustava bio je domet do 3.000 nautičkih milja, što ga je činilo pogodnim za dalekometnu navigaciju. Sustav je također bio relativno jednostavan i jeftin za korištenje, što ga je učinilo popularnim navigacijskim sustavom za vojnu i civilnu upotrebu.¹⁴

Unatoč svojim prednostima, Chayka sustav imao je neka ograničenja. Jedno od glavnih ograničenja je da je za prijenos signala zahtijevao mrežu obalnih postaja ili zrakoplova, što je ograničavalo njegovu upotrebu na područjima gdje takva mreža ne postoji. Drugo ograničenje je da je sustav osjetljiv na ometanje iz drugih izvora, poput radara i elektroničkih protumjera. Chayka navigacijski sustav još uvijek se koristi u nekim zemljama, posebno u Rusiji. Međutim, uglavnom je zamijenjen novijim i naprednijim navigacijskim sustavima, poput GPS sustava i GLONASS sustava. Ti sustavi nude veću preciznost i pouzdanost te se široko koriste u vojne i civilne svrhe. Ipak, neka starija plovila i podmornice mogu još biti opremljeni Chayka sustavom i još uvijek bi mogao imati specijaliziranu primjenu u određenim situacijama.¹⁵ Slika 5. prikazuje usporedbu impulsnih signala Chayka sustava s impulsnim signalima Loran-C sustava.

¹⁴ Balov, A. V.: **Radio navigation, present and future**, Gyroscopy and Navigation, Vol. 1, 2010., p. 227-228

¹⁵ Pelgrum, W.J.: **New Potential of Low-Frequency Radionavigation in the 21st Century**, URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A90450409-f146-4c45-839c-a4b484f723ff> (07.02.2023)



Slika 5. Prikaz Chayka pulsnih signala u usporedbi s američkim Loran-C pulsnim signalima

Izvor: Pelgrum, W.J.: *New Potential of Low-Frequency Radionavigation in the 21st Century*, URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A90450409-f146-4c45-839c-a4b484f723ff> (07.02.2023)

Loran-A je sustav osmišljen od strane SAD u periodu od 1940. do 1943. godine. Sustav je funkcionirao u rasponu od 1.750 kHz do 1.950 kHz, a koristio je razliku vremena odašiljanja impulsa te imao raspon od 800 do 1.600 NM. Rani stadiji testiranja pokazali su da su pri frekvencijama nižim od 3 MHz signali puno stabilniji, no veliki problemi pojavili su se u mjerenju vremenske odgode. Sustav se sastojao od mreže zemaljskih odašiljačkih stanica koje bi slale impuls radio valova u određenim intervalima. Vremenska razlika između pulsa primljenih od strane prijammnika koristila se za izračunavanje udaljenosti između prijammnika i odašiljača. Korištenjem više odašiljača, sustav je mogao odrediti poziciju prijammnika kroz proces triangulacije. Do kraja Drugog svjetskog rata mreža se sastojala od 70 odašiljača koji su pokrivali 30 % zemljine površine.¹⁶

Kod razvoja Loran C sustava trud je usmjeren prema postizanju najveće moguće navigacijske točnosti pri najvećem mogućem dometu. Osnovna razmatranja su bila povezati vrijeme i udaljenost brzini širenja signala uz pomoć prikladnih tehnika mjerenja. Odabrana primarna frekvencija bila je od 1.950 MHz dok je 7.5 MHz odabrano za funkcioniranje preko dana kao dodatan kanal. Domet Lorana je bio 1.500 milja preko

¹⁶Loran-C Association: *The History of Loran*, URL: <https://loran.org/history-of-loran/> (07.02.2023)

mora, odnosno 600 milja preko kopna. Za dobivanje pozicija koristio se Loran lanac koji su se sastojali od glavne i najmanje dvije pomoćne stanice. Sve su stanice u lancu sinkronizirano odašiljale impulse s određenim vremenskim razmacima počevši od glavne stanice. Impulsi tvore hiperboličke linije sa stanicama kao žarištima koje prijammnici koriste kao linije pozicija. Vremenska razlika između određenog para stanica odgovara razlici udaljenosti između prijammnika i tih stanica. Interakcija između hiperboličkih linija (linija pozicije) koje stanice u lancu odašilju, a prijammnik hvata tvore poziciju broda.¹⁷

Od svih gore navedenih sustava Loran sustav smatra se jednim od najrazvijenijih sustava hiperboličke navigacije. Sustav Loran mijenjao se s godinama, a njegova primjena zahtijevala je nadopune i poboljšanja sustava kako bi se ostvarila što bolja preciznost i sinkronizacija s drugim uređajima. Tako se pojavila i ideja o razvoju novog poboljšanog Loran sustava. Sljedećim dijelom rada fokus se stavlja na prikaz razvoja i funkcije Loran sustava a tako i poboljšanog e-Loran sustava navigacije.

¹⁷ArmedConflict:Hyperbolic radio navigation system GEE, URL: <https://www.armedconflicts.com/GEE-radio-navigation-system-t125976> (23.07.2022)

3. E-LORAN SUSTAV

Pojavom Loran sustava 1940-ih, javlja se prva tehnologija svog vremena koja je mogla precizno odrediti lokaciju prijammnika. Loran sustav je preživio gotovo 60 godina prije nego što ga je vlada SAD proglasila zastarjelim. Loran se sastojao od mobilnog prijammnika, instaliranog na brodu ili zrakoplovu, koji je detektirao niskofrekventne radiovalove odašiljane s kopnenih stanica. Kao takav, sustav je bio revolucionaran za svoje vrijeme zbog svoje sposobnosti da točno odredi svoju lokaciju na temelju vremena koje je bilo potrebno da radio valovi s fiksnog odašiljača dođu do mobilnog prijammnika. Odašiljači su nazivani svjetionicima, koji su bili organizirani u posebne skupine. Svaka grupa se sastojala od glavnog odašiljača i od dva do pet sekundarnih odašiljača.

Prva verzija Loran sustava bila je slaba u pružanju točnosti položaja unutar desetaka milja i nedostajao joj je domet koji su kasniji modeli postigli. Navedeno je bilo posljedica toga što tehnologija nije dopuštala točnu sinkronizaciju odašiljača unutar grupe. Niti se odašiljači nisu mogli nalaziti daleko jedan od drugoga jer bi to moglo dovesti do gubitka točnosti u linijama položaja, čime bi se smanjio domet. Godine 1958. sustav je prebačen u obalnu stražu SAD gdje je preimenovan u Loran-A, iako su mogućnosti ostale iste. Tek 1974. godine izdana je nova verzija, poznata kao Loran-C. S dostupnošću poluprovodničke elektronike, komponente koje se koriste u Loran sustavima postale su mnogo pristupačnije. Ne samo da je obalna straža nadogradila novi sustav, već je bio otvoreno dostupan za civilnu upotrebu na brodovima i čamcima za razonodu. Loran-C se pokazao popularnim modelom i njegova je upotreba dosegla vrhunac 1970-ih i ranih 80-ih neposredno prije izlaska GPS sustava. Loran-C je omogućio svjetsku pokrivenost s odašiljačima u Sjevernoj Americi, Europi i Japanu, dok se također može pohvaliti kompatibilnošću s ruskim sustavom Chayka.¹⁸ Slika 6. prikazuje područje pokrivenosti Loran-C sustavom.

¹⁸Hochheiser, J.: **Radio History: The Rise, Fall and Resurrection of LORAN**, URL: <https://blog.minicircuits.com/radio-history-the-birth-death-and-resurrection-of-loran/> (25.07.2022)



Slika 6. Područje pokrivenosti Loran-C sustava

Izvor: Johnson, G.et.al.: **An Evaluation of eLoran as a Backup to GPS**, Technologies for Homeland Security, 2007 IEEE Conference on Project: eLoran, 2007., p.1

Kako bi ostao kompetentan zbog pojave naprednog sustava kao što je GPS, inicijativa u obliku programa modernizacije i dokapitalizacije Loran sustava 1990-ih pokušava održati Loran relevantnim poboljšanom verzijom, inače poznatom kao e-Loran (engl. *Enhanced Long Range Navigation* – e-Loran). Ovaj novi sustav samodostatniji je od svog prethodnika, Loran-C sustava, kao i precizniji s većim dometom. Tamo gdje bi krajnji korisnici morali uzeti sjecište linija pozicija i sami izračunati poziciju, e-Loran ima mogućnost samostalnog izračunavanja pozicije prijamnika, što ga čini konkurentnim GPS sustavu

Međutim, simpatiziranje GPS sustava dovelo je do napuštanja tog projekta prije nego što je dočekaio svijetlo dana. Tako je Loran proglašen zastarjelim 2009. godine i povučen iz upotrebe 2010. godine. Unatoč očitim prednostima visokofrekventnog GPS sustava i njegove točnosti, zabrinutost za nacionalnu sigurnost navela je inženjere da ožive Loran kao rezervu za GPS. Visokofrekventni rad, iako pruža veće performanse, uvelike je osjetljiviji na ometanje nego niskofrekventni sustavi poput Loran sustava. U niskofrekventnom sustavu, integritet signala je mnogo jači, stoga je potreban snažniji odašiljač da izazove smetnje. GPS satelite je, s druge strane, lakše ometati i skloniji su

smetnjama zbog svemirskog vremena, elektromagnetskog impulsa; a velike zgrade mogu biti prepreke u prolasku signala.¹⁹

Glavna razlika između e-Loran sustava i tradicionalnog Loran-C sustava je dodavanje podatkovnog kanala odaslanom signalu. Dodatni podatkovni kanal korisnikovom prijammniku prenosi ispravke specifične za primjenu, upozorenja i informacije o integritetu signala. Upravo ovaj podatkovni kanal omogućuje e-Loran sustavu da ispuni vrlo zahtjevne standarde za neprecizne instrumentalne pristupe i sigurno dovođenje brodova u luku u uvjetima slabe vidljivosti. E-Loran je također sposoban pružiti iznimno precizne vremenske i frekvencijske reference potrebne telekomunikacijskim sustavima koji prenose glasovnu i internetsku komunikaciju.

Izješće iz 2001. godine od strane Američke vlade²⁰ dovelo je do zaključka da je GPS izložen namjernim i nenamjernim interferencijama. Loran je bio identificiran kao moguće rješenje za ovu problematiku, ali je zahtijevao prilagodbu današnjem vremenu te je produkt toga bio e-Loran. E-Loran je međunarodno standardizirana usluga pozicioniranja, navigacije i mjerenja vremena (engl. *Positioning, Navigation and Timing - PNT*) za primjenu raznim granama transporta i drugdje. Posljednji je niskofrekventni, daleko dometni navigacijski sustav koji iskorištava sve prednosti 21. stoljeća. E-Loran je nezavisan, različit, koherentan globalnom navigacijskom satelitskom sustavu. Omogućuje korisnicima sigurnost i ekonomske pozitivne učinke GNSS sustava čak i u slučaju kada im GNSS to nije u stanju pružiti.²¹

Dodatni podatkovni kanal kod e-Loran sustava je najveće poboljšanje naspram stare verzije. Jedne od poruka koje su dio podatkovnog kanala su diferencijske ispravke. One su omogućene uz pomoć referentnih stanica koje otkrivaju sitne varijacije u e-Loran signalu slično kao i kod diferencijskih GNSS referentnih stanica, što omogućuje prijammnicima ispravke na te varijacije kao i informacije vezane uz integritet signala. Poslani podaci e-Loran signala možda neće biti potrebni ali minimalno sadrže:²²

- identitet stanice - almanah stranica Loran odašiljanja i diferencijski nadzor,

¹⁹Hochheiser, J.: Radio History: The Rise, Fall and Resurrection of LORAN, URL: <https://blog.minicircuits.com/radio-history-the-birth-death-and-resurrection-of-loran/> (25.07.2022)

²⁰John A.; Volpe National Transportation Systems Center: **Vulnerability Assessment of the Transportation Infrastructure relying on the Global Positioning System**, 2001.

²¹International Loran Association: **Enhanced Loran (eLoran) Definition Document**, Report Version: 0.1, 2007., p.7

²²Ibidem, p.9

- apsolutno vrijeme temeljeno na koordiniranom svjetskom vremenu (engl. *Universal Time- TC*); pomaci mjereni u sekundama između vremena e-Loran sustava i UTC vremena,
- upozorenja o anomalijama radio propagacije uključujući i razne zračne valove,
- upozorenja o neuspješnim signalima, ciljajući na poboljšanje cjelovitosti signala,
- pokrivenost usluge, dostupnost usluge, zahtjevna točnost,
- poruke koje omogućuju korisnicima autentičnost e-Loran odašiljanja; službene poruke,
- diferencijske e-Loran ispravke, za maksimalno poboljšanje točnosti pomorskih korisnika, te
- diferencijske GNSS ispravke.

Prijamnici e-Loran sustava sinkronizirani su sa svjetskim vremenom (UT) što znači da im vrijeme odašiljanja može biti predviđeno. Usklađenost s UT znači da pomorci ne moraju više ovisiti o staromodnoj hiperboličkoj navigaciji. Moderni e-Loran prijamnik radi kao GPS prijamnik koristeći signale od dostupnih odašiljača u obližnjem području. Sljedećim potpoglavljem rada detaljnije se daje uvid u razvoj, infrastrukturu i trenutno stanje e-Loran sustava.

3.1. RAZVOJ, INFRASTRUKTURA I TRENUTNO STANJE

E-Loran je pojačana verzija Loran-C sustava. Diskusija o razlikama između ova dva sustava je dosta kompleksna jer je Loran-C bio moderniziran u različitim periodima, opsezima i drugačijim dijelovima svijeta. Prvi zabilježeni pokušaji moderniziranja i nadogradnje Loran sustava bili su 1997. godine u obliku projekta dokapitalizacije Lorana (engl. *Loran Recapitalization Project*). Projekt je unaprijedio i modernizirao sustav tadašnjom najnovijom tehnologijom kako bi očuvao svoju funkciju do najmanje 2008. godine. Promjene su bile izvršene na kontrolnim centrima, Loran stanicama i primarnom lancu nadzora.

