

АСТРОНАВИГАЦИЯТА – НЕОБХОДИМАТА АЛТЕРНАТИВА НА GNSS

Август Богданов Панов

 [0000-0001-7524-5190](https://orcid.org/0000-0001-7524-5190)

[Scopus Author ID: 57201349614](#)

Висше военноморско училище „Никола Йонков Вапцаров“ -
Варна, България

Резюме: Глобалните сателитни навигационни системи (GNSS) са единствен източник на непрекъсната информация за позициониране и точно време на множество брегови и корабни навигационни комплекси. Но целостта и работата на GNSS са обект на редица природни и техногенни рискове. Необходим е независим, резервен източник за позициониране. Към момента единствено астронавигационните методи може да се разглеждат като пълноценна алтернатива.

Ключови думи: безопасност, ГНСС, астронавигация, автоматизация.

ASTRONAVIGATION – INDISPENSABLE ALTERNATIVE OF GNSS

Avgust Bogdanov Panov

 [0000-0001-7524-5190](https://orcid.org/0000-0001-7524-5190)

[Scopus Author ID: 57201349614](#)

Nikola Vaptsarov Naval Academy - Varna, Bulgaria

Abstract: Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are the only source of continuous PNT information for many coastal and ship-based integrated systems. The integrity and performance of GNSS are subject to a number of natural and techogenic risks. An independent, backup positioning source is required. Currently, only Astronavigation methods are full-fledged alternative.

Keywords: Safety, GNSS, Astronavigation, Celestial navigation, Automation.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременното развитие на технологиите доведе до коренна промяна в методите на модерната навигация и използваното оборудване с цел подобряване на безопасността като отреди на астронавигацията поддържаща роля. Безспорният успех и широкото използване на GPS доведе до изоставянето на други радио-електронни системи и създаването на нови, навигационни спътникови комплекси.

GNSS (Глобална навигационна спътникова система) е стандартният общ термин за сателитни навигационни системи, които осигуряват автономно геопространствено позициониране с глобално покритие [9]. GNSS включва GPS, GLONASS, Galileo, Beidou и други регионални системи. В съвременното корабоводене GNSS приемниците могат да получават сигнали от различните системи едновременно. Предимството на достъпа до множество сателити е точността и наличността на радиосигнал за навигационни нужди непрекъснато, по всяко време и метеорологични условия. Използването им в съвременното корабоплаване е обект на регламентиране и регулиране от Международната морска организация (IMO) [4]. Изискванията към GNSS са очертани в Резолюция А.860(20), още през 1997 г. [18][3].

Информацията за позицията и текущото време са от ключово значение в морските електронни информационни системи [1]. Услугите на GNSS обаче могат да бъдат прекъснати в следствие на неизправност, техногенни или кибер-атаки [29].

2. УЯЗВИМОСТ НА GNSS

През 2001 г. центърът Volpe на Министерството на транспорта на САЩ [39] провежда проучване на уязвимостта от умишлена и непреднамерена намеса на транспортната инфраструктура на САЩ, разчитаща на сигналите на Глобалната система за позициониране (GPS). В подготовката за проекта Galileo също са осъществени редица анализи [35][37]. През 2017 г. Правителството на Обединеното кралство анализира въздействието върху обществото от загубата на GNSS услуги за пет дни [32]. Изводите от този доклад са загуби от преки и косвени щети за морския транспортен сектор в размер на 1,1 милиарда паунда.

Тези проучвания очертават сериозна уязвимост на глобалните навигационни спътникови системи (GNSS) към редица умишлени и непреднамерени смущения [29]. Нарастващото използване и вграждане на GNSS устройства, включително в автоматичните системи за идентификация (AIS) [1], подчертава значението на обективното разглеждане на възможните области на уязвимост и обмислянето на мерки за намаляване или смекчаване на тези ефекти.

Стратегията на IMO за електронна навигация [8] определя изискванията за базите данни и системна цялост: *„Системите за електронна навигация трябва да бъдат устойчиви, сигурни и надеждни в предоставянето на валидни, правдоподобни и цялостни данни, в условията на осигурена непрекъснатост.*

Трябва да се вземат предвид изискванията за резервен начин, особено по отношение на системите за фиксиране на позицията.“

3. ПРИЧИНИ ЗА УЯЗВИМОСТТА

Някои режими на повреда са общи за всяка електронно-навигационна система. Целостта може да се наруши поради умишлено или случайно увреждане на наземната инфраструктура.

