

7. Solmaz M.S., Aşan C., Şihmantepe A. Digital Transformation in Ship Operations and Management. *Management Strategies for Sustainability, New Knowledge Innovation, and Personalized Products and Service*, 2022, pp. 116-139. doi: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-7793-6.ch005>.
8. Kovacs K., Ansari F., Geisert C., Uhlmann E., Grepl R., Sihh W. A Process Model for Enhancing Digital Assistance in Knowledge-Based Maintenance. *Machine Learning for Cyber Physical Systems*, 2018, pp. 87-96. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-662-58485-9_10.

Рецензент: І.В. Грицук
д-р техн. наук, проф., ХДМА

Стаття надійшла 11.04.2023

Стаття прийнята 16.05.2023

УДК 656.621

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288185

© Маранов О.В.*

МЕТОД МОНІТОРИНГУ ТА ПІДВИЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТОЧНОСТІ СУДНОВОГО СУПУТНИКОВОГО НАВІГАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

Метою дослідження є вдосконалення підходів до контролю й управління радіоелектронними системами водного транспорту, а також самого навігаційного забезпечення для підвищення безпеки судноплавства на основі розробки методу моніторингу та підвищення точних характеристик суднового супутникового навігаційного обладнання в реальних умовах експлуатації. У статті розглянуто значення сучасних суднових радіонавігаційних систем для забезпечення безпеки судноплавства та висвітлено обмеження, які можуть виникнути у процесі експлуатації цих систем. У зв'язку з цим авторами статті запропоновано підхід до моніторингу та підвищення точності супутникової навігаційної апаратури судна в реальних умовах експлуатації судна. У статті розглянуто застосування наземного контрольно-вимірювального пункту для контролю точних характеристик суднового супутникового навігаційного обладнання. Цей пункт встановлюється на березі і працює на основі основного рівняння метрології. Система позиціонування судна лазерного локатора описується таким чином: GPS-навігаційний космічний апарат посилає лазерний промінь на оптичний кутовий відбивач, встановлений на судні, а потім наземний контрольно-вимірювальний пункт вимірює час, необхідний для проходження лазерного променя до відбивача і від нього, що дає можливість розрахувати відстань до судна. Отримані дані передаються призначеному для користувача обладнанню на судні, яке використовує їх спільно з даними GPS-навігатора космічного апарату для визначення місця розташування, часу і швидкості судна. Особливостями такого підходу є його висока точність і застосовність в різних умовах, включаючи погану видимість. Для врахування геометричних розбіжностей між антенами наземного контрольно-вимірювального пункту й апаратурою користувача, а також для врахування крену і диференту, автори пропонують використовувати геометричні співвідношення. Використання запропонованого у статті методу контролю точності суднового супутникового навігаційного обладнання на базі наземного контрольно-вимірювального пункту дозволяє з високою точністю визначати похибки в різних умовах реальної експлуатації, що сприяє підвищенню безпеки плавання.

* канд. техн. наук, доцент, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0002-5854-0240

Ключові слова: суднові радіонавігаційні системи, характеристики точності, наземний контрольно-вимірвальний пункт, місцезнаходження судна, супутникова навігація, безпека навігації.

O.V. Maranov. Method for monitoring and improving the accuracy characteristics of shipboard satellite navigation equipment. The aim of the study is to improve approaches to monitoring and control of electronic systems of water transport, as well as navigation support itself, to improve navigation safety by developing a method for monitoring and improving the accuracy characteristics of shipboard satellite navigation equipment in real operating conditions. The article considers the importance of modern ship radio navigation systems for ensuring safety of navigation and highlights the limitations that may arise during operation of these systems. In this regard, the authors of the article propose an approach to monitoring and improving the accuracy of satellite navigation equipment of a ship in real conditions of ship operation. The article considers the use of a ground-based control and measurement station to control the precise characteristics of shipboard satellite navigation equipment. This station is installed on shore and operates based on the basic equation of metrology. The positioning system of a laser locator ship is described as follows: The GPS navigation spacecraft sends a laser beam to an optical angle reflector mounted on the vessel, and then a ground-based control and measurement station measures the time it takes for the laser beam to travel to and from the reflector, which allows the distance to the vessel to be calculated. The data is then transmitted to user equipment on the ship, which uses it in conjunction with the spacecraft's GPS navigation data to determine the ship's location, time and speed. The features of this approach are its high accuracy and applicability in various conditions, including poor visibility. To consider the geometric differences between the antennas of the ground control and measuring station and the user's equipment, as well as to consider the roll and pitch, the authors propose to use geometric ratios. The use of the method of accuracy control of shipboard satellite navigation equipment based on a ground-based control and measuring station proposed in the article allows to determine errors with high accuracy in various conditions of real operation, which contributes to the improvement of navigation safety.