Loran-C kontrolne stanice zahtijevale su veliku količinu osoblja s formalnom obukom, prostrane objekte te konstantna, visoko opterećena, četiri samostalna sustava. Sva oprema zamijenjena je Loran konsolidiranim sustavom kontrole (engl. *Loran Consolidated Control System*) kompjuteriziranim sustavom na daljinsko upravljanje. Sastojao se od HP9000/J210 radne stanice koja pokreće UX 10.10 UNIX operacijski sustav. Pisan je u

C++ te je koristio Informix podatkovnu bazu za spremanje podataka. Primarni lanac nadzora koristio je Austron 5000 Loran-C prijarnike te staromodne PDP-8 kompjutere koji su korišteni za nadzor svih Loran-C signala. Prijarnici tih modela bili su zauzimali veliki prostor, crpili veliku količinu energije, zahtijevali uporabu ručno namotanih urezanih filtera, koristili su 35 inčnu antenu sa velikom uzemljenom ravninom te je kao takav sustav bilo teško za održavati. Locus LRS-IIID prijarnik je zamijenio postojeću problematičnu opremu. Dodatna zamjena napravljena je i na opskrbi energije Elgar 102 te pruža neprekidnu opskrbu energije. Novi prijarnik u stanju je pratiti do 11 Loran lanca istovremeno što omogućuje Loran konsolidiranom sustavu veći broj ulaznih informacija. Dodatne informacije pridonose vremenskoj stabilnosti, točnosti i ponavljanju odašiljanog signala.²³

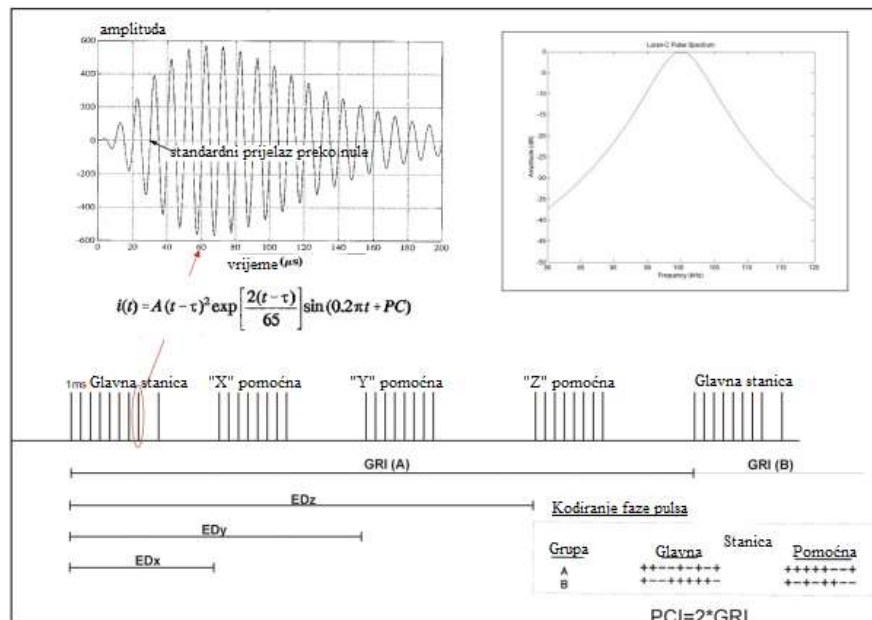
Loran stanice (operacijske prostorije) koristile su HP 5061A cezijski oscilator koji je zamijenjen HP5071A oscilatorom. Kod starog sustava stopa pomaka bila bi 200 nanosekundi po danu dok kod nove verzije ona iznosi 9 nanosekunda po danu. Osim ovoga instaliran je nadzor vremena odašiljanja (engl. *Time of transmission monitor*) kako bi se pospješila sinkroniziranost s univerzalnim vremenom. Automatski trepereći sustav (engl. *Automatic Blink System*) ugrađen je radi indikacije o integritetu signala Loran-C prijarnika. Ovaj sustav pruža informacije vremenske razlike odstupanja signala u manje od dvije sekunde. Loran stanice (sustav odašiljanja) je koristio cijevne odašiljače (engl. *Tube type transmitters*) AN/FPN-44/45 modela. Zamijenjeni su odašiljačima krutog stanja (engl. *Solid state transmitters*) kojima nisu bile potrebne užarene katode a tako su uklonjene odgode zbog zagrijavanja, uzaludnog trošenja energije čime operacijska funkcija korištenja odašiljača nema limit. Pored toga rad uređaja omogućen je pri nižem naponu i nije mu potreban impulsni modulator.

Nova frekvencijsko kontrolna oprema sastojala se od podsustava upravljanja odašiljačem (engl. *Transmitter control subsystems*) od kojih bi jedan bio aktivan dok bi drugi bio u pripravnosti. Primarna funkcija im je kontrolirati točno vrijeme odašiljanog impulsa te nadzirati njihovu kvalitetu. Novougrađeni su i oprema za prijenos frekvencije (engl. *Transmit frequency equipment*) i Hewlett Packard HP-5071A cezijev sat. Daljinska automatizirana integrirana Loran oprema sastoji se od komercijalnih Dell kompjutera s funkcijom pružanja vremenskih ispravka, alarmiranja te služe kao alat komunikacije

²³Arsenault, A. N., Boyer, J. M.: **LORAN-C Recapitalization Project (LRP)**, Proceedings of the 57th Annual Meeting of The Institute of Navigation, 2001, p. 349-351

kontrolnim monitorima koji omogućuju pravilno vrijeme i sinkronizaciju svih stanica u lancu.²⁴

E-Loran odašilje površinske signale s centralnom frekvencijom od 100 kHz. Ta niska frekvencija daje signalu mogućnost dalekog dometa od široko razmaknutih odašiljača. Pozicija prijammnika se određuje mjerenjem vremena dolaska (engl. *Times of Arrival* - TOA) tih impulsa. Potrebno je izmjeriti pseudoudaljenost (engl. *pseudorange*) od najmanje tri odašiljača kako bi se trilateracijom odredilo rješenje vodoravnog položaja. Kako su odašiljači smješteni na zemljinoj površini visina ne može biti izmjerena. Mjerenje tri odašiljača (po mogućnosti pet) pruža korisniku mogućnost autonomnog nadzora integriteta prijammnika (engl. *Receiver Autonomous Integrity Monitoring*) uz točnost pozicije. Točan sat na brodu, omogućuje korištenje jednog odašiljača manje.²⁵ Slika 7. prikazuje strukturu e-Loran signala i frekvencijski spektar.



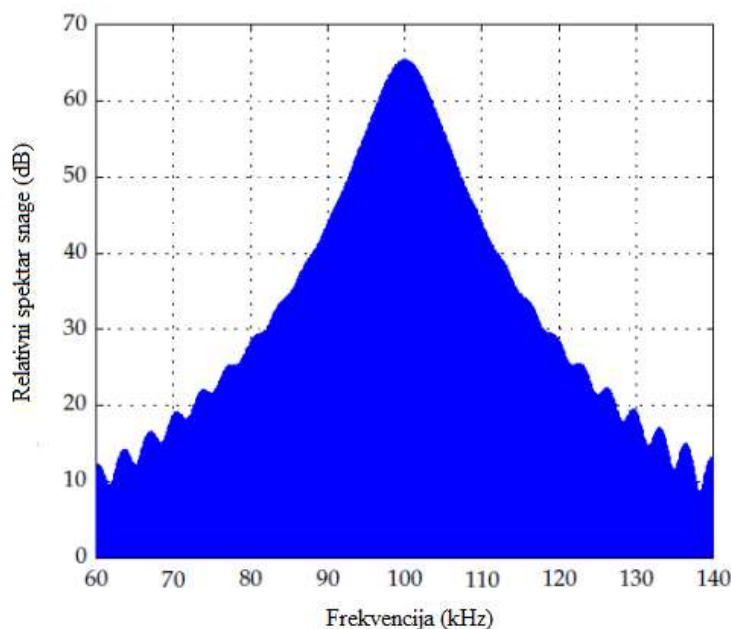
Slika 7. Struktura e-Loran signala i frekvencijski spektar

Izvor: MarRINav – Maritime Resilience and Integrity in Navigation: **PNT R&I Technologies and Integration Report**, GLAResearch & Development, 2019., p.48

²⁴Ibidem, p. 352-354

²⁵MarRINav – Maritime Resilience and Integrity in Navigation: **PNT R&I Technologies and Integration Report**, GLAResearch & Development, 2019., p.47-48

Struktura e-Loran signala podijeljena je u tri sekcije. Zbog niske frekvencije način propagacije je stabilan radiofrekvencijski površinski val. Prednji dio impulsa pomno je konstruiran kako bi pružao veliku snagu signalu na pratećoj točki unutar prijarnika; s druge strane prateća točka je dovoljno rana na impulsu kako bi se izbjegao nadolazeći zračni val odnosno nepoželjna refleksija površinskog vala ionosfere. Trajanje impulsa je oko 250 mikrosekundi. Međutim, kraj impulsa nije definiran jer ga odašiljač u dovoljnoj mjeri potiskuje kako bi održao 99% energije signala unutar 90kHz do 110kHz raspona. Impulsi svakog grupnog intervala ponavljanja (engl. *Group Repetition Interval* - GRI) imaju naizmjenično fazno kodiranje. Grafikon 1. prikazuje model spektra snage e-Loran sustava.



Grafikon 1. Model spektra snage e-Loran signala

Izvor: MarRINav – Maritime Resilience and Integrity in Navigation: **PNT R&I Technologies and Integration Report**, GLAResearch & Development, 2019., p.49

Odašiljač odašilje osam navigacijskih impulsa, odašiljanih s jednom milisekundom međusobnog razmaka. Dodatni deveti impuls (odnosno deseta impulsna pozicija) u glavnoj impulsnoj grupi zastario je za e-Loran, kao ostavština Loran-C sustava. Međutim deveti i deseti impuls se nadodaju radi implementiranja Loran podatkovnog kanala. Svi e-Loran

predajnici odašilju na istoj frekvenciji, zbog toga ne smiju svi odašiljati u isto vrijeme. Zbog toga, jedan od odašiljača naznačen kao glavni (engl. *Master*) odašilje grupu impulsa koju nakon određenog vremena slijedi jedan od pomoćnih predajnika. Vremenska odgoda između odašiljanja glavne i pomoćne zove se emisijsko kašnjenje (engl. *Emission Delay – ED*). Emisijsko kašnjenje pomoćne stanice uključuje kašnjenje propagacije signala između glavne i odabrane pomoćne stanice te kodno kašnjenje kako bi se pozicionirala emisija pomoćne unutar grupnog intervala ponavljanja tako da se nigdje u pokrivenom području emisije poklapaju. Pomni odabir grupnog intervala ponavljanja i selekcija kodnog kašnjenja su vitalni dijelovi dizajniranja sustava.²⁶

Interval faznog koda (engl. *Phase Code Interval - PCI*) sastoji se od dva grupna intervala ponavljanja: fazni kod GRI (A) drugačiji je od GRI (B). Kod A znak + indicira pomak u fazi pulsa za 180°, dok – indicira na 0 fazni pomak. Fazno kodiranje je omogućeno kako bi se ublažio utjecaj duge odgode, višestruki skok zračnog vala uporabljajući korelator u korisnikovom prijammniku. Moderni e-Loran prijammnici imaju način rada cjelokupnog prikaza (engl. *All in view*) baš kao i GPS sustav. U cjelokupnom prikazu ako se sagledaju sva mjesta na zemlji gdje se mjeri isto vrijeme propagacije od odašiljača i ucrtaju se mjesta na navigacijsku kartu, vidjelo bi se da bi ta mjesta ležala na krugu s odašiljačem u centru. Mjerenja s tri takva odašiljača formiraju tri kruga, što omogućuje prijammniku izračun svoje pozicije. Kako bi se izračunala točna propagacija svako odašiljanje mora biti sinkronizirano prema točnom vremenu, zajedničkom svim predajnicima.²⁷ U sljedećem potpoglavlju pobliže su opisane funkcije e-Loran sustava.

3.2. FUNKCIJE E-LORAN SUSTAVA

Glavne funkcije sustava su određivanje pozicije i pružanje točnog UT korisniku. Prema izvedbi e-Loran mora zadovoljiti IMO rezoluciju A.1046 (27) koja u detalje opisuje zahtjeve o Svjetskim radio navigacijskim sustavima uzimajući u obzir brodove koji obitavaju u Oceanima i prilazima u luke, ulazima u luku i obalnim vodama. Zahtjevi su opisani točnošću, integritetom, dostupnosti i kontinuitetom. Tablica 1. prikazuje zahtjeve rezolucije A.1046 (27) za GNSS sustave u koje spada i Loran sustav koji takve zahtjeve mora udovoljiti.

²⁶MarRINav, op.cit., p.10

²⁷IALA: *The Technical Approach to Establishing a Maritime eLORAN Service*, Guideline G1125, 2017., p.10

Tablica 1. Zahtjevi za GNSS sustave (na temelju IMO A.1046 (27) i IMO A.915(22))

Područje	Razina sustava				Razina usluge	
	Apsolutna horizontalna točnost (95%)	Integritet			Dostupnost signala (2 godine)	Kontinuitet (preko 15 minuta)
		Granica upozorenja	Vrijeme za uzbunu	Rizik integriteta		
m	M	s	%	%	%	
Ocean	≤ 100	N/A	N/A	N/A	≥ 99.8	N/A
Ulazi u luku, prilazi luci i obalne vode	≤ 10	25	10	1 x 10 ⁻⁵	≥ 99.8	99.97

Izvor: IALA: *The Technical Approach to Establishing a Maritime eLORAN Service*, Guideline G1125, 2017., p.6

E-Loran poziciju broda dobiva na sličan način kao i kod GNSS prijavnika, identificiranjem i obvezivanjem signala uz pomoć korelacijskog procesa. Pozicija se dobije na temelju vremenu trajanja propagacije impulsa mjerenjem razlike između vremena dolaska impulsa do prijavnika i vremena odlaska impulsa od predajnika. Udaljenost između odašiljača i prijavnika se u konačnici dobije uz pomoć brzine svjetlosti što se može prikazati formulom (2):

$$TOA = T_{TOR} - T_{TOT} = PF + SF + ASF + \Delta Rx \quad (2)$$

Gdje je:

TOA – vrijeme dolaska signala

T_{TOR} - vrijeme prijama signala

T_{TOT} – vrijeme odašiljanja signala

PF – primarni faktor

SF – sekundarni faktor

ASF – dodatni sekundarni faktor

ΔRx – kašnjenje prijavnika i kabela

Primarni faktor (PF) odnosi se na propagaciju kroz zračni prostor, dok se sekundarni faktor (SF) odnosi na propagaciju preko mora. Dodatni sekundarni faktor (ASF) je inkrementalno kašnjenje vremena dolaska 100 kHz signala kao rezultat propagacije preko heterogenog puta koji signal prođe i nepoznato je u vrijeme instalacije, no može biti izračunato i modelirano. Ovisno o dužini i provodljivosti puta, dodatno kašnjenje može biti veoma značajno. Postoje prostorna i temporalna komponenta dodatnog sekundarnog faktora. Standardi za e-Loran od strane radiotehničke komisije za pomorske usluge preciziraju da se dodatno sekundarno kašnjenje smatra dvokomponentnim: nominalni ASF i mjesni (mrežni) ASF. Nominalni ASF je gruba vrijednost regije veličine desetak odnosno stotinjak kvadratnih milja. ASF vrijednosti značajno podižu točnost e-Loran prijarnika uklanjanjem većine prostornih komponenti dodatnog sekundarnog faktora.²⁸

Kod podrške najviše točnosti pri prilasku luci potrebne su finije vrijednosti s gušćim koordinatnim mrežama. Finije ASF mreže dobivene su lokalnim varijacijama dodatnog sekundarnog faktora relativne nominalnim vrijednostima s razmakom između rešetki do 30 metara, ovisno o iznosu ASF varijacija. Uz lokalne ASF varijacije, postoji temporalna komponenta koja rezultira od faktora kao što su vrijeme, sezonske promjene vodljivosti i dnevni utjecaj. Temporalne promjene su uklonjene diferencijalnim Loran ispravkama (d-Loran). D-Loran ispravke nadoknađuju ostale sporo varirajuće i uobičajene greške od sitnih nepravilnosti u PF i SF modelima kao i kod sistematskih grešaka.