Предвид военния характер на повечето GNSS - GPS, GLONASS и BeiDou, може да се предположи, че нивата на сигурност са високи и че е осигурено оборудване в режим на „готовност“ [13] [14][15]. Опитът с NavStar (GPS) потвърждава този извод и подобно събитие може а priori да се приеме за много рядко. Мерките за сигурност на системата Galileo са сравними с тези за GPS, с изключение на това, че спътниците не са проектирани да издържат на електромагнитни импулси от ядрени експлозии [35].

GNSS са особено податливи на случайни или злонамерени смущения поради изключително ниското ниво на сигнала в потребителския приемник [19][20]. Неволните източници на смущения или прекъсвания в експлоатацията включват:

- йоносферна променливост и ефектите на слънчевата активност;
- силни сигнали, хармоници или интермодуляционни продукти от мощни предаватели, работещи в други честотни ленти или от източници, в близост до GNSS приемника.

Умишлените причини за смущения включват излъчването на теснолентови или широколентови заглушаващи сигнали. Докладът на Volpe [39] също идентифицира като опасност „spoofing“, при която се излъчва фалшив GNSS сигнал с намерение да заблуди потребителя.

Повреда на електронно оборудване на борда на кораб не е необичайно след прекъсване на захранването или временен или постоянен дефект в приемника или антената. Мерките за противодействие на тези проблеми са еквивалентни на решенията за други бордови системи - използването на резервни захранвания (изискване на SOLAS) и спазване на указанията за инсталиране и намиране на неизправности. По-рядко наблюдаван режим на повреда е трайното или временно изключване на антените на приемника на GNSS, подложени на радарно излъчване с висока мощност, поради микровълново увреждане или насищане на вътрешните компоненти [40].

Широкото въвеждане на GNSS доведе до тенденция да се разчита основно и с предоверяване на електронните системи, в частност ECDIS [5] и с нежеланието да се използват алтернативни методи и средства за проверка на местоположението [23][36], както е препоръчано от Международната морска организация (IMO) [6].

Заглушаването (Jamming) на GNSS сигнали може да се постигне лесно, чрез използване на сравнително евтино оборудване. Изключително ниските нива на мощност на сигналите на земната повърхност (минимум - 160 dBW за GPS, - 154 dBW за Galileo), са предпоставка за това [17][18].

Подправянето (Spoofing) е по-трудно постижимо – необходими са симулирани сигнали за превключване на приемника към фалшифицираното излъчване. Последиците от Spoofing са далеч по-сериозни от тези на заглушаване. Услуга за удостоверяване като тази, предложена за Galileo, би могла да бъде ефективно противодействие на фалшифицирането. Предвид относителните

трудности при заглушаване и подправяне, по-вероятно е да се очаква заглушаване.

Корабоплаването е силно уязвимо от въздействието на смущения в GNSS. Това рефлектира директно върху навигационното оборудването, AIS и GMDSS [17]. Предоставянето на услугите за AtoN (Aids to Navigation) може да бъде засегнато по отношение на синхронизирани с DGNSS (Differential GNSS), VTS (Vessel Traffic Systems) и GNSS управлявани фарове, створни знаци и друго оборудване за управление на морския трафик и фарватери [16][13]. Сигналите на GNSS могат да бъдат заглушени в голяма област с висока плътност на трафика [29].

Морската администрация на САЩ и Американската Брегова Охрана разпространи през 2020 и продължава текущо за 2021 да поддържа специален бюлетин за „значителни смущения“ в предоставянето на навигационна информация от системата GPS в целият свят. Регистрираната пълна липса на сигнал е в интервала 30 мин до 10 часа. Разгледано на годишна база, това е 1-2 % от времето за предоставяне на услуги по позициониране, положение в пространството и точно време [27][28].

Най-силно засегнати са районите на Средиземно море, Черно море и Южно Китайско море – места с интензивен и силно наситен морски трафик.