Key words: ship radio navigation systems, accuracy characteristics, ground control and measuring station, ship location, satellite navigation, navigation safety.

Постановка проблеми. Навігація – одне з найважливіших питань в судноплаванні. Достатньо високий рівень аварійності морського флоту свідчить про необхідність поліпшення навігаційного забезпечення. Сучасні суднові радіонавігаційні системи забезпечують навігаційне забезпечення безпеки судноплавання. Однак ці системи мають обмеження, які можуть змінюватися у процесі фактичної експлуатації. Тому виникає необхідність контролю і поліпшення точних характеристик апаратури супутникової навігації судна у процесі фактичної експлуатації. Вирішене у даній статті наукове завдання полягає у підвищенні навігаційної безпеки судноплавання на основі моніторингу та поліпшення точних характеристик апаратури супутникової навігації судна в період фактичної експлуатації. Актуальність вирішення наукового завдання обумовлена:

1) підвищенням ролі навігаційного забезпечення як найважливішого виду забезпечення безпеки плавання морських суден;

2) відсутністю наукових досліджень щодо розробки методів моніторингу та вдосконалення точних характеристик апаратури супутникової навігації судна в період фактичної експлуатації;

3) необхідністю впровадження методів моніторингу та підвищення точних характеристик суднового супутникового навігаційного обладнання, можливих шляхів їх реалізації та алгоритмів функціонування в практиці експлуатації, що дозволяють оцінювати і прогнозувати його точні характеристики в реальному режимі, підвищення якості навігаційної безпеки мореплавання.

Реалізація відповідного завдання дозволить підвищити якість навігаційного забезпечення безпеки мореплавання; знизити аварійність морського флоту; підвищити ефективність транспортного процесу на морських судноплавних маршрутах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час існує значна кількість досліджень щодо удосконалення навігаційного забезпечення з метою підвищення безпеки судноплавання [1-

10]. Безпосередньо дослідження управління та поліпшення характеристик суднової супутникової навігаційної апаратури розглядаються в роботах [1-3].

Побудова обґрунтованої системи показників оцінки ефективності є ключовим кроком для проведення наукової оцінки обладнання. У роботі [1] на основі базового аналого-цифрового перетворювача (АЦП) сформульована концепція інтегрованої ефективності суднового навігаційного обладнання, а також розглянута і проаналізована важливість цього питання та досліджено вплив факторів готовності, надійності, навігаційної здатності суднового навігаційного обладнання. У поєднанні з вимогами суднового обладнання до навігаційної інформації був удосконалений базовий АЦП і побудована система показників оцінки ефективності суднового навігаційного обладнання як добре організованої, логічної і доступної системи індексів.

У дослідженні [2] був запропонований вдосконалений метод оцінки ефективності обладнання, заснований на теорії хмарності. Одержані результати: отримана модель хмарного індексу з використанням алгоритму зворотної хмари, модель ваги хмари визначена за допомогою методу зважування розширених формул, хмарна модель ефективності системи отримана за допомогою хмарних алгебраїчних операцій, встановлена оцінка ефективності системи. Хмарна модель використовує модельно-орієнтований метод, заснований на співвідношенні золотого перетину, що дозволило отримати результати оцінки з використанням алгоритму прямої хмари. Безпосередньо в статті цей метод використовувався для оцінки ефективності суднового навігаційного обладнання, а його моделювання проводилося в середовищі MATLAB. Результати експериментів довели, що цей метод є здійсненним, який не тільки зменшує суб'єктивні фактори при оцінці, але і дозволяє отримати загальні і візуалізовані результати оцінки.