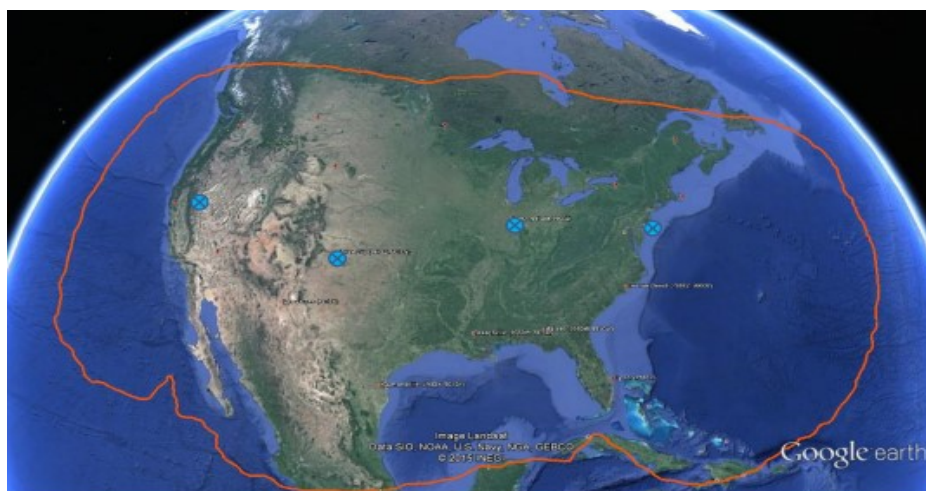
E-Loran je stratum-1 izvor vremena što bi značilo da je spojen (sinkroniziran) sa stratum-0 izvorom vremena od kojeg dobiva točno vrijeme. Mjesto odašiljanja e-Loran signala posjeduje lokalne i daljinske vremenske skale. Kao glavni izvor vremena odašiljači koriste lokalnu vremensku skalu. Lokalna vremenska skala koristi tri cjeline primarnih referentnih standarda (obično atomski sat). Daljinska vremenska skala sakuplja podatke o vremenu od bilo koje vanjske reference koju korisnik odabere. Kao takva može uključiti jedan ili više izvora (GPS, GNSS, GALILEO...), dvosmjerni satelitski vremenski prijenos, dvosmjerni nisko frekventni vremenski prijenos te dr. Ulazni podaci daljinske skale vremena nisu direktno povezani s lokalnom vremenskom skalom te su pod nadzorom radi procjene korisnosti. Odašiljači su u mogućnosti održati referentno lokalno vrijeme unutar

²⁸Offermans, G., Bartlett, S., Schue, C.: **Providing a Resilient Timing and UTC Service Using eLoran in the United States**, Navigation – Journal of the Institute of Navigation, Vol. 64., Iss. 3., 2017., p.342

desetak nanosekunda univerzalnog vremena, najmanje 70 dana bez pristupa daljinskoj vremenskoj skali.²⁹ Slično kao i GPS sustav, e-Loran može pružiti usluge na dva nivoa:³⁰

- osnovna e-Loran vremenska usluga (engl. *Basic e-Loran Timing Service* - BeTS)
- precizna e-Loran vremenska usluga (engl. *Precision eLoran Timing Service* - PeTS).

BeTS i PeTS su unutarnje imenovane sheme razvijene radi lakšeg prepoznavanja razlike između dva nivoa usluge. Osnovna e-Loran vremenska usluga definirana je kao usluga bolja od 1 μ s sinkronizacije u usporedbi sa univerzalnim vremenom kroz pokriveno područje odašiljača. BeTS koristi točno vrijeme odašiljanja e-Loran impulsa i UT poruke na Loran podatkovnom kanalu koji pruža informacije o vremenu, datumu i odskočne sekundarne informacije (engl. *Leap second information*). Korisnički prijamnik zahtjeva jednu kalibraciju unutarnjih odgađanja (antena, dužina kabela...) i ASF tijekom instalacije. Nakon kalibracije, prijamnik se može sinkronizirati unutar 1 μ s UT vremena. Slika 8. prikazuje BeTS područje pokrivenosti korištenjem eLoran signala s četiri odašiljača snage 1 MW.



Slika 8. BeTS područje pokrivenosti korištenjem e-Loran signala s četiri odašiljača snage 1 MW

Izvor: Offermans, G., Bartlett, S., Schue, C.: **Providing a Resilient Timing and UTC Service Using eLoran in the United States**, Navigation – Journal of the Institute of Navigation, Vol. 64., Iss. 3., 2017., p.343

²⁹Offermans, G., Bartlett, S., Schue, C., op.cit., p.339

³⁰Ibidem, p. 344

Precizna e-Loran vremenska usluga je definirana kao usluga sa sinkronizacijom boljom od 100 ns na prema univerzalnom vremenu u blizini diferencijalnih e-Loran referentnih stanica. Za još točnije vrijeme, vremenske varijacije u propagaciji, kao što su dnevna i sezonska varijacija ASF-a, mogu biti nadoknađene diferencijalnim tehnikama. Kao i kod diferencijalnih GPS instalacija, diferencijalni e-Loran prijamnik instaliran na fiksnoj i poznatoj lokaciji, bit će u mogućnosti mjeriti nepravilnosti svojih ASF u usporedbi sa nominalnim odnosno objavljenim ASF vrijednostima. Razlika može biti odašiljana korisnicima u blizini diferencijalne e-Loran referentne stanice koristeći Loran podatkovni kanal. Korisnički prijamnik primjenjuje diferencijalne ispravke radi nadoknade ASF fluktuacije te time postiže vremensku točnost koja je bolja od 100 ns. Na temelju nedavnih testiranja, domet pokrivenosti diferencijalnih lokacija za vrijeme bi mogao nadmašiti 35 NM, slično kao i područje pokrivenosti diferencijalnih e-Loran lokacija za navigaciju.³¹

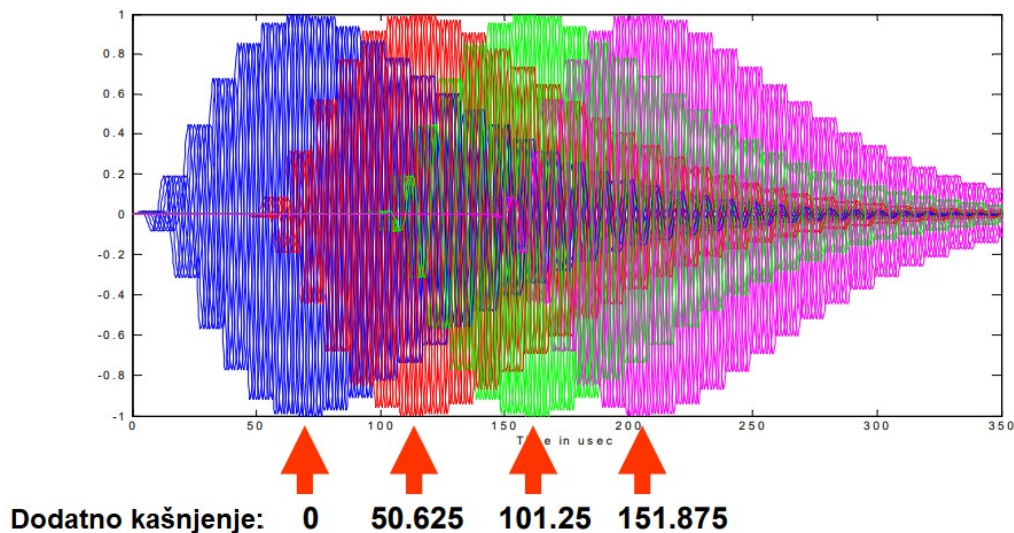
Kako bi Loran mogao postati održiva podrška GPS sustavu mora pružati korektivne i sistematske informacije korisnicima. Podešavanje podataka putem Loran sustava nije novi koncept, no uzimajući u obzir mogućnosti, razni aspekti „navigacijskih“ impulsa moraju biti razmotreni. Impuls Loran sustava ima mnogo vremenskih i energetskih specifikacija koje ne mogu biti izmijenjene modulacijom podataka. Eksperimenti koji su provedeni 1960-ih³² iskorištavali su binarni impuls modulacije položaja (engl. *Binary Position Modulation Pulse* - BIMP) čime je Loran impuls pomaknut za ± 1 mikrosekundu. Pokušaj se pokazao kao neuspješan zbog brzine prijenosa od samo nekoliko bitova u sekundi. Daljnji razvitak donio je integrirani radio navigacijskog i podatkovno komunikacijskog sistema za Loran 1990-ih pod nazivom Eurofix. Sistem iskorištava trojnu shemu koja pomiče 6 od 8 Loran pulseva u grupi za 0 ili ± 1 mikrosekundu u stabilnoj petlji. Nakon dodijeljene značajne brzine kodiranja ispravljanja pogrešaka, rezultatna brzina prijenosa podataka iznosila je 30 bitova u sekundi.

U ranim 2000. godinama naizmjenična metoda odašiljanja podataka pomoću frekvencijsko/fazne modulacije na 6 od 8 impulsa je razmatrana pod nazivom Intraimpulsna frekvencijska modulacija (engl. *Intrapulse Frequency Modulation*). Metoda je upotrebljavala komplet od 16 impulsa gdje bi modulacija nastupila nakon 30 mikrosekundi točke kako bi imala minimalan utjecaj na navigaciju. Pri testiranju, sustav bi postigao brzinu podataka od 250 bitova u sekundi. Primarni problem sa svim prijašnjim

³¹Offermans, G., Bartlett, S., Schue, C., op.cit., p.346

³² W. N. Dean, "Clarinet Pilgrim System," Magnavox Technical Report FWD73-243, September 1973

modulacijama je njihov utjecaj na prijamnik. Pristup je pomogao u modulaciji pozicije impulsa, ali podrhtavanje u vremenu dolaska signala nije uklonjeno nadodanom modulacijom podataka. Naime, takav scenarij ugrožava primarnu funkciju sustava što je određivanje pozicije, a odgađanje impulsa uzrokuje smanjenje prosječne snage signala. Dizajneri sustava su dogovorili dodavanje devetog pulsa prateći osam navigacijskih impulsa u grupi. Tehnika devetim impulsom odašiljanja podataka sastoji se od 32 binarna impulsa modulacije položaja. Svaki izbor signala je definiran 5 bitnim simbolom tako da prva 2 bita definiraju grubu odgodu, dok zadnja 3 definiraju finiju odgodu.³³ Slika 9. prikazuje sva 32 simbola te ističe grupe odgode.



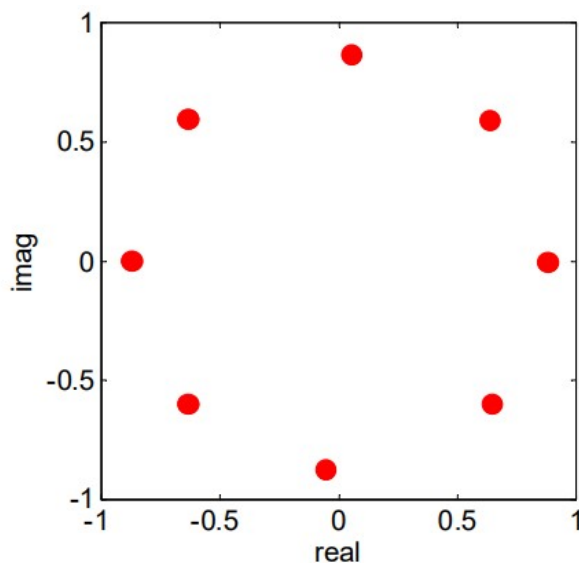
Slika 9. Prikaz modulacije odašiljanja podataka devetim impulsom

Izvor: Hartshorn, L., Swaszek, P.F., Johnson, G., Wiggins, M.: **Performance of Loran-C 9th Pulse Modulation Techniques**, U.S. Coast Guard Academy, London, p. 6

Koristeći tehnike signalnog prostora moguće je prikazati gore vidljive simbole s N dimenzijskim vektorom, gdje je N broj ortonormiranih baznih funkcija potrebnih za dobivanje jedinstvenog geometrijskog prikaza seta. Dok signal unutar pojedinačne grupe grube odgode iskazuje mnoge značajke faznog pomaka tipki (engl. *Phase Shift Keying* - PSK) pomak omotnice uzrokuje punu konstelaciju koja predstavlja te signale kao 32

³³Hartshorn, L., Swaszek, P.F., Johnson, G., Wiggins, M.: **Performance of Loran-C 9th Pulse Modulation Techniques**, U.S. Coast Guard Academy, London, p. 5

dimenzionalne. Kako svi signali imaju istu snagu, oni mogu biti predstavljeni kao točke na 32-dimenzionalnoj hipersferi. Pošto je to gotovo nemoguće prikazati grafički, lakše ih je promatrati kao pojedinačni smjer grupacije od osam simbola te odužiti koncept na druge grupe. U jednom prostoru svaka od tih grupa nalikuje na 8 PSK gdje je separacija između bilo koja dva signala idealnih 45 stupnjeva.³⁴ Slika 10. prikazuje konstelaciju signala za 8 faznih pomaka tipki.