4. АНАЛИЗ НА РИСКА

Анализирането на риска от загуба на GNSS услуги е трудна задача [2]. Потребителят може да забележи, че сигналът е загубен за определен период и след това се е възстановил, но не е възможно да

се определи причината: дали е външна, или местна (на борда на кораба) намеса, случайна или умишлена.

Последиците за навигационните приложения могат да варират от показване на невярна информация за местоположението до периодична загуба и влошаване на точността. При приложенията, изискващи точно време, може да се прояви блокиране или дори цялостен разпад на системата, поради загуба на синхронизация.

В Таблица 1 са показани оценки на различните рискове по отношение на тяхната възприемана вероятност за възникване, последствията им и трудността и цената за тяхното отстраняване или намаляване на щетите. Предложената информация е разработена от Международната Асоциация на Фаровите Администрации – IALA [13].

Таблица.1 Анализ на риска от загуба на GNSS услуги

Риск	Вероятност	Последиствия	Смекчаващи действия/Цена
Вътрешносистемни проблеми на GNSS	Н	В	В
Загуба на захранване	С	В	Н
Повреда на приемник/антена	С	В	Н
Смущения на борда	С	С	Н
Външни смущения	Н	В	С
Йоносферни аномалии	Н	С	С
Jamming	С/В	В	С
Spoofing	Н	В	В
Радарни смущения	Н	В	С

***В** = Високо. Висока вероятност означава: възможност да се срещне повече от веднъж годишно. Пълна загуба на използване на системата. Висока трудност или цена на смекчаване означава, че е малко вероятно да бъде постигната.*

***С** = средно. Средна вероятност означава: възможност да се срещне по-малко от веднъж годишно. Средно последствие означава, че системата все още може да се използва, но е деградирала. Средна трудност или цена означава постижимо при значителни разходи.*

***Н** = ниско. Ниска вероятност означава: малко възможно да се срещне и/или прояви. Ниска трудност или цена означава постижимо смекчаване.*

5. ОГРАНИЧАВАНЕ НА ПОСЛЕДСТВИЯТА ОТ ЗАГУБАТА НА GNSS УСЛУГИ

Направеният анализ на риска помага да се идентифицират заплахите, особено тези с голяма вероятност, сериозни последици и ниски разходи за смекчаване.

Използването на GNSS приемници и оборудване, съвместимо с най-новите стандарти, значително ще намали чувствителността към смущения [21][22]. Промените в дизайна на бъдещите системи [25] като по-голяма мощност на излъчване, повишена сложност на приемника и добавени работни честоти, могат да послужат за смекчаване на въздействието на някои от заплахите до известна степен.

Но уязвимостта, особено при умишлена техногенна или кибер атака, не може да бъде напълно отстранена. Този извод ясно е

повторен няколко пъти в цитираните изследвания. Модификацията на използваните в момента системи може да намали значително само ефекта от естествени и непреднамерени източници на шум и смущения.

Опитите за заглушаване или манипулация на услугите за позициониране и точно време на GNSS са много трудни за предвиждане и борба. Поддържането и развитието на адекватни алтернативни системи е от съществено значение [24].

Внимателният анализ на сериозната уязвимост и реалната заплаха за безопасността на корабоплаването [29], очертава като единствена алтернатива, в условията на навигационна аварийност от загуба на сигнал или нестабилна работа на GNSS в открито море, прилагането на методите на морската астронавигация.

Доказаната им независимост от скъпоструващи устройства и автономно определяне на местоположението на кораба дават необходимото решение [8].

6. АСТРОНАВИГАЦИОННИТЕ МЕТОДИ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОМК КАТО АЛТЕРНАТИВА НА GNSS

Астронавигацията често е пренебрегвана като алтернатива на GNSS поради недостатъците на традиционните методи с използването на секстант, специализирани издания, сложен математически апарат и трудоемки изчисления [26]. Астронавигационните методи се основават на наблюдения на астрономически тела – обекти с известни позиции в стандартна, небесна референтна рамка за определяне на местоположението на обект в стандартна, земна референтна рамка [24]. Различните

астронавигационни методи могат да бъдат групирани в три общи категории:

- *традиционни, ръчни методи*, изискващи използване на морски секстант, съчетан с „ръчни“ процедури за планиране и изчисляване (т.е. ползване на отпечатани алманаси и формуляри);

- *традиционни, компютърни методи*, които също изискват използването на секстант, но планирането и изчисленията се извършват с помощта на софтуер;

- *напълно автоматизирани методи*, използващи някакъв вид автоматичен електронен секстант или звезден тракер за извършване на наблюдения, данните от които след това се подават към софтуер, който извършва изчисленията [8]; данните от електронна система, използваща тези методи, могат да се изпращат директно до други навигационни системи (напр. ECDIS) [1].