У статті [3] вказується, що високі значення характеристик комбінованої конструкції інерціальної навігаційної системи (SINS) і глобальної навігаційної супутникової системи (Global Navigation Satellite System (GNSS)) доведені в морських застосуваннях. Однак, як класичний інерційний інструмент, SINS не є стандартним судновим обладнанням, визначеним ІМО, та його застосування в морській сфері обмежене через його високу вартість. У статті розглядається інтеграція мікроелектромеханічної системи (MEMS) та GNSS для доведення застосовності недорогих MEMS до суднових навігаційних систем. З урахуванням проблеми деградації навігації, викликаній дрейфом MEMS, запропоновано щільно пов'язану структуру з петлею уникнення помилок. Для задоволення вимог точності і стабільності була створена модель нелінійної похибки і розроблений різновид фільтра Калмана квадратного кореня (SRUKF). Зазначено, що запропонований алгоритм не тільки значно підвищує точність позиціонування, але і дозволяє уникнути обчислювального навантаження матриць. Ефективність та перевага запропонованого SRUKF були підтверджені шляхом моделювання та порівняльного аналізу. Результати показують, що таким чином можна подолати короточасне переривання роботи GNSS у морі.

Метою статті є вдосконалення підходів до контролю й управління радіоелектронними системами водного транспорту, а також самого навігаційного забезпечення для підвищення безпеки судноплавства на основі розробки методу моніторингу та підвищення точних характеристик суднового супутникового навігаційного обладнання в реальних умовах експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Сучасний стан контролю точності обладнання супутникової навігації GPS судна характеризується такими тенденціями:

1. Удосконалення методів і засобів контролю точності GPS приймачів.
2. Розвиток диференціальних навігаційних технологій.
3. Застосування технологій GNSS (Global Navigation Satellite System (GNSS)) для забезпечення безпеки судноплавства.

Удосконалення методів і засобів контролю точності GPS приймачів направлено на підвищення точності визначення місця розташування, швидкості і часу. Для цього використовуються різні методи, такі як:

1. Аналіз статистичних характеристик похибок GPS приймача.
2. Використання методів інтерполяції та екстраполяції.
3. Застосування методів обробки сигналів приймача GPS з використанням додаткових джерел інформації.

Розвиток технологій диференціальної навігації дає можливість підвищити точність визначення місцезнаходження за рахунок використання інформації з додаткових джерел, таких як станції корекції берегових диференціалів або супутники EGNOS.

Застосування GNSS-технологій для забезпечення безпеки судноплавства дозволяє підвищити безпеку плавання, надаючи судноводіям точну інформацію про положення, швидкість і час судна. Це дозволяє їм приймати більш обґрунтовані рішення у різних навігаційних ситуаціях.

У цілому сучасний стан контролю точності апаратури супутникової навігації GPS судна характеризується високим рівнем розвитку технологій і методів контролю точності. Це дозволяє забезпечити високу точність визначення місцезнаходження, швидкості і часу, що грає важливу роль в забезпеченні безпеки судноплавства.

Супутникове навігаційне обладнання (СНО) має ряд недоліків, які можуть вплинути на точність визначення місця розташування. До найбільш істотних недоліків можна віднести:

1. Іоносферні затримки. Хвилі, що випускаються супутниками, поширюються через іоносферу, яка є іонізованим шаром атмосфери. Залежно від стану іоносфери швидкість поширення хвилі може змінюватися, що призводить до помилок у визначенні місця розташування.

2. Ефекти тропосфери. Тропосфера – це нижній шар атмосфери, в якому відбувається рух повітряних мас. Рух повітряних мас може викликати затримки поширення хвиль, що призводить до помилок у визначенні місця розташування.

3. Загасання сигналів. Сигнали, що випромінюються супутниками, можуть бути ослаблені при різних умовах, таких як дощ, сніг або густий туман. Загасання сигналів також призводить до помилок у визначенні місця розташування.

4. Помилки годинника. Пристрої СНО мають власні годинники, які можуть мати помилки. Помилки годинника є однією з основних причин, що призводять до помилок у визначенні місця розташування.

Для контролю точності роботи СНО використовуються різні методи. До найпоширеніших методів відносяться:

1. Порівняння визначених СНО координат з координатами, визначеними іншими навігаційними системами.

2. Використання коригувальних виправлень. Коригувальні виправлення – це значення, які додаються до визначених СНО координат для компенсації помилок. Корекційні поправки можна отримати з різних джерел, таких як берегові станції корекції диференціалів або супутники EGNOS.