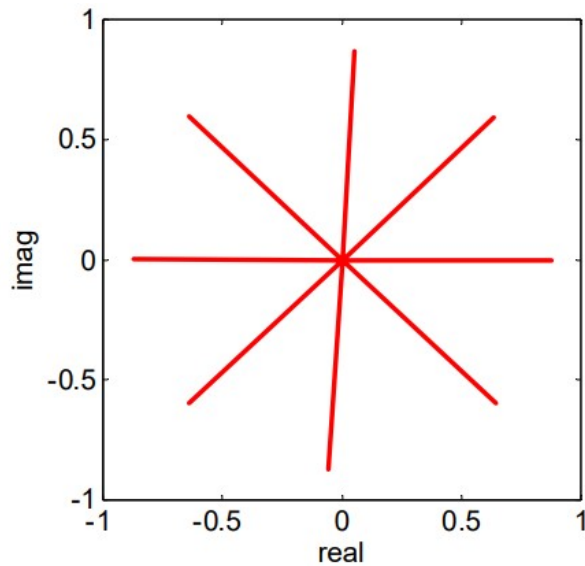


Slika 10. Konstelacija signala za 8-PSK

Izvor: Hartshorn, L., Swaszek, P.F., Johnson, G., Wiggins, M.: **Performance of Loran-C 9th Pulse Modulation Techniques**, U.S. Coast Guard Academy, London, p. 6

Ispitivanje susjedne grube grupe prikazuje dodatna 22.5 stupnja u fazi od grupe do grupe. Kako ti 8 i 9 impulsni signali nisu PSK značajno je ispitati njihove niskopropusne ekvivalentne signale. Kako je vremenska odgoda pojasa prolaza signala odgovara faznom pomaku u niskopropusnom ekvivalentu, tada svaki 9 impuls ima Loran omotnicu pod drugačijim kutom. Na složenoj ravnini, tih 8 signala zauzima formu prikazanu na Slici 10., svaki signal počinje na nuli, prelazi jednu liniju izlazeći iz izvorišta prema maksimalnoj veličini te prelazi nazad u izvorište pri čemu će određeni kut ovisiti o količini odgađanja. Slika 11. je bazirana na idealnom modelu 9 impulsnog signala.

³⁴Hartshorn, L., Swaszek, P.F., Johnson, G., Wiggins, M., op.cit., p.5



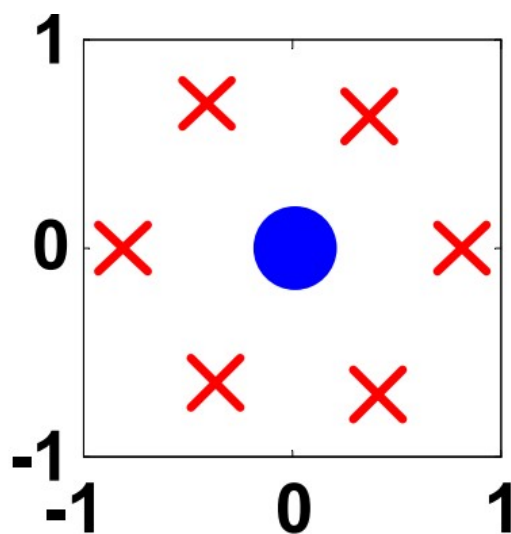
Slika 11. Niskopropusni ekvivalentni signali na kompleksnoj ravnini (jedna gruba grupa)

Izvor: Hartshorn, L., Swaszek, P.F., Johnson, G., Wiggins, M.: **Performance of Loran-C 9th Pulse Modulation Techniques**, U.S. Coast Guard Academy, London, p. 6

Iz perspektive signalnog razmaka, mogućnost za greškama simbola može biti omeđena koristeći udaljenost od najbližeg susjednog odašiljanog signala. Pregled udaljenosti od 32 BIMP 9 impulsne sheme pokazuje da je svaki signal pod utjecajem najmanje 4 do 6 susjednih signala, relativna pozicija tih signala:³⁵

- dva u istoj gruboj grupi odgađanja, s nosećom faznom razlikom od $\sim\pm 45^\circ$ od željenog signala,
- dva od prijašnje grube grupe odgađanja, s nosećom faznom razlikom $\sim\pm 22.5^\circ$,
- dva od sljedeće grube grupe s faznom razlikom od $\sim\pm 22.5^\circ$.

³⁵Hartshorn, L., Swaszek, P.F., Johnson, G., Wiggins, M., op.cit., p.6



Slika 12. Šest najbližih signala

Izvor: Hartshorn, L., Swaszek, P.F., Johnson, G., Wiggins, M.: **Performance of Loran-C 9th Pulse Modulation Techniques**, U.S. Coast Guard Academy, London, p. 7

Tipično je za set visoko dimenzijskih signala nepraktičnost točnog računanja mogućnosti greške simbola koristeći 32 dimenzionalnu reprezentaciju. Uobičajeni pristup je vezanjem vjerojatnosti grešaka. Pretpostavljajući da se buka kanala može modelirati dodajući bijeli Gaussov šum, vjerojatnost greške može biti izračunata formulom (3):³⁶

$$P_e \leq \frac{1}{32} \sum_{k=1}^{32} \sum_{j \neq i} Q \left(d_{kj} \sqrt{\frac{\gamma}{2}} \right) \quad (3)$$

Gdje je:

γ – omjer signala i šuma (engl. *Signal to Noise Ratio* - SNR)

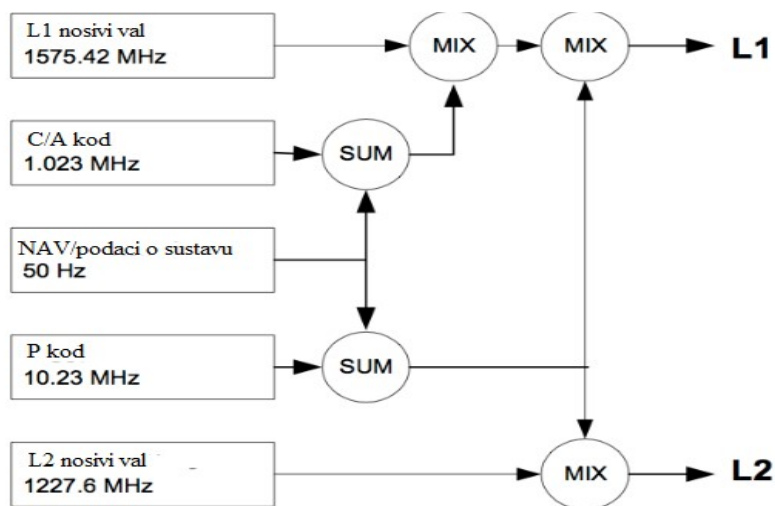
d_{kj} – udaljenost između k i j signala

Važno je napomenuti da se vjerojatnost izražavanja pogreške brzo smanjuje kako omjer signala i šuma raste. Pri demodulaciji Loran podatkovnog kanala, prijammnik bi prirodno koristio Loran toranj s najvećim dostupnim omjerom signala i šuma. Zbog toga ima smisla ispitivati nivo uobičajenog omjera signala i šuma kroz predviđeno pokriveno područje. Koristeći gornju formulu, vjerojatnost pogreške može se izračunati kao funkcija

³⁶Hartshorn, L., Swaszek, P.F., Johnson, G., Wiggins, M., op.cit., p.7

omjera signala i šuma. Na 22 dB, očekuju se stope pogreške sirovog simbola 9. impulsa od približno 10^{-5} ili više. Međutim, na Loran također utječu unakrsne interferencije (engl. *Cross Rate Interference - CRI*). U teoriji se može izračunati postotak impulsa koji su podložni unakrsnim interferencijama. Naposljetku, Loran je točno tempiran i svaka se brzina ponavlja u nedogled, stvarajući povremenu pojavu unakrsne inferencije.³⁷

Prijenos GPS signala ima neke zanimljive značajke koje se odnose na njega i određena svojstva koja mora slijediti da bi sve funkcioniralo barem u dijelu prijenosa. Frekvencija vala nosioca koja će omogućiti prijenos visokih frekvencija mora poštovati neke zakone prirode kako bi se signal uspješno odašiljao i primao. GPS treba imati frekvenciju vala nosioca manju od 2 GHz. Drugi čimbenik je da frekvenciju treba odabrati tako da na frekvenciju vala nosioca ne utječu vremenski uvjeti poput kiše ili snijega. Sateliti šalju dvije frekvencije unutar ovih pojaseva koji se danas obično nazivaju L1 i L2. L1 prikazuje navigacijske podatke i standardni pozicioni kod, dok L2 primarno prikazuje P kod za prijenos. L2 međutim zahtijeva posebne prijamnike koji mogu obraditi kod za precizno pozicioniranje (engl. *Precision Positioning Code-PPS*). GPS signal se primarno prenosi pomoću fazne modulacije, koja se rijetko koristi za druge komunikacijske sustave. Slika 13. prikazuje signale GPS sustava.



Slika 13. Prikaz signala GPS sustava

Izvor: Ee3550: **The Transmission of GPS Signals**, URL: <https://ee3550-gps.weebly.com/transmission-of-gps-signals.html> (20.01.2023)

³⁷Hartshorn, L., Swaszek, P.F., Johnson, G., Wiggins, M., op.cit., p.7

Dok se val nosioc L1 i L2 odašilju u isto vrijeme, oni ne djeluju jedni na druge niti ometaju drugi signal. Signal L1 je moduliran u skladu s digitalnim signalom preciznog koda (P-kod) i jasnog akvizicijskog koda (engl. *Course Acquisition - C/A*). Signal L2 je moduliran prema digitalnim signalima navigacijske poruke i P-koda. Svaki P-kod satelita dugačak je 6,187,100,000,000 bitova ~720,213 gigabajta, ali to je samo mali dio glavnog P-koda koji ima 235,000,000,000,000 bitova, ~26,716 terabajta. Kako bi se spriječile prijetnje ometanja upotrebe GPS sustava, P-kod je moduliran s W-kodom kao posebnom vrstom enkripcije. Da bi bilo koji od kodova radio, važno je napomenuti da je za rad GPS sustava potreban kod koji mora biti usklađen s atomskim satom jer je satelit dovoljno daleko od Zemlje da bi došlo do kašnjenja. Kako bi modulirao podatke na signal vala nosioca GPS koristi fazne modulacije što je rijetka tehnika u usporedbi s amplitudnom modulacijom i frekvencijskom modulacijom. Kada se podaci trebaju modulirati na signal nosača, signal nosača naglo pomiče fazu za 180°. Jedan od drugih razloga zašto se koristi fazna modulacija je taj što ima veći domet.³⁸

Primarna problematična karakteristika GPS signala je njegova mala snaga. Kao takav nije izložen samo namjernim, već i ne namjernim ometanjima. Velikoj količini svijeta on je danas primarno sredstvo pronalaska pozicije i snalaženja u prostoru te je zbog svojih manjkavosti uzrokovao velike ekonomske i logističke probleme. Za razliku od GPS sustava, e-Loran posjeduje jaki signal kojeg ako se i želi nije lako ometati. Prilike u kojima se ne možemo osloniti na GPS mogu biti upotpunjene radom e-Lorana kao potpore. Sljedećim se potpoglavljem rada daje uvid u utjecaj ometanja na satelitske navigacijske sustave.

3.3. UTJECAJ OMETANJA NA SATELITSKE NAVIGACIJSKE SUSTAVE

GPS je trenutno u svijetu primarni izvor određivanja pozicije, navigacije i vremena u svrhe pomorstva, samostalan ili upotpunjen s dodatnim sustavima. GPS signali izmjereni na površini zemlje veoma su slabi. Kao takav, sustav je izložen namjernim i nenamjernim ometanjima, gdje rezultati mogu biti prekid rada na velikim područjima. Prepoznavši to, Opće svjetioničko tijelo (engl. *General Lighthouse Authority*) u suradnji s ministarstvom obrane Velike Britanije proveli su niz pokusa s namjerom identificiranja utjecaja GPS

³⁸Ee3550: **The Transmission of GPS Signals**, URL: <https://ee3550-gps.weebly.com/transmission-of-gps-signals.html> (20.01.2023)

ometanja na sigurnu navigaciju na moru. Laboratorij za znanost i tehnologiju je omogućio profesionalni ometač signala niske do srednje snage koji je proizvodio pseudo nasumičnu buku preko civilne L1 frekvencije pružajući ometajući signal preko cijelog 2 MHz raspona od L1. Jedinica je mogla funkcionirati na P kodu koji nije bio aktiviran. Snaga signala na 2 MHz rasponu je bila otprilike 2 dBW (~1.5W) snage.³⁹ Pokriveno područje GPS jedinice ometanja na 25m iznad površine na maksimalnoj snazi 1.58W prikazano je na Slici 14.



Slika 14. Područje pokrivenosti jedinice za ometanje GPS sustava na 25 m iznad razine tla pri maksimalnoj snazi od 1.58 W

Izvor: The Royal Academy of Engineering: **Global Navigation Space Systems: reliance and vulnerabilities**, London, 2011., p.41

Pri izvođenju testa brod NLV Pole Star se naizmjeničnom promjenom kursa kretao između dvije putne navigacijske točke (engl. *waypoint*) na putu koji raščlanjuje glavni snop GPS ometača te dva bočna snopa, ali s dovoljnom udaljenošću od ometajućeg dijela kako bi se omogućilo raznim GPS jedinicama ponovno spajanje na satelite. Posada je bila obaviještena o ometanju prilikom testa tako da je otkazivanje GPS sustava bilo očekivano. Kada je Pole Star ušao u područje ometanja, velika količina alarma se aktivirala na mostu

³⁹The Royal Academy of Engineering : **Global Navigation Space Systems: reliance and vulnerabilities**, London, 2011., p.40

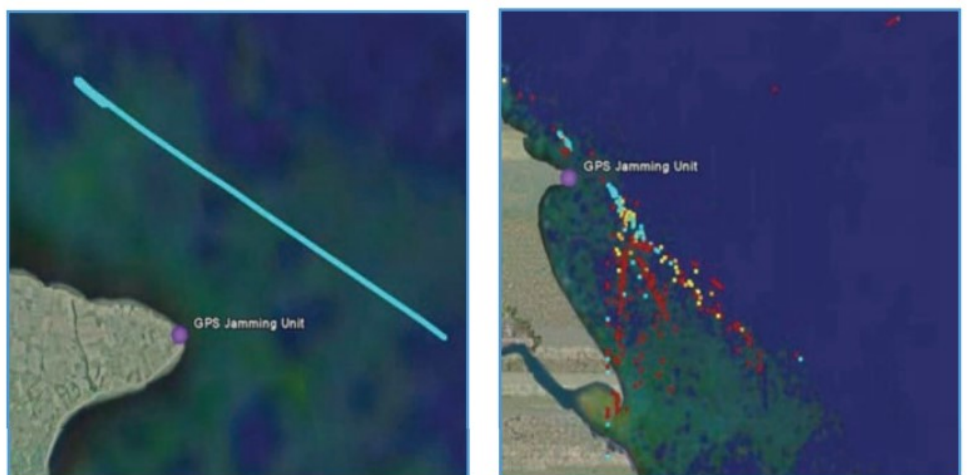
kroz period od 10 min. Ovi alarmi bili su međusobno povezani s radom drugačijih funkcija za primanje i proračun svoje GPS pozicije što je uključivalo: brodski diferencijalni GPS prijamnik (engl. *Differential Global Positioning System* - DGPS), predajnike sustava za automatsku identifikaciju (engl. *Automatic Identification System* - AIS), dinamički sustav pozicioniranja, brodski žiro kompas te digitalni selektivni sustav pozivanja (engl. *Digital Selective Call* - DSC). Očekivani alarmi nisu stvorili veliku paniku među članovima posade, međutim velika količina alarma u takvim situacijama teško osigurava izbjegavanje panike među posadom.