Класическите, традиционни, ръчни методи за астронавигация вече са загубили своята актуалност. По-нататъшното използване на Метода на Линиите на положението дори и след известно възможно ограничено оптимизиране, с използването на специализиран софтуер за изчисление (превръщайки го в традиционен, компютърен метод), не може да отговори на съвременните потребности и развитие на корабоплаването. В своето време той и другите методи, използващи сферична координатна система и тригонометричен математически апарат, са били истински революционни, доказали са многократно своята надеждност и сигурност, осигурявали са безопасността на корабоплаването повече от 100 г. Дали са сериозен тласък на развитието на корабоплаването и корабоплавателната индустрия.

Но времената се променят и при сегашното състояние на технологиите и бъдещото им развитие, са необходими качествено нови, удобни за електронна обработка и дистанционен обмен астронавигационни методи.

Международната морска организация промени Кодекса STCW [3] през 2010 г., относно обучението по астронавигация [23], като насърчи използването на електронен астрономически алманах и съвременен софтуер за изчисляване.

От началото на ХХІ век до момента, са предложени някои принципно нови математически алгоритми за решаване на уравненията на Кръгове на равните височини (КРВ).

През 2008 г. Андре Гонсалес анализира уравнението на КРВ в Декартова (триизмерно-правоъгълна) координатна система, за да приложи векторно изчисление за формиране на две уравнения на КРВ с три неизвестни за Определяне на мястото на кораба (ОМК) – този метод е многообещаващ поради удобният за електронна обработка математически апарат и не изисква разработката на специализиран софтуер [11].

През 2010 г. руските изследователи Василий Фогилев и Борис Вулфович представят съвременен итерационен метод за обработка на астронавигационните обсервации, удобен за електронни изчисления и лесен за вграждане изходен компютърен код [38]. Техният итерационен метод предоставя висока точност и надеждност на определянето на ОМК и е неотделима част от по-нататъшните разработки на други изследователи. По приложението на математическите итерации интерес представляват и разработките на Стивън Чапра [7] и Роберт Северънс [33].

През 2017 г. на основата на разработките на Майкъл Ърл [10] за векторно изчисление на плаване по ортодрома, изследователският екип Нгуен, Им и Дао предлага иновативна идея, известна като Азимутален метод за определяне на местоположението на кораба без необходимост от видим хоризонт и без секстант [30]. Там е използвана разработката на Красимира Стоилова и Тодор Стоилов, за решаване на инверсни матрици [34].

Използването на навигационния секстант в ежедневната корабоплавателна практика става все по-рядко. Необходимостта от създаването и внедряването на нови, автоматизирани системи и методи за обработка на астронавигационните обсервации се превръща в задължително условие.

Автоматизираните астронавигационни комплекси и приложените в тях технически и технологични решения не са новост за големите военно-морски флоти на Русия и САЩ [26]. Но те не се допускат за използване в търговското корабоплаване, въпреки ясната необходимост от това.

Изследванията и експерименталните разработки на такова оборудване за целите на световното търговско корабоплаване са на дневен ред [8]. Изхождайки от световният опит по внедряването и текущото приложение на ECDIS, е необходимо да бъдат очертани основните принципи за развитие и внедряване на бъдещите автоматизирани астронавигационни системи преди тяхното практическо разработване.

Към момента няма публикувани или предложени стандарти или изисквания към такива системи.

7. ИЗИСКВАНИЯ КЪМ КОРАБНИТЕ АВТОМАТИЗИРАНИ АСТРОНАВИГАЦИОННИ СИСТЕМИ (КААНС), ЗА ЦЕЛИТЕ НА ТЪРГОВСКОТО КОРАБОВОДЕНЕ.