3. Перевірка точності роботи СНО на спеціальних полігонах. На спеціальних полігонах, які обладнані навігаційними маяками, є можливість провести комплексну перевірку точності роботи СНО. Перевірка точності роботи СНО на спеціальних полігонах дозволяє оцінити точність визначення місця, швидкості і напрямку руху.

Дані методи контролю точних характеристик судового супутникового навігаційного обладнання у процесі експлуатації засновані на використанні наземного контрольно-вимірювального пункту (наприклад, лазерного локатора). Вони відрізняються один від одного розташування наземного контрольно-вимірювального пункту – на судні або на березі, а також алгоритмами роботи. Розглянемо підхід при установці наземного контрольно-вимірювального пункту на березі.

Розроблені методи базуються на основному рівнянні метрології, яке для даного випадку має такий вигляд:

$$\Delta\varphi = \varphi_c - \varphi_e; \quad (1)$$

$$\Delta\lambda = \lambda_c - \lambda_e; \quad (2)$$

$$\Delta h = h_c - h_e, \quad (3)$$

де $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$, Δh – похибки визначення широти, довготи і висоти відповідно;

φ_c , λ_c , h_c – координати судна, розраховані за сигналами навігаційних супутників;

φ_e , λ_e , h_e – опорні координати судна, що обчислюються відповідно до виразу:

$$\varphi_e = \varphi_l + \frac{l \cos(K+\alpha)(1-e^2 \sin^2 \varphi_l)^{1/2}}{a(1-e^2)\text{arc}1'}; \quad (4)$$

$$\lambda_e = \lambda_l + \frac{l \sin(K+\alpha)(1-e^2 \sin^2 \varphi_l)^{1/2}}{a \cos \varphi_l \text{arc}1'}; \quad (5)$$

$$h_e = h_l + z_2, \quad (6)$$

де $\varphi_c, \lambda_c, h_c$ – координати (X_l, Y_l, Z_l) лазерного локатора, встановленого на судні, що визначаються за допомогою виразу (7) та їх подальше переведення у сферичну систему координат;

l – проекція вектора на площину істинного горизонту;

K – курс судна;

α – кут між діаметральною площиною і проекцією l ;

e – еліпсоїдний ексцентриситет;

a – велика піввісь еліпсоїда;

$arc1'$ – хвилина дуги;

z_2 – векторна проекція L_2 на ось oZ .

Визначення координат оптичного входу кута, встановленого на судні, здійснюється відповідно до виразу

$$D_i = \sqrt{(X_{Q_i} - X_l)^2 + (Y_{Q_i} - Y_l)^2 + (Z_{Q_i} - Z_l)^2}, \quad i = \overline{1, 3}, \quad (7)$$

де $(X_{Q_i}, Y_{Q_i}, Z_{Q_i})$ – високоточні координати i -го оптичного кутового відбивача.

Навігаційний космічний апарат (НКА) GPS передає на Землю сигнали часу та положення, які використовуються приймачами GPS для визначення місця, часу та швидкості.

Обладнання користувача (ОК) – це GPS-приймач, який використовується для визначення місця розташування, часу та швидкості. ОК можна встановити на судно або на інший транспортний засіб.

Оптичний відбивач кута (ОВК) являє собою прилад, який використовується для визначення місця розташування судна за допомогою наземної контрольно-вимірювальної точки. На судні встановлюється ОВК, а на березі встановлюється наземний контрольно-вимірювальний пункт (НКВП).

Наземний контрольно-вимірювальний пункт являє собою прилад, який використовується для визначення місця розташування судна за допомогою лазерного променя. НКВП встановлюється на березі, а ОВК – на судні.

