

SIGNAL TRANSMISSION ERRORS IN NAVIGATION OF AUTONOMOUS VESSELS

ПОХИБКИ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛУ В НАВІГАЦІЇ АВТОНОМНИХ СУДЕН

O. Volkov, PhD, assistant professor

О. М. Волков, к.т.н., доцент

National University «Odesa maritime academy», Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

The development of autonomous ships introduces significant challenges in ensuring navigation accuracy due to various signal errors. This study analyzes the primary sources of errors affecting navigation systems, including physical phenomena such as ionospheric disturbances, tropospheric refraction, and multipath effects caused by terrain or nearby objects. Additionally, technical issues such as satellite signal inaccuracies, geometric errors, and equipment faults are explored. These errors can compromise the precision of autonomous navigation, particularly in complex environments. The research emphasizes the need for integrating external correction sources and advanced signal processing techniques to minimize errors. Proposed solutions include the use of external reference systems, enhanced algorithms, and improved equipment calibration. By addressing these issues, the study aims to advance the reliability of autonomous navigation systems and ensure their safe operation in maritime environments. The findings contribute to the ongoing development of autonomous ship technology, providing insights into the optimization of navigation signal accuracy and error correction methods.

Keywords: autonomous ships, navigation systems, signal errors, ionospheric disturbances, tropospheric refraction, multipath effects, error correction, satellite navigation, maritime safety, autonomous navigation.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Автономні судна - це судна, які здатні виконувати різні морські операції з мінімальною або взагалі без людської взаємодії. Ця технологія має потенціал покращити безпеку, ефективність та екологічність морського транспорту, але також створює нові виклики та ризики для морської галузі. Тому надзвичайно важливо розуміти джерела та характер похибок сигналу, щоб забезпечити стабільну й точну навігацію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Однією з найважливіших систем управління рухом водних, наземних і повітряних об'єктів є інформаційно-вимірювальна система параметрів руху. Навігаційна система є її частиною, і призначена для визначення параметрів місцезнаходження у кожний момент часу. Сучасні навігаційні системи можна класифікувати на автономні системи навігації, що здійснюють судноводіння автономними засобами, встановленими на об'єкті, та неавтономні, які здійснюють свої функції за допомогою зовнішніх засобів наземного чи космічного базування. До автономних засобів можна віднести:
- інерційні засоби навігації чи інерційні навігаційні системи (ІНП);

- системи числення координат на базі систем вимірювання курсу, систем вимірювання шляхової швидкості щодо землі (дна), систем вимірювання швидкості судна щодо водного середовища та астрономічних систем, що дозволяють визначити місце розташування судна та його курс щодо справжнього меридіана в умовах видимості зірок.

Для здійснення безперервного визначення координат місцезнаходження судна за астрономічною системою необхідне комплексування її із вимірювачем колійної швидкості щодо морського дна. Перераховані засоби автономної навігації мають недостатню точність (не точніше за 1 морську милю за годину шляху). З метою підвищення точності вдаються до зовнішніх засобів корекції координат. До таких засобів можна віднести:

1) глобальні системи визначення координат рухомих об'єктів. Найбільш поширеними з яких є:

- супутникова навігаційна система GPS, ГЛОНАСС;
- радіотехнічна система наддальньої навігації Omega;

2) неглобальні системи:

- радіотехнічна система дальньої навігації Loran-C;
- радіотехнічні системи ближньої навігації, що працюють в діапазоні УКХ, типу маяків VOR/DME.

Однак радіотехнічні системи ближньої навігації для судноводіння застосовуються рідко та придатні при плаванні у водах Атлантики на трасах, що з'єднують Європу та США, а також при наближенні та вибуванні від морських портів за їх наявності. За інших випадках, крім річкового судноводіння, їх застосування проблематично.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Ця стаття має на меті проаналізувати основні похибки, які можуть виникнути при передачі сигналу на навігаційні системи автономних суден та шляхи зменшення таких похибок.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Основні види похибок сигналу. Під час навігації автономних суден важливу роль відіграє якість і точність переданих сигналів. Однак існує низка факторів, які можуть спричинити похибки, що впливають на коректність передачі даних. Ці похибки можна поділити на дві основні категорії: похибки, викликані фізичними явищами, та технічні похибки, пов'язані з роботою самих навігаційних систем.