Астронавигационните методи позволяват напълно автономно определяне на мястото на кораба.

Изграждането на КААНС би следвало да се основава на следните принципи:

- универсалност, гъвкавост, компактност, годност за инсталиране на кораб;
- осигуряване на възможност за автоматично измерване на няколко астронавигационни параметъра едновременно, в сложни метеорологични условия;
- при изграждането да се използват вече усвоени от индустрията компоненти;
- използване на модулен дизайн, позволяващ промени във функционалността;
- приложният софтуер на КААНС трябва да позволява автоматично (и като резервен способ ръчно) въвеждане и обработка на данните от обсервациите;
- ясен и логичен интерфейс;
- възможност за интегриране с други навигационни устройства и системи;
- цената на КААНС трябва да бъде приемлива за корабособствениците и корабните компании.

КААНС следва да решават следните навигационни задачи:

- автоматично формиране на равнината на изкуствен истински хоризонт;

- изчисляване на екваториалните и хоризонталните координати на небесните тела с цел насочване на измервателното устройство към светилото;
- насочване на измервателно устройство към небесни светила и измерване на астронавигационните параметрите в оптичния и радио-диапазон;
- обработване на цялата измерена астронавигационна информация в реално време, показване на резултатите от тази обработка и тяхното прехвърляне към други автоматичните системи;
- определяне на положението на плавателния съд, посоката на географския меридиан, корекции на системи и курсови устройства;
- определяне и съхраняване на точното време.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Съвременното корабоводене е белязано от изключителния напредък на технологиите във всички посоки. Безопасността и намаляването на навигационните произшествия също са повлияни от тях. Но нивото на аварийност на корабоплаването в световен мащаб бележи ръст. Част от причините са пряко свързани с услугите предоставяни от GNSS системите. За безопасно корабоводене, използването на астронавигационните методи за ОМК в случай на навигационна аварийност поради загуба на GNSS услуги в открито море е без алтернатива. Нуждата от качествено нови, удобни за електронна обработка и дистанционен обмен астронавигационни методи, е неизбежна необходимост.

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА:

- [1] АЛЕКСАНДРОВ Ч.И., ЦВЕТКОВ М.Й. *Информационни системи за управление на трафика на плавателните съдове VTMS*. Варна: ВВМУ“Н. Й. Вапцаров“, 2017. ISBN - 978-619-7428-02-5
- [2] ДИМИТРАКИЕВ, Д.Й. *Управление на морските транспортни дейности*. Варна: ИК Ларго сити; 2016. ISBN 978-619-7026-15-3
- [3] КАЛИНОВА, Е. Международни договори, свързани с безопасността на корабоплаването. Варна: *Годишник на ВСУ „Черноризец Храбър“*, Том XIV (2008), с.179-191. ISSN 1310-800 X
- [4] КАЛИНОВА, Е. Международни организации, свързани с безопасността на корабоплаването. Варна: *Годишник на ВСУ „Черноризец Храбър“*, Том XVII (2011), с.229-242. ISSN 1310-800 X
- [5] КОМИТОВ, Д.А. *Човешкият фактор при използването на ECDIS*. Online. E-Journal VFU (online), 2020. Available at:
[https://ejournal.vfu.bg/pdfs/Dimitar%20Komitov%20\(1\).pdf](https://ejournal.vfu.bg/pdfs/Dimitar%20Komitov%20(1).pdf)
- [6] BELEV, B.C. *A New Tendency in Evaluation the Ships Passage*. Online. Journal of Marine Technology and Environment (online). Vol.1 (2013). Available from:
<https://trid.trb.org/view/1260278>
- [7] CHAPRA, S.C., CANALE R.P. *Numerical methods for engineers*. Online. New York: Mcgraw-hill. 2011. ISBN 978-0-07-340106-5. Available at: <http://www.civilittee-hu.com/uploads/1/numerical/book6th.pdf>