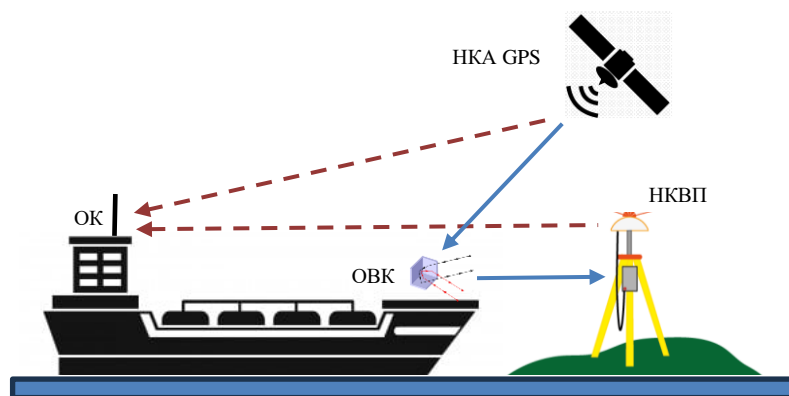


Рис. 1 – Узагальнена схема системи контролю точності суднового супутникового навігаційного обладнання

Схема роботи системи визначення місця розташування судна за допомогою НКВП є такою (рис. 1):

1. НКА посилає лазерний промінь на ОВК, встановлений на судні.
2. ОВК відбиває лазерний промінь назад до НКВП.
3. НКВП вимірює час, необхідний для проходження лазерного променя НКВП до ОВК і навпаки.

4. Використовуючи знання швидкості світла, НКВП розраховує відстань до судна.
5. НКВП передає відстань до судна на ОК, встановлене на судні.
6. ОК використовує відстань до судна та інші дані, отримані з НКА GPS, для визначення місця розташування, часу і швидкості судна.

Таким чином, система позиціонування судна НКВП – це високоточна система, яка може використовуватися для визначення положення судна у будь-яких умовах, включаючи погану видимість.

При вирішенні завдання управління характеристиками точності необхідно враховувати геометричні розбіжності між розташуваннями антен НКВП та ОК (рис. 2), щоб отримати достовірну різницю координат.

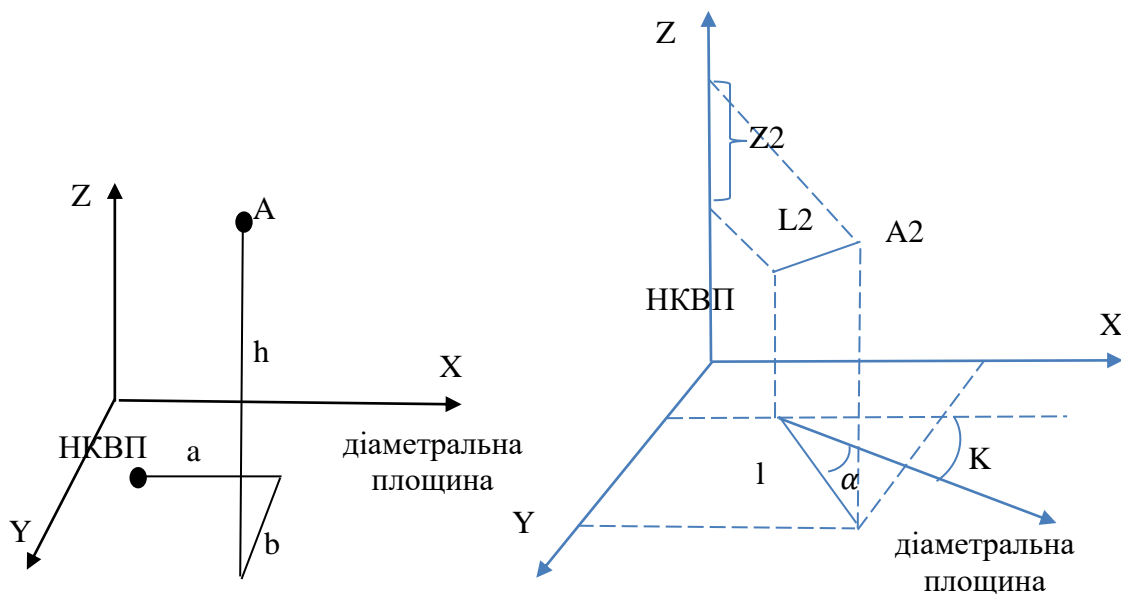


Рис. 2 – Взаємне розташування НКВП й антени ОК

Для врахування крену і диференту можуть використовуватися геометричні співвідношення. Ці співвідношення враховують як крен, так і диферент, а також їх комбінований вплив. Крен – це нахил судна щодо його поздовжньої осі. Диферент – це нахил судна в сторону від його діаметральної площини. Обидва ці параметри можуть мати великий вплив на керуваність судна, а також на його плавучість і стійкість. Геометричні співвідношення дають можливість розраховувати параметри судна при різних умовах, включаючи крен і диферент. Це дозволяє судноводію приймати обґрунтовані рішення про те, як експлуатувати судно в різних умовах.