Похибки через фізичні явища:

1. Атмосферні умови

- Іонізація: Іоносфера — це шар атмосфери, що містить заряджені частинки, які можуть взаємодіяти із сигналами супутників, сповільнюючи їх проходження та викликаючи викривлення. Цей ефект особливо значущий під час сонячної активності, коли в іоносфері спостерігаються сильні збурення. Це може призвести до затримки в передачі сигналу та похибок у визначенні місцезнаходження судна.
- Тропосферні впливи: У нижніх шарах атмосфери — тропосфері — теж виникають фактори, що впливають на сигнал. До них належать зміни температури, тиску та вологості, які спричиняють рефракцію (відхилення) супутникових сигналів. Хоча тропосферні впливи менш виражені, ніж іоносферні, вони також можуть бути джерелом похибок у передачі даних.

2. Вплив рельєфу на передачу сигналу Під час навігації в умовах складного рельєфу або в близькості до наземних об'єктів, таких як острови, узбережжя, або навіть великі судна, можуть виникати відбиття сигналів від цих об'єктів. Це явище називається мультипатчингом (відбиття сигналів), коли до приймача надходять кілька версій одного й того самого сигналу з різними затримками. Це може спричинити помилкове визначення положення судна або його швидкості.

Похибки в системах навігації:

1.Неточності супутникових сигналів. Навігаційні системи автономних суден часто покладаються на супутникові системи глобального позиціонування (GNSS). Однак ці системи не завжди надають ідеально точні сигнали. Це може бути пов'язано з дрейфом часу на супутниках, орбітальними відхиленнями або перешкодами в роботі приймачів сигналів на судні. Такі неточності можуть спричинити відхилення у визначенні точного положення судна, особливо в умовах відкритого океану, де супутникові дані є основним джерелом навігації.

2.Геометричні похибки. Геометричні похибки виникають через розташування супутників відносно автономного судна. Якщо супутники перебувають на невіддільних траєкторіях або розташовані близько один до одного з точки зору приймача на судні, це може погіршити точність навігації. Наприклад, при низькій геометричній розташованості супутників (низький показник DOP — Dilution of Precision) можливі значні похибки в обчисленні позиції, що знижує точність управління судном [3].

Технічні похибки та системні затримки. Технічні похибки є ще одним важливим джерелом відхилень у навігації автономних суден. Вони виникають через недоліки в роботі навігаційного обладнання, обмеження технологій, а також системні затримки в обробці та передачі даних. Дослідження та розуміння цих факторів допомагає зменшити ризик похибок і покращити ефективність навігаційних систем.

Неточності обладнання:

1.Анени, які використовуються для прийому супутникових сигналів, можуть спричинити похибки через технічні обмеження. Наприклад, невірна калібровка антени або погана спрямованість може призводити до зменшення якості прийому сигналу, що в свою чергу негативно впливає на точність визначення позиції судна. Крім того, механічні пошкодження або зношення антен також можуть погіршувати їх роботу та спричинити нестабільний прийом даних.

2.Приймачі супутникових сигналів, які встановлені на борту судна, також можуть вносити неточності у вимірювання через обмежену точність або технічні дефекти. Наприклад, низька роздільна здатність приймача може призводити до неточних вимірювань часу прибуття сигналу, що впливає на точність визначення координат судна. Крім того, програмне забезпечення приймачів також може мати баги або працювати з затримками, що впливає на своєчасність обробки даних.[2]

Затримки у передачі даних. Системні затримки виникають на етапах передачі та обробки навігаційних даних між супутниковими системами та приймачами на борту суден. Ці затримки можуть бути спричинені декількома факторами:

1.Затримки обробки сигналу. Супутникові системи GNSS (глобальні навігаційні супутникові системи) зазвичай потребують певного часу для передачі сигналу від супутника до приймача. Однак затримки можуть виникати як через власні обмеження технології, так і через збої або затори у передачі даних. Це може спричинити відставання в оновленні інформації про місцезнаходження судна, що критично важливо для забезпечення безперервної навігації.

2.Затримки у системах управління. Обладнання автономного судна, яке опрацьовує отримані дані, також може спричинити затримки через обмежену швидкість обробки або низьку пропускну здатність каналів зв'язку. Затримки в обробці сигналу можуть ускладнити своєчасне прийняття рішень щодо зміни курсу або коригування маршруту.

Втрата або спотворення сигналу:

1.Втрата сигналу. В умовах сильного електромагнітного шуму або інших перешкод навколишнього середовища сигнал може бути повністю втрачений. Це стає критичним у районах зі складними погодними умовами або поблизу об'єктів, які можуть створювати сильні радіозавади. Втрата сигналу може призвести до тимчасового припинення навігації, що небезпечно в умовах щільного морського руху або під час маневрування в портових зонах.