Kod integriranog sustava na mostu, koji omogućuje izvršavanje plana putovanja automatski preko auto pilota mogu nastati nesreće kojih posada ne bi bila ni svjesna. Ako automatski sustav funkcionira u vrijeme nastanka ometanja, kurs i brzina bi se mogli promijeniti bez informiranja posade o tome. Informacijski sustav i prikaz elektroničkih karata (engl. *Electronic Chart Display and Information System* - ECDIS) nije bio ažuriran zbog nemogućnosti GPS ulaza te je rezultat bio statički prikaz zaslona. Zbog frustracije posada je isključila ekran. Također, nekoliko je problema pri testu uočeno kao što je ne mogućnost posade da vode brod klasičnim načinom navigacije koristeći stare uređaje.

Prilikom testa, tri dodatna prijamnika postavljena su na brodu od kojih su dva bila tipični pomorski diferencijalni GPS prijamnici, dok je treći bio skupi dvofrekvencijski prijamnik. Podaci u obliku NMEA (engl. *National Marine Electronics Association*) zapisa prikupljeni su sa svakog od prijamnika kroz test ometanja. NMEA zapisi su elektronički podaci određeni za komunikaciju između brodskih elektroničkih uređaja. Dva diferencijalna prijamnika održala su GPS zaključanim na srednjoj frekvenciji koji je odašiljan s obližnje „Flamborough Head DGPS“ referentne stanice, međutim kako je stanica isto tako bila pod utjecajem ometanja, ispravke nisu napravljene te je njihova pozicija bila prikazana od strane samostalnog GPS sustava. Pri procesiranju zaprimljenih podataka od strane tri prijamnika NMEA GPRMC (GPRMC - preporučeni minimalni sastav) zapisi su bili korišteni za pružanje određene pozicije, vremena i brzine. Ovi zapisi pružaju indicaciju vjerodostojnosti podataka, postavljajući ili čisteći veliku zastavu dok odluku donosi prijamnik. Procesiranjem podataka s raznih prijamnika korišteni su podaci koji su bili vjerodostojni, a rezultati su bili pogrešni podaci pozicije od strane prijamnika kako su ulazili i izlazili iz ometajućeg prostora. Veličina pogreške određivanja pozicije je

varirala, s ponekim malim greškama koje su se odrazile čak nekoliko desetaka kilometara od lokacije.⁴⁰

Slika 15. prikazuje dobivenu poziciju sa jednog prijammnika prikazanog na Google Earth aplikaciji. Lijevi prikaz daje uvid u mjerenje sa kontrole kada ometanje nije bilo aktivno, dok desni prikaz pruža sliku aktivnog ometanja. Boja svake prikazane pozicije indicira na brzinu plovila u trenutku, plava prikazuje brzinu manju od 15 čvorova, žuta prikazuje brzinu između 15 i 50 čvorova dok crvena prikazuje brzinu koja prelazi 100 čvorova.



Prijavljeni položaji bez aktivnog ometanja GPS-a Dojavljene pozicije s uključenim GPS ometanjem

Slika 15. Prikaz položaja jedinica bez i sa uključenim GPS ometanjem

Izvor: The Royal Academy of Engineering : **Global Navigation Space Systems: reliance and vulnerabilities**, London, 2011., p.43

GPS prijammnik Pole Star-a je isto tako prijavio ometanje signala te isto tako veliko odstupanje od stvarne brzine kretanja. Zabilježena pozicija brodskog ECDIS sustava lutala je uokolo te je brzina zabilježena da prelazi maksimalnu brzinu broda. Brodski prijammnik je prestao pružati informacije vezano uz poziciju čim je brod ušao u područje ometanja. Pogreška u određivanju pozicije može biti kobna za posadu i brod u cijelosti. Naime, GPS se pokazao kao ranjiv sustav pod utjecajem ometača niske snage. Treba napomenuti da se

⁴⁰The Royal Academy of Engineering, oo.cit., p.42

rezultati mogu proširiti na pad GPS usluge nenamjernom interferencijom. Nenamjerne interferencije mogu nastati od harmonijskih izobličenja koja uzrokuju aktivne TV antene, oštećena GPS antena i kablovi. Glavni zaključci promatranog testa su da GPS ranjivosti imaju veliki utjecaj na pomorsku sigurnost:⁴¹

- Na obali – prezentirana slika prometa službi za promet plovila (engl. *Vessel Traffic Services/Management* - VTS) će biti zbunjujuća jer AIS pruža informacije s pogreškama vezanim uz određivanje pozicije pri čemu se javlja velika brzina konflikta s radarskim informacijama. Stoga je potrebno obaviti studije o tome kako će VTS operateri odgovoriti u takvim situacijama.
- Instrumenti i pomagala u navigaciji – DGPS referentne stanice mogu biti ometane u radu te taj utjecaj može uzrokovati odsustvo DGPS ispravaka kao i integriranih informacija na velikom geografskom području, AIS korišten kao pomagalo u navigaciji može odašiljati krive informacije te sinkronizirana svjetla mogu biti pomućena i uzrokovati pomutnju na vizualnu uočljivost.
- Na brodovima – navigacija, svjesnost situacije, stabilnost karte i digitalno selektivno pozivanje kod hitnih slučajeva biti će izgubljeno ako su bazirani na GPS sustavu. Određeni brodovi imaju integrirani sistem na mostu, koji omogućuje automatsko izvršavanje plana putovanja na autopilotu. Ako je taj sustav u funkciji u trenucima kada dođe do ometanja, ovisno o dizajnu, kurs i brzina mogu biti promijenjeni bez informiranja posade o tome, potencijalno vodeći do opasnih posljedica. U tim trenucima, kontinuitet navigacijske sigurnosti ovisan je o mogućnostima posade da prepoznaju grešku u radu GPS sustava te da uz pomoć alternativnih načina uspješno nastave voditi brod.
- Na ljude – ljudi imaju očekivanja da će GPS sustav funkcionirati savršeno. Ako posada na brodu ili osoblje na obali ne uspije prepoznati ometanje GPS sustava ili je nastala pomutnja oko rukovanja s alternativnim rješenjima upravljanja brodom, sigurnost može biti znatno ugrožena. Kod ovog testa posada je bila informirana o nastalim ometanjima, problemi koji su se pojavili i dalje su imali značajan učinak na posadu. Osim što ECDIS nije izvršavao svoju funkciju broj aktiviranih alarma bila je izuzetno ometajuća.

⁴¹The Royal Academy of Engineering, op.cit., p.43

Iz provedenog istraživanja dokazane su mane i nedostaci globalnog sustava pozicioniranja čime se dokazuje i činjenica za potrebom integracije sustava s dodatnim sustavom koji će omogućiti preciznije i lakše pozicioniranje. Potreba za sofisticiranijim sustavom i obuka posade od ključne su važnosti. Jedan od takvih sustava koji predstavlja alternativu jest e-Loran sustav kao rješenje.

3.4. E-LORAN KAO RJEŠENJE

E-Loran upravo u situacijama gdje dolazi do ometanja GPS signala može funkcionirati samostalno. E-Loran odašiljanja su sinkronizirana s javno certificiranim izvorom koordiniranog UT, metodom u potpunosti neovisnom o vremenskoj skali GNSS sustava. Navedeno ukazuje da se time omogućuje sinkroniziranost s GNSS sustavom, ali na neovisan način o njegovoj vremenskoj skali i tako prijammnicima omogućuje da koriste signal e-Lorana i satelita. E-Loran koristi nisko frekventna odašiljanja koja propagiraju u ili okolo građevina te ih se može primiti unutar njih. Frekvencija tih signala kreće se od 90-110 KHz što znači da su snažni, dalekodometni i jako teški za ometanje. Vrijeme i vremenska izvedba e-Loran signala može biti podijeljena u dvije komponente: dugoročna vremenska stabilnost i fazna sinkronizacija na UT. Dugoročna stabilnost e-Loran signala pokazala se usporedivom s komercijalno dostupnim GPS vremenskim prijammnicima. Fazna sinkronizacija s UT dostupna je preko „UT Sync“ poruka koje se prenose preko Loran podatkovnog kanala.

Loran podatkovni kanal uz poruke navedene u prijašnjem dijelu šalje i poruke pod nazivom UT Sink. Ove poruke pružaju informacije preko prijammnika koje omogućuju UT vrijeme dana, datum i sekunde od e-Loran odašiljanja. Poruke se ponavljaju svakih nekoliko minuta. Kada je vremenski prijammnik naručen po instalaciji, ova poruka mu omogućuje da posloži svoj 1 pps izlaz unutar nekoliko mikrosekunde univerzalnog vremena. Ostatak vremenske ne podudarnosti je uklonjen u daljnjoj kalibrirajućoj fazi. Loran podatkovni kanal utjelovljuje snažne ispravke grešaka što mu omogućuje kršnost što je bitan faktor za korištenje kroz znatnu količinu raspona. Radio signali frekvencije oko 100 KHz propagiraju snažno kao površinski valovi. Kao posljedica, stopa prigušenja sa

udaljenošću ovisi o električnoj provodljivosti zemljine površine, gdje je najmanja preko morske površine, a najveća preko terena pronađenih iznad pustinja i planina.⁴²

E-Loran nije podložan utjecaju atmosferskih ometanja kao što su solarne oluje niti ciljanog ometanja kao GNSS, jer je sustav baziran na tlu. Atomski sat služi kao dobar izvor vremena sustavu u rezervi GNSS sustavu. Postavljeni su razni zahtjevi za sustav, a e-Loran bi trebao:⁴³

- biti bežičan, zemaljski i široko pokriven,
- pružati točan, snažan 100KHz signal,
- biti robustan, teško ometajući i degradiran,
- propagirati uokolo zgrada i drugih prepreka,
- iskoristiti postojeću Loran infrastrukturu,
- moći komplementirati druge sustave.

Kao i kod svih radio signala, e-Loran odašiljanja mogu biti ometana. Međutim, snaga signala koji dostižu do prijammnika je u velikoj količini veća od signala GNSS sustava. Ometanje e-Loran signala zahtjeva velike odašiljajuće antene, znatno velike snage i opasno visoke voltaže.

⁴²Czaplewski, K., Weinrit, A.: **The Identification of Possible Applications of the e-Loran System**, Annual of Navigation, Vol. 25., 2018., p.176

⁴³Ibidem, p.178

4. PRIMJENA E-LORAN SUSTAVA

Svjetska brodarska industrija doživljava snažan rast, za koji se očekuje da će se nastaviti; brodovi postaju sve veći i brži, plovni putovi postaju sve pretrpaniji, a posade se sve više oslanjaju na elektroničke navigacijske sustave za rad u takvom okruženju. Novi koncept e-navigacije poboljšava sigurnost i zaštitu morskog okoliša, te potencijalno smanjuje troškove. Omogućuje službenicima na mostu sve informacije koje su im potrebne na jednom zaslonu. Kako bi ove ključne e-navigacijske usluge bile dostupne, sustav zahtijeva dostavu podataka o položaju i vremenu izuzetno visoke točnosti i pouzdanosti. Navedene informacije uglavnom dolaze od GNSS sustava, a kombinacija GNSS sustava i e-Loran sustava pružaju jedan kombinirani izlazni tok podataka. Stoga je e-Loran ključ koji omogućuje e-navigaciji da isporuči cijeli niz prednosti i održi sigurnost kroz redundantnost. Postignuta visoka dostupnost također bi mogla dovesti do smanjenja broja tradicionalnih fizičkih pomagala za navigaciju; svjetala i plutača s potencijalno značajnim uštedama.⁴⁴ Prije pojašnjenja primjene e-Loran sustava značajno je ukazati na koncept i značaj e-navigacije.

4.1. KONCEPT E-NAVIGACIJE

Konceptom e-navigacije upravlja Međunarodna pomorska organizacija i odgovorna je za uspostavljanje obveznih standarda za poboljšanje sigurnosti života na moru, pomorske sigurnosti i zaštite morskog okoliša, te je u globalnoj nadležnosti za brodarstvo. IMO definira e-navigaciju kao *"usklađeno prikupljanje, integraciju, razmjenu, prezentaciju i analizu pomorskih informacija na brodu i kopnu elektroničkim sredstvima za poboljšanje navigacije od sidra do sidra i povezanih usluga za sigurnost i zaštitu na moru i zaštitu morskog okoliša."* E-navigacija je namijenjena zadovoljavanju sadašnjih i budućih korisničkih potreba pomorstva kroz harmonizaciju pomorskih navigacijskih sustava i pratećih obalnih usluga. Očekuje se da će osigurati digitalne informacije i infrastrukturu za dobit pomorske sigurnosti kao i zaštite morskog okoliša pri čemu će se također smanjiti administrativno opterećenje i povećati učinkovitosti pomorske trgovine i prometa.⁴⁵

E-navigacija trebala bi omogućiti automatizirane i standardizirane funkcije izvješćivanja za optimalnu komunikaciju informacija o brodu i putovanju. Navedeno

⁴⁴International Loran Association, op.cit., p.12

⁴⁵IMO: **E-navigation**, URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/eNavigation.aspx> (20.01.2023)

uključuje informacije vezane uz sigurnost koje se prenose na kopno; informacije koje se šalju s obale korisnicima na brodu; kao i informacije koje se odnose na sigurnost i zaštitu okoliša koje se prenose među svim korisnicima. Zahtjevi za izvješćivanje trebali bi biti automatizirani ili unaprijed pripremljeni u mjeri u kojoj je to moguće, kako u smislu sadržaja tako i komunikacije te s njom povezane tehnologije. Razmjena informacija trebala bi biti usklađena i pojednostavljena kako bi se smanjili zahtjevi za izvješćivanjem.⁴⁶ Tablica 2. prikazuje koristi od uvođenja e-navigacije.