Структура методу моніторингу і поліпшення характеристик точності апаратури супутникової навігації судна в реальних умовах експлуатації шляхом порівняння координат, визначених апаратурою супутникової навігації судна, з координатами, визначеними наземним контрольно-вимірювальним пунктом, показана на рис. 3. Реалізація методу дає можливість контролювати характеристики точності апаратури супутникової навігації судна у процесі фактичної експлуатації.

Запропонований у статті метод контролю характеристик точності суднового супутникового навігаційного обладнання на базі наземного контрольно-вимірювального пункту, встановленого на березі, дозволяє з високою вірогідністю визначати похибки супутникового навігаційного обладнання в різних умовах реальної експлуатації.

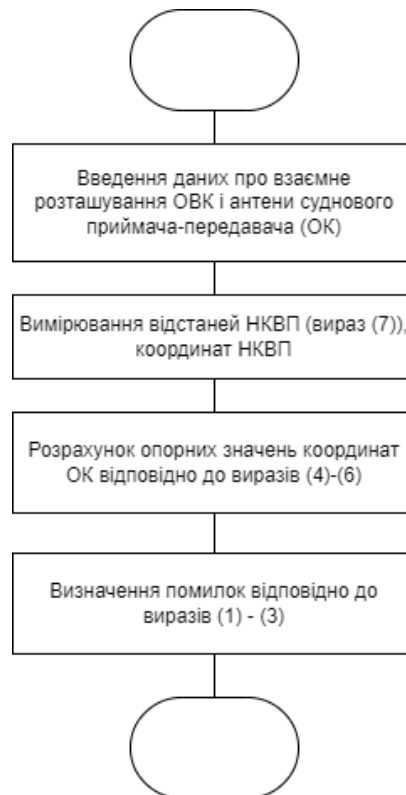


Рис. 3 – Структура методу моніторингу і поліпшення характеристик точності апаратури супутникової навігації судна

Висновки

Сучасні суднові радіонавігаційні системи забезпечують навігаційне забезпечення безпеки судноплавства. Однак ці системи мають обмеження, які можуть змінюватися у процесі фактичної експлуатації. Тому виникає необхідність контролю і поліпшення точних характеристик апаратури супутникової навігації судна у процесі фактичної експлуатації. У статті запропоновано метод контролю точних характеристик суднової супутникової навігаційної апаратури на основі наземного контрольно-вимірювального пункту, встановленого на березі. Метод дає можливість з високою точністю визначати похибки супутникового навігаційного обладнання в різних умовах реальної експлуатації. Це дозволяє отримувати більш достовірну інформацію про місцезнаходження судна, що в кінцевому підсумку підвищує рівень безпеки плавання.

Перелік використаних джерел:

1. Construction of shipborne navigation equipment's comprehensive effectiveness evaluation index system based on improved ADC model / J. Guo, T.-W. Li, C.-X. Li, Q. Huang, Z.-Y. Li. *Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*, Yantai, China, 2014. Pp. 822-826. DOI: <https://doi.org/10.1109/CGNCC.2014.7007316>.
2. An improved cloud-theory-based method to evaluate shipborne navigation equipment's effectiveness / J. Guo, S. Gao, T.-W. Li, Q. Huang, F.-J. Meng. *2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, Lijiang, China, 2015. Pp. 1403-1408. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICInfA.2015.7279506>.
3. Jiang Y., Wang J. Study on Shipboard Navigation Method Based on MEMS/GNSS Integration. *2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Kunming, China, 2021. Pp. 7162-7169. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCDC52312.2021.9601752>.
4. Filtering Performance Evaluation of INS/GPS Integrated Navigation System Based on Grey Relation / W.X. Xia, X.D. Yang, W. Wang, J. Liu. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*. 2012. Vol. 32, № 4. Pp. 41-44.
5. Efficiency Evaluation of DVL Based on AHP and Fuzzy Integrated Estimation / H.L. Wei, T.W. Li,