2.Спотворення сигналу. Спотворення сигналу може виникати через електромагнітну інтерференцію, мультипатчинг або перешкоди від інших суден та об'єктів. Таке спотворення призводить до некоректного трактування прийнятого сигналу, що може викликати серйозні

відхилення в маршруті автономного судна. В умовах океанічної навігації, де важлива максимальна точність, будь-яке спотворення сигналу може стати критичним.

Частотні збої та електромагнітні завади. У процесі навігації автономних суден важливу роль відіграє стабільність та чистота сигналу, що надходить від супутникових систем. Однак різні зовнішні фактори можуть спричиняти збої та завади в частотах, на яких працюють навігаційні системи. Частотні збої та електромагнітні завади можуть істотно впливати на точність передачі даних, тому їх розуміння та мінімізація є важливими завданнями для забезпечення безпечної роботи автономних суден.

Вплив сонячних спалахів та інших космічних явищ:

1. Сонячні спалахи. Сонячна активність, зокрема спалахи на Сонці, можуть спричинити серйозні збої в роботі супутникових систем навігації. Під час таких спалахів відбувається викид великої кількості заряджених частинок, які впливають на іоносферу Землі. Це викликає сильні збурення в навігаційних сигналах, що передаються через цей шар атмосфери, і може призвести до значних похибок у визначенні положення судна або навіть до повної втрати сигналу.

2. Космічні явища. Інші космічні явища, такі як магнітні бурі, викликані сонячними вітрами, також можуть впливати на якість сигналів GNSS. Ці бурі можуть змінювати електромагнітні умови на орбіті супутників, викликаючи порушення передачі сигналів на Землю. Такі явища є непередбачуваними, що ускладнює завдання забезпечення надійної навігації автономних суден у будь-яких умовах.

Інтерференція від інших суден та об'єктів:

1. Інтерференція від суден. У морському середовищі існує високий ризик виникнення інтерференції від інших суден. Це може бути викликано використанням радіообладнання, що працює на подібних частотах. Наприклад, радарми або іншими системами комунікацій, які випромінюють сигнали в тій самій частотній смузі, що і навігаційні системи суден. Це може призводити до перекриття сигналів та виникнення завад, що ускладнює правильне визначення положення судна.

2. Інтерференція від наземних об'єктів. Наземні об'єкти, такі як порти, високі будівлі або берегова інфраструктура, також можуть створювати перешкоди для навігаційних сигналів через відбиття або інтерференцію. Це може бути особливо проблематичним під час маневрування судна в тісних або складних умовах, де точність навігації має вирішальне значення [4].

Способи мінімізації похибок. З метою підвищення точності навігаційних даних і мінімізації впливу похибок сигналу використовуються різні технології корекції та фільтрації, а також додаткові системи, які допомагають покращити навігацію автономних суден.

Використання технологій корекції сигналу (SBAS, GBAS):

1. SBAS (Satellite-Based Augmentation System). Це система супутникового базування, яка забезпечує додаткові коригувальні сигнали до основних супутникових даних GNSS. SBAS допомагає зменшити похибки, викликані іоносферними збуреннями, затримками сигналів та іншими факторами. Вона використовує наземні станції для обчислення похибок і передачі їх на супутники, що дозволяє забезпечити високоточну навігацію, особливо у відкритому океані.

2. GBAS (Ground-Based Augmentation System). Це наземна система, яка доповнює супутникову навігацію через спеціальні наземні станції. GBAS дозволяє отримувати надзвичайно точні корекційні сигнали, що особливо важливо під час заходу судна до порту або маневрування в обмежених просторах. Використання GBAS дозволяє мінімізувати похибки навігації в зонах з високим ризиком інтерференції або складними умовами.

Системи навігації автономних суден використовують спеціальні фільтри для усунення шумів і перешкод у сигналах. Наприклад, калманівський фільтр (Kalman filter) широко застосовується для зменшення впливу випадкових збурень на навігаційні дані. Завдяки цьому фільтру система може "відсіювати" випадкові перешкоди та створювати більш точні прогнози положення судна, навіть за наявності похибок у сигналах.