Tablica 2. Koristi od uvođenja e-navigacije

Poboljšana sigurnost	Poboljšana zaštita okoliša	Veća učinkovitost i smanjeni troškovi
<ul style="list-style-type: none"> • poboljšana potpora odlučivanju • smanjenje ljudske pogreške • poboljšana pokrivenost i dostupnost ENC • povećana otpornost navigacijskog sustava • uvođenje standardizirane opreme • bolja integracija brodskih i obalnih sustava 	<ul style="list-style-type: none"> • poboljšanje sigurnosti plovidbe (smanjuje se rizik od izlivanja i onečišćenja) • smanjenje emisija korištenjem optimalnih ruta i brzina • poboljšanje sposobnosti i kapaciteta u odgovoru i rukovanju hitnim slučajevima 	<ul style="list-style-type: none"> • globalna standardizacija i tipsko odobrenje opreme • automatizirane i standardizirane procedure izvješćivanja • poboljšana učinkovitost mosta • integracija sustava koji već postoje • poboljšano upravljanje ljudskim resursima

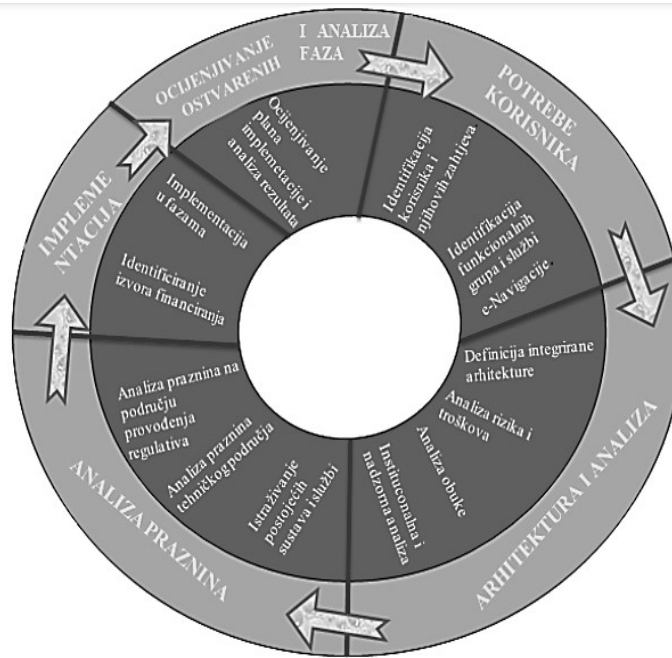
Izvor: prilagodio student prema: IMO: **Strategy for the Development and Implementation of e-Navigation** (MSC 85/26 Add.1 Annex 20). International Maritime Organization, London, 2008., p. 6

⁴⁶IMO: **E-navigation**, URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/eNavigation.aspx> (20.01.2023)

Ključni strateški elementi za e-navigaciju temeljeni na potrebama korisnika uključuju:⁴⁷

- Arhitekturu - cjelokupna konceptualna, funkcionalna i tehnička arhitektura morat će se razviti i održavati, posebno u smislu opisa procesa, struktura podataka, informacijskih sustava, komunikacijske tehnologije i propisa.
- Ljudski element - osposobljavanje, kompetencija, jezične vještine, radno opterećenje i motivacija identificirani su kao ključni čimbenici.
- Konvencije i standardi - pružanje i razvoj e-navigacije treba uzeti u obzir relevantne međunarodne konvencije, propise i smjernice, nacionalno zakonodavstvo i standarde.
- Utvrđivanje položaja - bit će potrebno osigurati sustave za utvrđivanje položaja koji zadovoljavaju potrebe korisnika u pogledu točnosti, cjelovitosti, pouzdanosti i redundantnosti sustava u skladu s razinom rizika i obujma prometa.
- Komunikacijska tehnologija i informacijski sustavi - morat će se identificirati kako bi zadovoljili potrebe korisnika; ovaj posao može uključivati poboljšanje postojećih sustava ili razvoj novih sustava. Morat će se identificirati i riješiti bilo kakvi utjecaji na postojeće sustave, na temelju tehničkih standarda i protokola za strukturu podataka, tehnologiju i frekvencije.
- Elektroničke navigacijske karte (engl. *Electronic Navigational Charts* - ENC) - postojat će odgovarajuća pokrivenost konzistentnim elektroničkim navigacijskim kartama do trenutka kada će IMO vjerojatno usvojiti daljnje obvezne zahtjeve.
- Standardizacija opreme - ovaj dio posla pratit će razvoj standarda performansi i uključit će korisnike i proizvođače.
- Prilagodljivost - države članice Međunarodne pomorske organizacije odgovorne su za sigurnost svih klasa plovila. Stoga se očekuje prilagodljivost e-navigacije za sve potencijalne korisnike i postojeće navigacijske sustave.

⁴⁷IMO: **Strategy for the Development and Implementation of e-Navigation** (MSC 85/26 Add.1 Annex 20). International Maritime Organization, London, 2008., p. 9



Slika 16. Potencijalne komponente procesa implementacije e-navigacije

Izvor: Tomović, M.: **Utjecaj implementacije sustava e-navigacije**, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet, 2019., p. 9, : Weintrit, A.: **Prioritized Main Potential Solutions for the e-Navigation Concept**, Gdynia Maritime University, Poland, 2013.

E-Loran osigurava precizno mjerenje vremena potrebno za podršku ne samo e-navigacije, već i sustava automatske identifikacije i sinkroniziranih svjetala u lučkim područjima. Zahtjevi za performanse koje e-Loran mora ispuniti za ove aplikacije za mjerenje vremena je standard ITU G.81113 Međunarodne telekomunikacijske unije. Značajna dodana vrijednost uporabe e-Loran sustava je e-Loran kompas. Kada se prijamnik koristi s antenom H-polja (magnetska petlja), može se koristiti automatski pronalazak pozicije (engl. *automatic direction finder*) koji određuje smjer na stanicama za odašiljanje. Iz njih prijamnik izračunava smjer broda, općenito s točnošću većom od 1°, neovisno o kretanju broda. Naime, pomorska oprema e-Loran morat će zadovoljiti minimalne standarde operativnih performansi (engl. *Minimal Operation System Performance* - MOSP) koje će izdati IMO, Međunarodna elektrotehnička komisija ili pružatelji usluga e-Loran. Ovi dokumenti također će specificirati sučelja e-Loran

prijamnika s brodskom navigacijskom opremom kao što je ECDIS ili AIS.⁴⁸ Sljedećim potpoglavljem rada analizira se upotreba e-Loran sustava u pomorstvu.

4.2. UPOTREBA E-LORAN SUSTAVA

Međunarodna pomorska organizacija postavlja zahtjeve za performanse navigacijskih sustava kako bi bili prihvaćeni u Svjetski radionavigacijski sustav (engl. *World Wide Radionavigation System* - WWRNS). Oni se primjenjuju na ulaze u luke, prilaze luci i one obalne vode s velikim prometom i/ili značajnim stupnjem rizika.⁴⁹ Niz demonstracijskih projekata i studija u SAD i Europi pokazalo je da e-Loran može ispuniti te zahtjeve. Najzahtjevnija specifikacija je točnost od 10 metara (95%). Postizanje toga zahtijeva dvije ključne komponente; moraju se mjeriti pogreške širenja signala duž kanala i kroz luke. Rezultirajuće korekcije širenja signala objavljuju se i pohranjuju u svakom prijamniku. Diferencijske Loran korekcije u stvarnom vremenu primjenjuju se kako bi se uklonile male fluktuacije u signalima zbog vremenskih prilika ili zbog varijacija u računanju vremena od strane odašiljača (engl. *transmitter timing variations*). Korištenjem ovih korekcija u stvarnom vremenu, brodovi postižu iznimnu točnost potrebnu za sigurnu plovidbu u ograničenim vodenim putovima.⁵⁰ Tablica 3. prikazuje prednosti korištenja e-Loran sustava u pomorstvu.

⁴⁸International Loran Association, op.cit., p.10-12

⁴⁹Ibidem, p.12

⁵⁰Czaplewski, K., Weinrit, A.: **The Identification of Possible Applications of the E-Loran System**, Annual of Navigation, Vol. 25, 2018., p. 169

Tablica 3. Prednosti upotrebe e-Loran sustava u pomorstvu

<p><i>Sigurnosne</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • održava operacije e-navigacije kada je GNSS u prekidu umjesto da se brod vrati na tradicionalne operacije korištenjem fizičkih pomagala za navigaciju (engl. <i>Aid to Navigation-AtoN</i>) • omogućuje korištenje trajnih ili privremenih virtualnih fizičkih pomagala za navigaciju za označavanje opasnih voda. U kombinaciji s robusnim sustavima upozorenja na sudar, povećava se sigurnost života na moru • održava robusne sustave upozorenja na sudar tijekom prekida GNSS sustava • održava situacijsku svijest Službe za promet plovila pomoću pomorskog sustava za automatsku identifikaciju kada je GNSS u prekidu
<p><i>Ekonomske</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • potencijalno smanjuje broj sudara i slijetanja na zemlju što dovodi do smanjenja izlivanja ulja i pomaže u praćenju onečišćenja • potencijalno smanjuje ukupne troškove pružanja AtoN usluga • potencijalno poboljšava operativnu učinkovitost na brodu uključujući usmjeravanje i pristup lukama.

Izvor: International Loran Association: **Enhanced Loran (eLoran) Definition Document**, Report Version: 0.1, 2007., p.13

Uporaba e-Loran sustava u svrhu distribucije univerzalnog vremena značila bi smanjenje broja stanica. URSNAV je kompanija sa ciljem razvoja e-Loran sustava koja je osmislila pokrivanje područja u Americi sa četiri stanice nazvanih bazna e-Loran vremenska usluga (engl. *Basic eLoran Timing Service*). Sustav bi pružao 1 microsekundu sinkroniziranosti na području Sjeverne Amerike i Kanade. URSNAV je predložila preciznu e-Loran vremensku uslugu (engl. *Precision eLoran timing service*) koja bi nadodala 71 diferencijsku referentnu stanicu, strateški postavljenu, blizu najvažnijih 50 gradskih područja, luka i aerodroma. Sa diferencijskim ispravkama, uključenim u Loran podatkovni

kanal, potencijal sinkroniziranosti usluge pada ispod 0.1 mikrosekunde u odnosu na univerzalno vrijeme.⁵¹

E-Loran stanica može odašiljati ispravke od više referentnih stanica, što potencijalno omogućuje vrijeme s nekoliko vremenskih skala UT. Način na koji bi to bilo izvedeno je sinkroniziranost e-Lorana s lokalnim srednjim vremenom te jedno ili više udaljenih vremenskih skala. U slučaju bazne e-Loran vremenske usluge sve što je potrebno od udaljene vremenske skale je sinkronizacija vremenske skale u cjelinu na mjestu e-Loran odašiljača. Prijamnici, uz pretpostavku da poznaju svoju poziciju, mogu zabilježiti vrijeme dolaska e-Loran signala izračunati i nadoknaditi za otkazivanje zbog prevaljenog puta te potom sinkronizirati sat prema odašiljanom vremenu odašiljača, obično unutar 1 mikrosekunde. Usluga više kvalitete precizna e-Loran vremenska usluga zahtijevala bi sve diferencijske referentne stanice, uz odašiljače, da sadrže e-Loran prijamnik i GNSS nezavisni referentni sat. Referentni sat se koristi za mjerenje vremena dolaska od e-Loran odašiljača od interesa, te usporediti s očekivanim signalom vremena dolaska.

Očekivano vrijeme dolaska modelirano je s kalkulatorom dometa, bazirano na udaljenosti diferencijalne stanice od odašiljača, što je poboljšano s tri odgode pod nazivom primarni faktor, sekundarni faktor i dodatni sekundarni faktor. Primarni i sekundarni su poznati kao modelirane konstante. PF je razlika između propagacijske odgode signala u zemljinoj atmosferi, što je suprotno odgodi u slobodnom prostoru i SF koji se odnosi na propagacijsku odgodu signala koji se giba iznad površine mora. ASF se nabavlja s karte ispunjene koordinatnom mrežom koja ispunjava prostor odašiljačke lokacije. Ovo je dodatna odgoda koja se uzima u obzir prilikom prolaska signala preko zemaljske površine te uzdignutog terena i ovisi o više faktora kao što su tip tla i površinska provodljivost. Razlika između izmjerenog i očekivanog vremena dolaska signala pretvorena je u ispravku koja je vraćena diferencijskom stanicom odašiljaču. Tamo, diferencijske ispravke su nadodane na Loran podatkovni kanal i odašiljane korisnicima. Vremenski prijamnici mogu biti programirani za automatsko primjenjivanje ispravka na 1 PPS i druge izlazne signale, kako bi pogreške u odašiljanim informacijama bile ispravljene kod prijamnika, mogućnosti sinkronizacije od 0.1 mikrosekunda ili manje u odnosu na univerzalno vrijeme.⁵² Sljedećim potpoglavljem daje se uvid u upotrebu e-Loran sustava kao podrške GNSS sustavima.

⁵¹Czaplewski, K., Weintrit, A., op.cit., p. 170

⁵²Czaplewski, K., Weintrit, A., op.cit., p. 171

4.3. UPOTREBA KAO PODRŠKA GNSS SUSTAVIMA

Današnji moderni Loran prijammnici rade na isti način kao GPS jedinica. Jedinica automatski prima signal s kopna, vrši izračune i prikazuje zemljopisni položaj. Kako je e-Loran, koji se smatra rezervnim navigacijskim sustavom GPS, posebno razvijen u nekoliko zemalja, pojavila se potreba za GPS/e-Loran integriranom navigacijom. Iako se integracija može izvesti na mnogo načina, potreban je pojačan oprez kod integracije s sigurnosnim aplikacijama. Pogreške u jednom sustavu, kod međusobne integriranosti, mogu uzrokovati pogreške u drugom sustavu. Tehnike integracije mogu se podijeliti u tri opće kategorije: domena položaja, domena raspona ili domena praćenja.