- [8] DACHEV Y, PANOV A. Traditional navigation in e-Navigation context. *18th Annual General Assembly AGA*. Varna, vol.1 (2017), pp.106-15. ISBN 978-954-8991-98-8.
- [9] DACHEV Y. The satellite navigation systems: status, problems, future, Constanta: *Journal of Marine Technology and Environment*, Vol.1 (2015), pp. 23-28. ISSN 1844-6116.
- [10] EARLE, M. *Vector Solutions for Great Circle Navigation*. Online[paywall]. *Journal of Navigation*, vol. 58, no.3 (2005), pp. 451-457. DOI:10.1017/S0373463305003358. Available at: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-navigation/article/abs/vector-solutions-for-great-circle-navigation/9B7C04E4D756CD251D3BDAC0B79A4F7C>
- [11] GONZÁLEZ, A.R. *Vector Solution for the Intersection of Two Circles of Equal Altitude*. Online [paywall]. *Journal of Navigation* (online).. Vol.61, no.2 (2008), pp. 355-365. DOI 10.1017/s0373463307004602. Available at: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-navigation/article/abs/vector-solution-for-the-intersection-of-two-circles-of-equal-altitude/1B9366782026D1974155A15BDC8A804B>
- [12] GREGERSON C., BANGERT J., PAPPALARDI F. “*Celestial augmentation of Inertial Navigation Systems: A robust Navigation alternative*”. Online. U.S. Naval Observatory, Washington, DC (USNO) SPAWAR System Center, San Diego, CA (SPAWAR SYSCEN SD). 2000. Available at: <http://fer3.com/arc/img/123591.n104.pdf>

- [13] IALA, *R0129 (R-129) GNSS VULNERABILITY AND MITIGATION MEASURES*, Edition 3.1, 2012. Available at: <https://www.iala-aism.org/product/gnss-vulnerability-and-mitigation-measures-r-129/>
- [14] International Maritime Organization (IMO), *Resolution 915(22) Revised policy and requirements for a future GNSS*, 2012. Available at:
[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)
- [15] International Maritime Organization (IMO), *Resolution A.1046(27)World-wide Radio-navigation System*, 2003. Available at:
[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)
- [16] International Maritime Organization (IMO), *Resolution A.529(13)Accuracy standards for navigation*,1983. Available at:
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.529\(13\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.529(13).pdf)
- [17] International Maritime Organization (IMO), *Resolution A.694(17) General requirements for shipborne radio equipment forming part of the Global Maritime Distress and Safety System (GMDSS) and for electronic navigational aids*, 1991. Available at:
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.694\(17\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.694(17).pdf)
- [18] International Maritime Organization (IMO), *Resolution A.860(20) Maritime policy for a future Global Navigation Satellite Systems (GNSS)*, 1997. Available at:

[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.860\(20\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.860(20).pdf)

- [19] International Maritime Organization (IMO), *Resolution MSC.113(73) Adoption of the revised performance standards for shipborne GLONASS receiver equipment*, 2000. Available at:
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCSolutions/MSCS.113\(73\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCSolutions/MSCS.113(73).pdf)
- [20] International Maritime Organization (IMO), *Resolution MSC.115(73) Adoption of the revised performance standards for shipborne combined GPS/GLONASS receiver equipment*, 2000 Available at:
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCSolutions/MSCS.115\(73\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCSolutions/MSCS.115(73).pdf)
- [21] International Maritime Organization (IMO), *Resolution MSC.191(79) Performance standards for the presentation of navigation-related information on shipborne navigational displays*, 2004. Available at:
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCSolutions/MSCS.191\(79\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCSolutions/MSCS.191(79).pdf)
- [22] International Maritime Organization (IMO), *Resolution MSC.915(22) Revised Maritime policy and requirements for a future Global Navigation Satellite Systems (GNSS)*, 2001. Available at:
[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)
- [23] International Maritime Organization (IMO), *STCW/CONF.2/34, Resolution 2*, 2010. Available at:
<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/34.pdf>