Для підвищення точності навігації автономних суден все частіше використовуються додаткові сенсорні системи. Вони можуть включати:

1.Інерційні навігаційні системи (INS). Це системи, що базуються на вимірюваннях прискорення та обертання судна. Вони дозволяють автономно визначати положення судна навіть за відсутності сигналів супутникових систем, що є корисним у випадках втрати сигналу або під впливом сильних завад.

2.Радарні та лазерні сенсори. Ці сенсори використовуються для отримання інформації про навколишнє середовище, що допомагає судну уникати перешкод і забезпечувати точне маневрування в реальному часі. Використання таких сенсорів дозволяє компенсувати похибки навігаційних сигналів і підвищувати безпеку автономної навігації [1].

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

Точність і надійність навігаційних систем є ключовими факторами безпеки та ефективності роботи автономних суден. Похибки, що виникають через фізичні явища, технічні недоліки та електромагнітні завади, можуть істотно вплинути на точність передачі сигналів, що, в свою чергу, створює ризики для безпеки судноплавства. Саме тому важливість постійного контролю та корекції похибок у системах навігації важко переоцінити.

Використання сучасних технологій корекції сигналу, таких як SBAS і GBAS, а також впровадження додаткових сенсорних систем значно підвищують точність навігаційних систем, зменшуючи ризики похибок. Фільтрація шумів та впровадження інноваційних рішень дозволяють забезпечити стабільну роботу навігаційного обладнання навіть за несприятливих умов.

Майбутні перспективи в оптимізації систем автономної навігації виглядають дуже обнадійливими. З розвитком штучного інтелекту, машинного навчання та нових технологій, навігаційні системи стають дедалі точнішими та адаптивнішими. Удосконалення сенсорних технологій, інтеграція нових систем корекції та збільшення швидкості обробки даних допоможуть забезпечити автономним суднам ще вищий рівень безпеки та ефективності в майбутньому.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Мазур В. Ю., Боровик О. В. Функціональний аналіз варіантів створення єдиної системи висвітлення надводної обстановки на морській (річковій) ділянці в контексті забезпечення прикордонної безпеки //Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Сер.: Військові та технічні науки. – 2017. – №. 4. – С. 158-175.
- [2] Злобіна О. Перспективні напрямки вдосконалення підготовки майбутніх морських офіцерів у вищих військових навчальних закладах в умовах військових реалій //Вісник Національного університету" Чернігівський колегіум" імені ТГ Шевченка. – 2022. – Т. 174. – №. 18. – С. 60-65.
- [3] Дубов О. В., Петровський О. Г., Філоненко О. В. Москитний флот Військово-Морських Сил Збройних Сил України: перспективи та реалії //Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). Технічні науки. – 2017. – №. 2. – С. 117-126.
- [4] Който Ж. Морські автономні надводні кораблі: Нові можливості та виклики в океанічному праві та політиці // Дослідження міжнародного права. - 2021. - Т. 97. - №. 1. - С. 19.
- [5] Kim T., Schröder-Hinrichs J. U. Research developments and debates regarding maritime autonomous surface ship: status, challenges and perspectives //New Maritime Business: Uncertainty, Sustainability, Technology and Big Data. – 2021. – С. 175-197.

- [6] Zhang X. et al. Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey //Ocean Engineering. – 2021. – Т. 235. – С. 109-380.
- [7] Бай Х. та ін. Огляд сучасних досліджень і досягнень у галузі безпілотних надводних транспортних засобів // Журнал морської науки і застосування. - 2022. - Т. 21. - №. 2. - С. 47-58.
- [8] Вагале А. та ін. Планування шляху та уникнення зіткнень для автономних наземних транспортних засобів I: огляд // Журнал морської науки і техніки. - 2021. - С. 1-15.
- [9] Лю К. та ін. Дослідження людино-машинної взаємодії для навігації морських автономних надводних кораблів: Огляд та розгляд // Інженерія океану. - 2022. - Т. 246. - С. 110-555.
- [10] Wang L. et al. State-of-the-art research on motion control of maritime autonomous surface ships //Journal of Marine Science and Engineering. – 2019. – Т. 7. – №. 12. – С. 438.
- [11] Deling W. et al. Marine autonomous surface ship-a great challenge to maritime education and training //American Journal of Water Science and Engineering. – 2020. – Т. 6. – №. 1. – С. 10-16.
- [12] Kurt I., Aymelek M. Operational and economic advantages of autonomous ships and their perceived impacts on port operations /Maritime Economics & Logistics. – 2022. – Т. 24. – №. 2. – С. 302–326.
- [13] Zanella T. V. The Environmental Impacts of the" Maritime Autonomous Surface Ships"(MASS) //Veredas do Direito. – 2020. – Т. 17. – С. 367.
- [14] Chang C. H. et al. Risk assessment of the operations of maritime autonomous surface ships //Reliability Engineering & System Safety. – 2021. – Т. 207. – С. 107-324.
- [15] Akdağ M., Solnør P., Johansen T. A. Collaborative collision avoidance for maritime autonomous surface ships: A review //Ocean Engineering. – 2022. – Т. 250. – С. 110