Slika 17. e-LORAN odašiljači u sjeverozapadnoj Europi

Izvor: Griffioen, J.W., Oonincx, P.J.: *Suitability of Low-Frequency Navigation Systems for Artillery Positioning in a GNSS Denied Environment*, The Journal of Navigation, Vol. 66, 2013., p. 39

Jedna metoda domene položaja koja bi mogla biti korisna je korištenje GNSS sustava za pružanje procjena učinaka dodatnog sekundarnog faktora na izlaz Loran položaja. Procjena se tada može koristiti za pružanje poboljšane Loran točnosti u slučaju gubitka GNSS sustava. U ovom slučaju također može koristiti integritet, iako te koristi možda nisu značajne. Granice integriteta iz rješenja GNSS sustava, uspostavljene

korištenjem proširenog GNSS sustava, RAIM-a ili drugih tehnika integriteta, mogu zatim ograničiti početnu pogrešku na procjenu. Prostorni i vremenski modeli ASF-a mogu se koristiti za povećanje granice pogreške na ASF-u. Osnovni model, može se izraziti tako da veza ASF domene položaja bude zbroj nominalne granice i faktora koji objašnjavaju rast ASF u udaljenosti i vremenu. Najvažniji i najteži korak je potvrđivanje ograničavajućih faktora rasta. Dodatno, poboljšana procjena ASF-a rezultira poboljšanom preciznošću koja pomaže prijammiku u otkrivanju pogrešaka odabira Loran ciklusa. Nedostatak tehnike je taj što procjena ima važnost samo za kombinaciju postaje Loran korištene prilikom izrade procjene i u blizini lokacije na kojoj je procjena generirana. Procjena ASF-a u domeni raspona pruža mnogo korisnije rješenje.⁵³

Sustav e-Loran bio je u razvoju do 2020. godine. Prva e-Loran postaja od siječnja 2008. odašilje e-Loran poruke s vrijednošću GRI = 67.310 i kašnjenjem emisije od 27.300. E-Loran poruke koje šalje jesu Eurofix poruke i sadrže Loran diferencijalne informacije, diferencijalni GPS te informacije o cjelovitosti referentnih podataka univerzalnog vremena. Glavne prednosti sustava e-Loran jesu građanska kontrola; naime e-Loran signal nije namjerno degradiran kao što je to slučaj kod GPS sustava. Prednost e-Lorana ogleda se u sinkroniziranom prijenosu univerzalnog vremena nezavisnom metodom iz satelitskih navigacijskih sustava. Ako je emisija e-Loran sinkronizirana s istim izvorom univerzalnog vremena kao i kod satelitskih sustava, signal e-Lorana može se koristiti u kombinaciji sa signalom satelitske navigacije. Također, e-Loran signal se može primati u zonama koje satelitski sustav ne pokriva; prijenos signala u stvarnom vremenu (ispod 10 sekundi) o pojavi nekih grešaka ili gubitku integriteta signala, a ponovljiva preciznost pozicioniranja je dobra. Uz sustav Loran-C, e-Loran u svom sastavu signala ima i podatkovni kanal koji osigurava primjenu specifičnih korekcija, cjelovitost informacija i status sustava upozorenja. Naime, troškovi realizacije i održavanja manji su od troškova satelitskih sustava a može se koristiti za osiguranje diferencijalnih korekcija za satelitske sustave. Dakle neke od najznačajnijih prednosti e-Loran sustava je da koristi signal velike snage i gotovo ga je nemoguće ometati dok je GPS stabilan i precizan sustav ali i ranjiv na takve utjecaje. Tablica 4. prikazuje kratki sažetak usporedbe GPS sustava i e-Lorana.

⁵³Peterson, B., Lo, S. C., Enge, P.K.: **Integrating Loran and GNSS for Safety of Life Applications**, <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.182.3613&rep=rep1&type=pdf>(07.08.2022)

Tablica 4. Usporedna analiza GPS signala i satelitskog sustava e-Loran

GPS	E-LORAN
lako ga je blokirati/krivotvoriti	teško ga je blokirati/krivotvoriti
frekvencijska raznolikost L pojasa	zaštićen niskofrekventni spektar
prijenos male snage	prijenos velike snage
osjetljiv na blokadu	neranjiv na ometanje
potrebna mu je vanjska antena	signal prodire u podzemlje i unutrašnjost

Izvor: Bosneagu, R.: **GPS Versus eLoran**, Mircea cel Batran - Naval Academy Scientific Bulletin, Vol. 19., Iss 2., 2016., p.27

Iz prikazane tablice vidljive su brojne prednosti e-Loran sustava naspram sustava GPS sustava. Dakle, poboljšanja sustava Loran odgovaraju na potrebu razvoja sustava kao zamjene za scenarije u kojima GPS sustav nije dostupan ili je degradiran. Sljedećim potpoglavljem daje se uvid u nove verzije i nadogradnju u obliku diferencijskog e-Loran sustava.

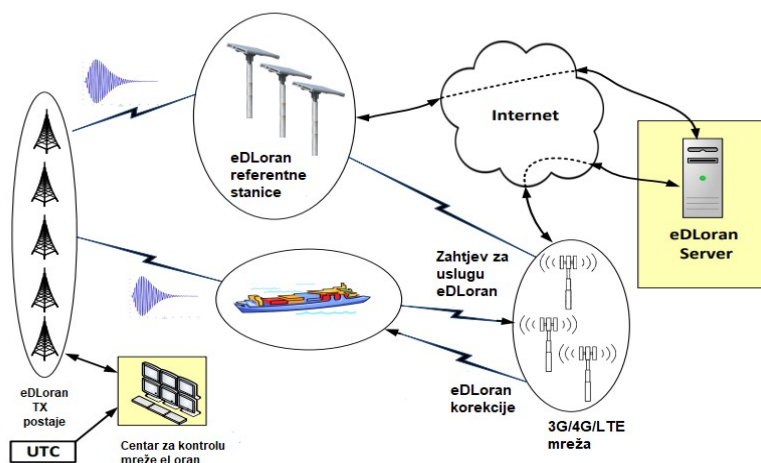
4.4. NOVE VERZIJE I NADOGRAĐNJA

Kako bi se postigla visoka točnost s e-Loranom, prijamnik ispravlja pronađenu poziciju podacima iz ASF baze podataka koji su pohranjeni u memoriji prijarnika. Iako je rezultirajuća točnost prilično dobra, nije primjerena za vrlo zahtjevne primjene poput upravljanja brodovima u opasnim vodama. Stoga takozvane referentne stanice mjere odstupanja od pohranjene ASF baze podataka koja su uzrokovana sporim promjenama vremenskih uvjeta i mogućim malim, ali prilično brzo promjenjivim vremenskim pogreškama u e-Loran odašiljačima. Ova ASF odstupanja šalju se mobilnom mrežom od referentne stanice do poslužitelja e-DLoran koji zauzvrat te podatke čini dostupnima korisniku, opet putem mobilne mreže.

Inteligencija e-DLoran mreže nalazi se na serveru u zaštićenom prostoru. Sve referentne stanice šalju svoja mjerenja ovom poslužitelju koji stoga može izračunati najbolje moguće korekcije za korisnika na svojoj trenutnoj lokaciji. Nadalje omogućuje praćenje svih referentnih stanica kao dio kontrole integriteta e-DLorana. Sve referentne stanice također su opremljene GPS prijarnikom za praćenje ispravnosti izlaza položaja. To nudi okidač GPS alarma u slučaju ometanja ili prijevare koji se može proslijediti

korisnicima u tom području. To također može pomoći vlastima da brzo lociraju i onesposobe izvor uznemiravanja.⁵⁴

E-DLoran infrastruktura nije povezana ni s jednom e-Loran odašiljačkom stanicom i radi potpuno autonomno. Referentna stanica e-DLoran je svojom vezom na mrežu povezana sa središnjim e-DLoran serverom. Izmjerene pozicije ovih referentnih prijamnika obrađuju se u e-DLoran poslužitelju, koji zatim rezultate šalje korisniku, također putem interneta. Kašnjenje podataka neće biti dulje od 2 sekunde. Korisnik započinje cijeli proces tako što kao klijent šalje neobrađenu poziciju poslužitelju koji će zatim pronaći optimalne korekcije za tu poziciju. Ispravci se mogu izračunati korištenjem podataka s više referentnih postaja. Referentne stanice za e-DLoran su male i ne troše više od 10 W. U razvoju su dvije vrste referentnih stanica. Prijenosna jednostavna verzija na baterije, ne veća od 2 metra, može raditi 8 sati. Za trajnu instalaciju također je u razvoju solarna jedinica koja može raditi kontinuirano.



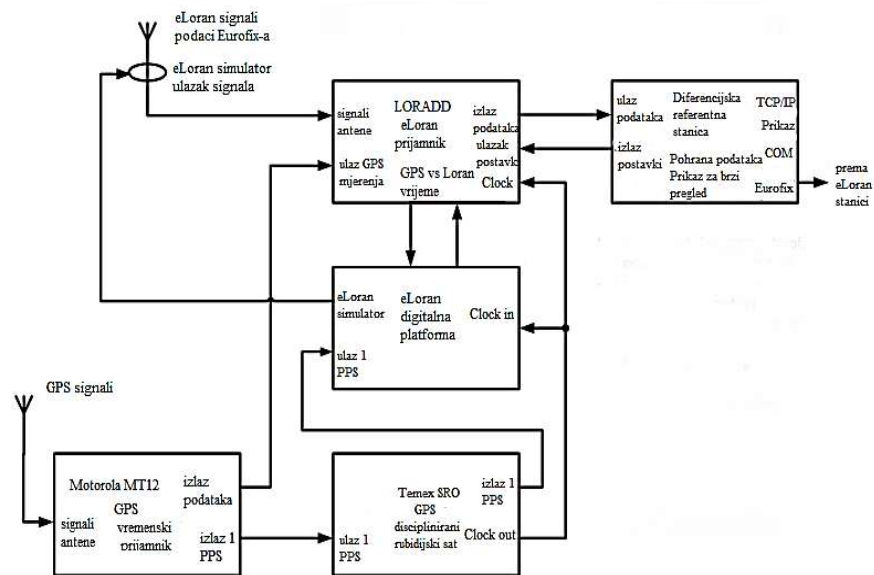
Slika 18. Koncept e-DLoran sustava

Izvor: Willigen, D., Kellenbach, R., Dekker, C., Buuren, W.: eDLoran – next generation of differential Loran, [https://rntfnd.org/wp-content/uploads/eDLoran-Reelektronika-Paper.pdf\(02.09.2022\)](https://rntfnd.org/wp-content/uploads/eDLoran-Reelektronika-Paper.pdf(02.09.2022))

D-Loran ASF koncept mjernog prijamnika koristi Rubidium (Rb) satove i njime se mjere pomaci položaja zbog učinaka ASF-a, a referentni poslužitelj e-DLoran ispisuje položaj umjesto korekcija pseudoudaljenosti. Mjerenje položaja puno je jednostavnije, točnije i može se obaviti standardnim minijaturnim e-Loran prijemnicima male snage. Povezani troškovi također su znatno niži. Dobitak u točnosti ovog jednostavnijeg ASF

⁵⁴Reelektronika: eDLoran, URL: <http://www.reelektronika.nl/manuals/edloran-flyer.pdf> (02.09.2022)

mjernog prijammnika zajedno s vrlo malom latencijom podataka jedan je od razloga što je rezultirajuća točnost položaja e-DLorana sada približno 5 metara umjesto 10 metara s D-Loranom.⁵⁵ Aplikacija za ulazak u pomorsku luku i prilaz (engl. *Harbour Entrance and Approach Application*– HEA) zahtijeva najbolje performanse koje e-Loran može pružiti. Kako bi se ispunio zahtjev točnosti HEA-e, osnovni sustav e-Loran mora biti proširen diferencijalnom uslugom e-Loran i ASF kartom koja omogućuje istraživanja lučkog područja. Karta ASF-a daje nominalne vrijednosti ASF-a duž putanje prilaza luci za sve relevantne postaje e-Loran, dok podatkovni kanal Loran pruža diferencijalne korekcije za ispravljanje odstupanja od objavljenih nominalnih ASF-ova. Mjerenjem osnovnih e-Loran signala i ispravljanjem mapirane ASF vrijednosti za njegovu trenutnu lokaciju putem primljenih diferencijalnih korekcija, korisnički prijammnik biti će sposoban izračunati e-Loran pozicijsko rješenje koje pruža najbolju izvedbu pozicioniranja koju e-Loran može ponuditi.⁵⁶ Slika 19. prikazuje funkcionalni dijagram diferencijalne e-Loran referentne stanice.



Slika 19. Funkcionalni dijagram diferencijalne e-Loran referentne stanice

Izvor: Reelektronika: **Differential eLoran Reference Station**, URL:

http://www.reelektronika.nl/documentation/reelektronika_Differential_eLoran_Specs.pdf (02.09.2022)

⁵⁵Willigen, D., Kellenbach, R., Dekker, C., Buuren, W.: **eDLoran – next generation of differential Loran**, <https://rmtfnd.org/wp-content/uploads/eDLoran-Reelektronika-Paper.pdf> (12.08.2022)

⁵⁶Reelektronika: **Differential eLoran Reference Station**, URL: http://www.reelektronika.nl/documentation/reelektronika_Differential_eLoran_Specs.pdf (02.09.2022)

Diferencijalna e-Loran referentna stanica instalirana je na fiksnoj lokaciji s poznatim nominalnim ASF vrijednostima za sve e-Loran stanice od interesa. Uspoređujući trenutno izmjereno vrijeme dolaska s očekivanim vremenom dolaska na temelju udaljenosti prema odašiljaču i nominalnom ASF-u, referentna stanica izračunava diferencijalne korekcije, koje se priopćuju mreži e-Loran za distribuciju. Kako bi se postigla najbolja moguća točnost korekcije, referentna stanica je opremljena e-Loran simulatorom za kontinuiranu kalibraciju putova obrade signala. Dodatno, referentna stanica pruža nadzor horizontalnog pozicioniranja integriteta na licu mjesta na izračunatim korekcijama radi zaštite integriteta HEA aplikacije.