- M.B. Fan, S. Sun. *Ship Electronic Engineering*. 2010. Vol. 30, № 8. Pp. 71-73.
6. Duan Y.J., Wu C., Li C.E. An Improved Model of Effectiveness Evaluation of Satellite Navigation System. *Fire Control and Command Control*. 2008. Vol. 33, no. 5. Pp. 133-136.
 7. Guo M., Guo C., Zhang C. SINS/GNSS-Integrated Navigation of Surface Vessels Based on Various Nonlinear Kalman Filters and Large Ship Dynamics. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2021. Vol. 16, № 1. Pp. 531-546. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00537-z>.
 8. Kennedy S., Hamilton J., Martell H. Architecture and System Performance of SPAN-NovAtel's GPS/INS Solution. *2006 IEEE/ION Position Location And Navigation Symposium*. 2006. Pp. 266-274. DOI: <https://doi.org/10.1109/PLANS.2006.1650612>.
 9. Constrained MEMS-Based GNSS/INS Tightly Coupled System With Robust Kalman Filter for Accurate Land Vehicular Navigation / D. Wang, Y. Dong, Z. Li, Q. Li, J. Wu. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020. Vol. 69, № 7. Pp. 5138-5148. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2955798>.
 10. Wei Y., Li H., Lu M. Spoofing profile estimation-based GNSS spoofing identification method for tightly coupled MEMS INS/GNSS integrated navigation system. *IET Radar Sonar and Navigation*. 2020. Vol. 14, № 2. Pp. 216-225. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0264>.

References:

1. Guo J., Li T.-W., Li C.-X., Huang Q., Li Z.-Y. Construction of shipborne navigation equipment's comprehensive effectiveness evaluation index system based on improved ADC model. *Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*, Yantai, China, 2014, pp. 822-826. doi: <https://doi.org/10.1109/CGNCC.2014.7007316>.
2. Guo J., Gao S., Li T.-W., Huang Q., Meng F.-J. An improved cloud-theory-based method to evaluate shipborne navigation equipment's effectiveness. *2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, Lijiang, China, 2015, pp. 1403-1408. doi: <https://doi.org/10.1109/ICInfA.2015.7279506>.
3. Jiang Y., Wang J. Study on Shipboard Navigation Method Based on MEMS/GNSS Integration. *2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Kunming, China, 2021, pp. 7162-7169. doi: <https://doi.org/10.1109/CCDC52312.2021.9601752>.
4. Xia W.X., Yang X.D., Wang W., Liu J. Filtering Performance Evaluation of INS/GPS Integrated Navigation System Based on Grey Relation. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2012, vol. 32, № 4, pp. 41-44.
5. Wei H.L., Li T.W., Fan M.B., Sun S. Efficiency Evaluation of DVL Based on AHP and Fuzzy Integrated Estimation. *Ship Electronic Engineering*, 2010, vol. 30, № 8, pp. 71-73.
6. Duan Y.J., Wu C., Li C.E. An Improved Model of Effectiveness Evaluation of Satellite Navigation System. *Fire Control and Command Control*, 2008, vol. 33, № 5, pp. 133-136.
7. Guo M., Guo C., Zhang C. SINS/GNSS-Integrated Navigation of Surface Vessels Based on Various Nonlinear Kalman Filters and Large Ship Dynamics. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2021, vol. 16, № 1, pp. 531-546. doi: <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00537-z>.
8. Kennedy S., Hamilton J., Martell H. Architecture and System Performance of SPAN-NovAtel's GPS/INS Solution. *2006 IEEE/ION Position Location And Navigation Symposium*, 2006, pp. 266-274. doi: <https://doi.org/10.1109/PLANS.2006.1650612>.
9. Wang D., Dong Y., Li Z., Li Q., Wu J. Constrained MEMS-Based GNSS/INS Tightly Coupled System With Robust Kalman Filter for Accurate Land Vehicular Navigation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, vol. 69, № 7, pp. 5138-5148. doi: <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2955798>.
10. Wei Y., Li H., Lu M. Spoofing profile estimation-based GNSS spoofing identification method for tightly coupled MEMS INS/GNSS integrated navigation system. *IET Radar Sonar and Navigation*, 2020, vol. 14, № 2, pp. 216-225. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0264>.

Рецензент: О.В. Мельник,
канд. техн. наук, доц., ДУІТ

Стаття надійшла 12.02.2023
Стаття прийнята 14.04.2023