REFERENCES

- [1] Mazur V. Yu., Borovik O. V. Funktsionalniy analiz variantiv stvorenniya edinoї sistemi visvitlennya nadvodnoї obstanovki na morskoy (richkoviy) dilyantsi v konteksti zabezpechennya prikordonnoї bezpeki //Zbirnik naukovikh prats Natsionalnoї akademії Derzhavnoї prikordonnoї sluzhbi Ukraїni. Ser.: Viyskovi ta tekhnichni nauki. – 2017. – №. 4. – S. 158-175.
- [2] Zlobina O. Perspektivni napryamki vdoskonalennya pidgotovki maybutnikh morskikh ofitseriv u vishchikh viyskovikh navchalnikh zakladakh v umovakh viyskovikh realiy //Visnik Natsionalnogo universitetu" Chernigivskiy kolegium" imeni TG Shevchenka. – 2022. – Т. 174. – №. 18. – S. 60-65.
- [3] Dubov O. V., Petrovskiy O. G., Filonenko O. V. Moskitniy flot Viyskovo-Morskikh Sil Zbroynikh Sil Ukraїni: perspektivi ta realii //Zbirnik naukovikh prats Viyskovoї akademії (m. Odesa). Tekhnichni nauki. – 2017. – №. 2. – S. 117-126.
- [4] Koyto Zh. Morski avtonomni nadvodni korabli: Novi mozhlivosti ta vikliki v okeanichnomu pravi ta polititsi // Doslidzhennya mizhnarodnogo prava. - 2021. - Т. 97. - №. 1. - S.
- [5] Kim T., Schröder-Hinrichs J. U. Research developments and debates regarding maritime autonomous surface ship: status, challenges and perspectives //New Maritime Business: Uncertainty, Sustainability, Technology and Big Data. – 2021. – С. 175-197.
- [6] Zhang X. et al. Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey //Ocean Engineering. – 2021. – Т. 235. – С. 109-380.

- [7] Bay X. ta in. Oglyad suchasnikh doslidzhen i dosyagnen u galuzi bezpilotnikh nadvodnikh transportnikh zasobiv // Zhurnal morskoi nauki i zastosuvannya. - 2022. - T. 21. - №. 2. - S. 47-58.
- [8] Vagale A. ta in. Planuvannya shlyakhu ta unikhennya zitknen dlya avtonomnikh nazemnikh transportnikh zasobiv I: oglyad // Zhurnal morskoi nauki i tekhniki. - 2021. - S. 1-15.
- [9] Lyu K. ta in. Doslidzhennya lyudino-mashinnoi vzaemodii dlya navigatsii morskikh avtonomnikh nadvodnikh korabliv: Oglyad ta rozglyad // Inzheneriya okeanu. - 2022. - T. 246. - S. 110-555.
- [10] Wang L. et al. State-of-the-art research on motion control of maritime autonomous surface ships //Journal of Marine Science and Engineering. – 2019. – T. 7. – №. 12. – C. 438.
- [11] Deling W. et al. Marine autonomous surface ship-a great challenge to maritime education and training //American Journal of Water Science and Engineering. – 2020. – T. 6. – №. 1. – C. 10-16.
- [12] Kurt I., Aymelek M. Operational and economic advantages of autonomous ships and their perceived impacts on port operations /Maritime Economics & Logistics. – 2022. – T. 24. – №. 2. – C. 302–326.
- [13] Zanella T. V. The Environmental Impacts of the" Maritime Autonomous Surface Ships"(MASS) //Veredas do Direito. – 2020. – T. 17. – C. 367.
- [14] Chang C. H. et al. Risk assessment of the operations of maritime autonomous surface ships //Reliability Engineering & System Safety. – 2021. – T. 207. – C. 107-324.
- Akdağ M., Solnør P., Johansen T. A. Collaborative collision avoidance for maritime autonomous surface ships: A review //Ocean Engineering. – 2022. – T. 250. – C. 110