5. ZAKLJUČAK

Danas se brodovi kod određivanja svoje pozicije najčešće koriste GPS sustavom i nemaju rezervni navigacijski sustav. Ako brodski GPS sustav prestane funkcionirati, riskiraju nasukanje ili sudar s drugim plovilima. Naime, brodovi u potpunosti ovise o GPS sustavu za svoju navigaciju; ako GPS pogriješi, mogućnost nesreće je vrlo velika i može postati veliki problem na prometnim pomorskim rutama. Sve je veća svijest u pomorskom svijetu da nijedan pojedinačni sustav ne može pružiti međunarodno standardiziranu uslugu pozicioniranja, navigacije i mjerenja vremena (PNT) otporan u svim okolnostima. Trenutno se GPS koristi na većini komercijalnih plovila, a u mnogim slučajevima integriran je u sustave za koje se nije očekivalo da će zahtijevati ili koristiti GPS izvedenu poziciju ili vrijeme. Iako GNSS sustavi pružaju određenu otpornost, temeljna odnosno satelitska tehnologija ostaje ista, samo pruža relativno slabe signale iz svemira.

E-navigacija je potencijalni pokretač novih aplikacija za ispunjavanje novih i budućih zahtjeva za pomorsku navigaciju. Naime, e-navigacija ima potencijal pružiti izravne koristi korisnicima kroz poboljšane operativne mogućnosti i također smanjiti naknade za laku upotrebu. Prednosti e-navigacije mogle bi biti ozbiljno narušene mjerama koje bi se morale poduzeti kako bi se izbjeglo ugrožavanje sigurnosti u slučaju kvara GNSS sustava koji je bio jedini izvor ulaznih podataka o položaju broda.

E-Loran sustav se smatra održivim sustavom za podršku GPS sustavu. To je PNT sustav koji je testiran i može pružiti multimodalnu sigurnosnu kopiju za većinu PNT usluga koje pruža GPS sustav. E-Loran je zemaljski sustav za navigaciju i mjerenje vremena niske frekvencije (100 kHz). Odašiljači su organizirani u lance, s jednom glavnom stanicom i nekoliko sekundarnih stanica u svakom lancu. Glavna stanica odašilje devet impulsa, a sekundarne stanice odašilju osam impulsa odjednom. E-Loran omogućuje korisnicima GNSS sustava da zadrže sigurnost, zaštitu i ekonomske prednosti GNSS sustava čak i kada su njihove satelitske usluge u prekidu. E-Loran koristi pulsirajuće signale dizajnirane kako bi omogućili prijammnicima da razlikuju komponente zemaljskog vala i satelita. Na ovaj način, e-Loran signali se mogu koristiti na vrlo velikim udaljenostima bez slabljenja ili nesigurnosti u vremenu dolaska. S uvedenom tehnologijom e-Loran, pomorska industrija može biti zaštićena od ometača u doglednoj budućnosti. S tri odašiljača, e-Loran može osigurati točnost horizontalnog pozicioniranja ispod 10 metara i sinkronizaciju univerzalnog vremena unutar 50 nanosekundi.

POPIS LITERATURE

KNJIGE

1. Benković, F. et.al.: **Terestrička i elektronska navigacija**, Hidrografski Institut Ratne Mornarice, Split, 1986.
2. Bowditch, N.: **The American Practical Navigator: An Epitome of Navigation**, DMAHT Center, 1995.

ČLANCI

1. Arsenault, A. N., Boyer, J. M.: **LORAN-C Recapitalization Project (LRP)**, Proceedings of the 57th Annual Meeting of The Institute of Navigation, 2001, p. 346-355.
2. Balov, A. V.: **Radio navigation, present and future**, Gyroscopy and Navigation, Vol. 1, 2010., p. 224–235
3. Bosneagu, R.: **GPS Versus eLoran**, Mircea cel Batran - Naval Academy Scientific Bulletin, Vol. 19., Iss 2., 2016., p. 23-27
4. Czaplewski, K., Weintrit, A.: **The Identification of Possible Applications of the e-Loran System**, Annual of Navigation, Vol. 25., 2018., p.165-186
5. Griffioen, J.W., Oonincx, P.J.: **Suitability of Low-Frequency Navigation Systems for Artillery Positioning in a GNSS Denied Environment**, The Journal of Navigation, Vol. 66, 2013., p. 35-48
6. Hartshorn, L., Swaszek, P.F., Johnson, G., Wiggins, M.: **Performance of Loran-C 9th Pulse Modulation Techniques**, U.S. Coast Guard Academy, London, p. 1-14
7. Johnson, G.et.al.: **An Evaluation of eLoran as a Backup to GPS**, Technologies for Homeland Security, 2007 IEEE Conference on Project: eLoran, 2007., p. 1-6
8. Kos, T., Grgić, M., Krile, S.: **Hiperbolni i satelitski sustavi za navigaciju**, Naše more, Vol. 51, No. 5-6., 2004, p. 189-199
9. Lušić, Z., Kos, S., Krile, S.: **Strukturna analiza metoda pozicioniranja na moru**, Naše more: znanstveni časopis za more i pomorstvo, Vol. 55, No. 1-2, 2008., p. 3-17
10. Katulski, R.J., Sadowski, J., Stefanski, J., Siwicki, W.: **Hyperbolic Asynchronous Method of a Radio Navigation Technique**, Applied Science, Vol. 10., 2020., p. 1-29

11. Offermans, G., Bartlett, S., Schue, C.: **Providing a Resilient Timing and UTC Service Using eLoran in the United States**, Navigation – Journal of the Institute of Navigation, Vol. 64., Iss. 3., 2017., p. 339-349
12. W.N.Dean,"**ClarinetPilgrim System**,"Magnavox Technical Report FWD73-243, September 1973.
13. Willigen, D., Kellenbach, R., Dekker, C., Buuren, W.: **eDLoran – next generation of differential Loran**,<https://rntfnd.org/wp-content/uploads/eDLoran-Reelektronica-Paper.pdf> (02.09.2022)
14. Williams, C.: **Describing the Consol Navigation System in general terms**, International Hydrographic Review, Vol. 23., p. 66-69

IZVJEŠĆA I REZOLUCIJE

1. Cawley, J.: **Review of Marine Navigation Systems and Techniques – Technical Report**, Arthur D. Little Inc, 1965.
2. International Loran Association: **Enhanced Loran (eLoran) Definition Document**, Report Version: 0.1, 2007.
3. IMO: **Strategy for the Development and Implementation of e-Navigation** (MSC 85/26 Add.1 Annex 20). International Maritime Organization, London, 2008.
4. IMO Resolution A.915(22): Revised Maritime Policy and Requirements for a Future Global Navigation Satellite System (GNSS), URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.915\(22\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.915(22).pdf)(07.02.2023)
5. IMO Resolution A.1046(27): Worldwide Radionavigation System, URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1046\(27\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1046(27).pdf) (07.02.2023)
6. MarRINav – Maritime Resilience and Integrity in Navigation: **PNT R&I Technologies and Integration Report**, GLAResearch & Development, 2019.
7. United States Coast Guard: **LORAN-C User Handbook**, Washington, DC COMDTPUB P16562.6, 1994.

INTERNET

1. ArmedConflict:**Hyperbolic radio navigation system GEE**, URL: <https://www.armedconflicts.com/GEE-radio-navigation-system-t125976> (23.07.2022)
2. Ee3550: **The Transmission of GPS Signals**, URL: <https://ee3550-gps.weebly.com/transmission-of-gps-signals.html> (20.01.2023)
3. Hochheiser, J.: **Radio History: The Rise, Fall and Resurrection of LORAN**, URL: <https://blog.minicircuits.com/radio-history-the-birth-death-and-resurrection-of-loran/> (25.07.2022)
4. IALA: **The Technical Approach to Establishing a Maritime eLORAN Service**, Guideline G1125, 2017.
5. IMO: **E-navigation**, URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/eNavigation.aspx> (20.01.2023)
6. Loran-C Association: **The History of Loran**, URL: <https://loran.org/history-of-loran/> (07.02.2023)
7. Peterson, B., Lo, S. C., Enge, P.K.: **Integrating Loran and GNSS for Safety of Life Applications**, <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.182.3613&rep=rep1&type=pdf> (07.08.2022)
8. Pelgrum, W.J.: **New Potential of Low-Frequency Radionavigation in the 21st Century**, URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A90450409-f146-4c45-839c-a4b484f723ff> (07.02.2023)
9. Reelektronika: **eDLoran**, URL: <http://www.reelektronika.nl/manuals/edloran-flyer.pdf> (02.09.2022)
10. Reelektronika: **Differential eLoran Reference Station**, URL: http://www.reelektronika.nl/documentation/reelektronika_Differential_eLoran_Specs.pdf (02.09.2022)
11. TimeandNavigation: **Hyperbolic Systems**, URL: <https://timeandnavigation.si.edu/navigating-air/navigation-at-war/new-era-in-time-and-navigation/hyperbolic-systems> (23.07.2022)

12. Tomović, M.: **Utjecaj implementacije sustava e-navigacije**, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet, 2019.
13. The Royal Academy of Engineering : **Global Navigation Space Systems: reliance and vulnerabilities**, London, 2011.
14. Weintrit, A.: **Prioritized Main Potential Solutions for the e-Navigation Concept**, Gdynia Maritime University, Poland, 2013.

POPIS KRATICA

Kratika	Puni naziv na stranom jeziku	Tumačenje na hrvatskom jeziku
ABS	engl. <i>Automatic Blink System</i>	automatski trepereći sustav
AIS	engl. <i>Automatic Identification System</i>	sustav za automatsku identifikaciju
ASF	engl. <i>Additional Secondary Factor</i>	dodatni sekundarni faktor
AtoN	engl. <i>Aid to Navigation</i>	fizička pomagala za navigaciju
BeTS	engl. <i>Basic e-Loran Timing Service</i>	osnovna e-Loran vremenska usluga
BIMP	engl. <i>Binary Position Modulation Pulse</i>	binarni impuls modulacije položaja
CRI	engl. <i>Cross Rate Interference</i>	unakrsne interferencije
DGPS	engl. <i>Differential Global Positioning System</i>	diferencijski GPS sustav
eLoran	engl. <i>Enhanced Long Range Navigation</i>	poboljšana navigacija dugog dometa
ECDIS	engl. <i>Electronic Chart Display and Information System</i>	sustav za prikaz elektroničkih karata i informacijski sustav
ENC	engl. <i>Electronic Navigational Chart</i>	elektroničke navigacijske karte
GNSS	engl. <i>Global Navigation Satellite System</i>	globalni navigacijski satelitski sustav
GPS	engl. <i>Global Positioning System</i>	globalni sustav pozicioniranja
GRI	engl. <i>Group Repetition Interval</i>	impulsi grupnog intervala ponavljanja
HEA	engl. <i>Harbour Entrance and Approach Application</i>	aplikacija za ulazak u pomorsku luku i prilaz
RAIM	engl. <i>Receiver Autonomous Integrity Monitoring</i>	moćnost autonomnog nadzora integriteta prijemnika
LOP	engl. <i>Lines of Position</i>	Linije položaja
LCCS	engl. <i>Loran Consolidated Control System</i>	Loran konsolidirani sustav kontrole
LDC	engl. <i>Loran Data Channel</i>	Loran podatkovni kanal
MOSP	engl. <i>Minimal Operation System Performance</i>	minimalni standardi operativnih performansi
PCI	engl. <i>Phase Code Interval</i>	interval faznog koda
NMEA	engl. <i>National Marine Electronics Association</i>	Nacionalna asocijacija brodske elektronike
PF	engl. <i>Primary Factor</i>	primarni faktor
PeTS	engl. <i>Precision eLoran Timing Service</i>	precizna e-Loran vremenska usluga
PNT	engl. <i>Positioning, Navigation and Timing</i>	usluga pozicioniranja, navigacije i mjerenja vremena
PSK	engl. <i>Phase Shift Keying</i>	fazni pomak
PPS	engl. <i>Precision Positioning Code</i>	kod za precizno pozicioniranje
SDR	engl. <i>Software Defined Radio</i>	softverski definiran radio
SNR	engl. <i>Signal to Noise Ratio</i>	omjer signal-šum
SF	engl. <i>Secondary Factor</i>	sekundarni faktor
TOA	engl. <i>Times of Arrival</i>	vrijeme dolaska
UT	engl. <i>Universal Time</i>	univerzalno vrijeme
VTS	engl. <i>Vessel Traffic Services/Management</i>	služba nadzora prometa
WWRNS	engl. <i>World Wide Radionavigation System</i>	Svjetski radionavigacijski sustav

POPIS ILUSTRACIJA

POPIS TABLICA

Tablica 1. Zahtjevi za GNSS sustave (na temelju IMO A.1046 (27) i IMO A.915(22))	22
Tablica 2. Koristi od uvođenja e-navigacije.....	39
Tablica 3. Prednosti upotrebe e-Loran sustava u pomorstvu	43
Tablica 4. Usporedna analiza GPS signala i satelitskog sustava e-Loran.....	47

POPIS SLIKA

Slika 1. Hiperbolni lanac.....	5
Slika 2. Način rada Consol sustava.....	8
Slika 3. Prikaz signala triju stanica u DECCA sustavu	9
Slika 4. Primjer signala GEE sustava	10
Slika 5. Prikaz Chayka pulsnih signala u usporedbi s američkim Loran-C pulsnim signalima	12
Slika 6. Područje pokrivenosti Loran-C sustava	15
Slika 7. Struktura e-Loran signala i frekvencijski spektar	19
Slika 8. BeTS područje pokrivenosti korištenjem e-Loran signala s četiri odašiljača snage 1 MW	24
Slika 9. Prikaz modulacije odašiljanja podataka devetim impulsem.....	26
Slika 10. Konstelacija signala za 8-PSK.....	27
Slika 11. Niskopropusni ekvivalentni signali na kompleksnoj ravnini (jedna gruba grupa)	28
Slika 12. Šest najbližih signala.....	29
Slika 13. Prikaz signala GPS sustava	30
Slika 14. Područje pokrivenosti jedinice za ometanje GPS sustava na 25 m iznad razine tla pri maksimalnoj snazi od 1.58 W	32
Slika 15. Prikaz položaja jedinica bez i sa uključenim GPS ometanjem.....	34
Slika 16. Potencijalne komponente procesa implementacije e-navigacije	41
Slika 17. e-LORAN odašiljači u sjeverozapadnoj Europi	45
Slika 18. Koncept e-DLoran sustava	48
Slika 19. Funkcionalni dijagram diferencijalne e-Loran referentne stanice	49

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1. Model spektra snage e-Loran signala.....20