- [24] KAPLAN G.H. *Alternatives to GPS*. Online[paywall]. In:Proc. MTS/IEEE Conference and Exhibition OCEANS. Vol.3 (2001), pp.1452-1459. ISBN:0-933957-28-9. DOI:10.1109/OCEANS.2001.968047. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/968047>
- [25] KOS, S., PUŠIĆ, D. & BRČIĆ, D., *Protection and Risks of ENC Data Regarding Safety of Navigation. Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*.Online. Google Books (online). 2011.
- [26] KYLE, C., USNavy. *Options in the Stars: Automated Celestial Navigation Options for the Surface Navy*. Online. Center for International Maritime Security (online). 13 December 2017. Available at: <https://cimsec.org/options-stars-automated-celestial-navigation-options-surface-navy/>
- [27] Maritime administration USA, *U.S. MARITIME ADVISORY 2020-016, Various GPS interference*, 2020. Available at: <https://www.maritime.dot.gov/msci/2020-016-various-gps-interference>.
- [28] Maritime administration USA, *U.S. MARITIME ADVISORY 2021-010, Various GPS interference*, 2021. Available at: <https://www.maritime.dot.gov/msci/2021-010-various-gps-interference>
- [29] MEDNIKAROV B, TSONEV Y, LAZAROV A. *Analysis of Cybersecurity Issues in the Maritime Industry*.Online. Information & Security (online).Vol.47, No.1 (2020), pp.27-43. Available at: <https://doi.org/10.11610/isij.4702>
- [30] NGUYEN, V.S, IM, N.K., DAO, Q.D. *Azimuth method for ship position in celestial navigation*.Online.International Journal of e-

Navigation and Maritime Economy (online).Vol. 7 (2017), pp. 55-62.
DOI 10.1016/j.enavi.2017.06.006. Available at:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405535217300219>

- [31] ROBERT W.S. *Overdetermined celestial fix by iteration*.
Online[paywall]. Journal of Navigation (online),Vol.36, No.4 (1989).
ISSN 0028-1522. DOI 10.1002/j.2161-4296.1989.tb01526.x.
Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/j.2161-4296.1989.tb01526.x>
- [32] S.J.HARDING, *Economic impact to the UK of a disruption to GNSS Showcase Report*. 2017. Available at:
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/619545/17.3254_Economic_impact_to_UK_of_a_disruption_to_GNSS_-_Showcase_Report.pdf
- [33] SEVERANCE.R.V.*Overdetermined celestial fix by iteration*.
Online[paywall]. Journal of Navigation (online),Vol.36, No.4 (1989).
ISSN 0028-1522. DOI 10.1002/j.2161-4296.1989.tb01526.x.
Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/j.2161-4296.1989.tb01526.x>
- [34] STOILOVA, K., STOILOV, T. *Decomposition Approach for Inverse Matrix Calculation*. Online. MATLAB - A Ubiquitous Tool for the Practical Engineer (online). 13 October 2011. DOI 10.5772/22355.
ISBN 978-953-307-907-3. Available at:
<https://www.intechopen.com/chapters/21945>
- [35] THE GALILEO SYSTEM SECURITY BOARD (GSSB). *Galileo Security Monitoring Center Developing Counter-Cyber Defenses and Responses*.Online. Inside GNSS - Global Navigation Satellite Systems Engineering, Policy, and Design (online). 22 September 2020.

Available at: <https://insidegnss.com/galileo-security-monitoring-center-developing-counter-cyber-defenses-and-responses/>

- [36] THE NAUTICAL INSTITUTE, *Bridge Team Management – A Practical Guide*, 2nd edition, 2018. ISBN 9781870077668
- [37] The Royal Academy of Engineering. *Global Navigation Space Systems: reliance and vulnerabilities*. 2017. ISBN 1-903496-62-4.
- [38] VULFOVICH B., FOGILEV V. *New Ideas for Celestial Navigation in the Third Millennium*. Online[paywall]. Journal of Navigation (online).. Vol. 63, no.2 (2010), pp. 373–378. DOI 10.1017/s0373463309990348. Available at: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-navigation/article/new-ideas-for-celestial-navigation-in-the-third-millennium/ED10E3869A160EF74ECC66F820CF52A0#>
- [39] WALLISCHECK, E., VOLPE, J. *GPS dependencies in the transportation sector : an inventory of Global Positioning System dependencies in the transportation sector, best practices for improved robustness of GPS devices, and potential alternative solutions for positioning and navigation*. Online. Bts.gov (online). 2016. Available at: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/12386>
- [40] WILLIAMS S. RADAR'd GPS Vulnerable to High-Power Microwaves. *GPS World*, April 2006, pp. 26-35. ISSN 1048-5104.