

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-73-1-9>

УДК 681.5

Юрій ХАЗАНОВИЧ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
[kirichuky@gmail.com](mailto:kirichuky@gmail.com)

Антон МОСПАН

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
[A\\_mospan@gmail.com](mailto:A_mospan@gmail.com)

Юрій КИРИЧУК

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
<https://orcid.org/0000-0001-8638-6060>  
[kirichuky@gmail.com](mailto:kirichuky@gmail.com)

Наталія НАЗАРЕНКО

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
[N\\_Nazarenko@kpi.ua](mailto:N_Nazarenko@kpi.ua)

## ОГЛЯД СИСТЕМ НАВИГАЦІЇ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ

*В роботі розглядаються різноманітні системи навігації та позиціонування рухомих об'єктів наводяться їх принцип дії та точність, упор робиться на системи високої точності позиціонування та можливість їх використання в обмеженому об'ємі.*

*Серед систем, що розглядаються: глобальні навігаційні системи (GPS) - забезпечують точність позиціонування менше 6 метрів. Нове покоління супутників забезпечує точність більше 60-90 см; позиціонування в стільникових мережах складає 100-150 м, для більшості базових станцій - кілометр або більше. Фірмові технології стільникових мереж досягають точності 100-50 м; до локальні інфрачервоні системи позиціонування досягають точності позиціонування в 10-30 см, ультразвукові системи мають найвищу точність позиціонування, що досягає 3 см; системи позиціонування з використанням пасивних радіочастотних ідентифікаторів (RFID) досягають точності біля одного метра; системи позиціонування з використанням активних радіочастотних ідентифікаторів RFID радіочастотні мітки використовуються для відстежування об'єктів на відносно великих відстанях до 100 м; позиціонування за технологією "ближнього поля" досягає точності позиціонування в реальних умовах близько метра на відстані до 30 м. Радіохвилі охоплюють перешкоди, не відбиваються. Тому технологія NFER має переваги в складній конфігурації приміщень з великою кількістю перешкоди; безплатформена інерціальна система - принцип організації інерціальних навігаційних систем і систем орієнтації ґрунтується на інтеграції кутових швидкостей і прискорень. Точність визначення поточних координат – 7 м в залежності від пройденого шляху; інерціальна система позиціонування - це метод навігації для визначення координат і параметрів руху різних об'єктів – кораблів, літаків, ракет. Суть методу в тому, що для цього не потрібно зовнішні орієнтири або сигнали. Точність визначення поточних координат – 10 м в залежності від пройденого шляху.*

*Отримані результати можуть бути використані для вибору навігаційної системи відповідно до області використання та необхідної точності.*

*Ключові слова: навігаційна система, позиціонування об'єктів, БІНС, RFID.*

Yurii KHAZANOVICH, Anton MOSPAN,  
Yurii KYRYCHUK, Natalia NAZARENKO

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## OVERVIEW OF NAVIGATION SYSTEMS OF MOVING OBJECTS

*The work considers various systems of navigation and positioning of moving objects, their principle of action and accuracy are given, emphasis is placed on systems of high positioning accuracy and the possibility of their use in a limited volume.*

*Among the systems considered: global navigation systems (GPS) - provide positioning accuracy of less than 6 meters. The new generation of satellites provides accuracy of more than 60-90 cm; positioning in cellular networks is 100-150 m, for most base stations - a kilometer or more. Branded technologies of cellular networks reach an accuracy of 100-50 m; to local infrared positioning systems achieve a positioning accuracy of 10-30 cm, ultrasonic systems have the highest positioning accuracy, which reaches 3 cm; positioning systems using passive radio frequency identifiers (RFID) achieve an accuracy of about one meter; positioning systems using active radio frequency identifiers RFID radio frequency tags are used to track objects at relatively long distances of up to 100 m; positioning using "near field" technology achieves positioning accuracy in real conditions of about a meter at a distance of up to 30 m. Radio waves cover obstacles and are not reflected. Therefore, the NFER technology has advantages in the complex configuration of premises with a large number of obstacles; platformless inertial system - the principle of organization of inertial navigation systems and orientation systems is based on the integration of angular velocities and accelerations. The accuracy of determining the current coordinates is 7 m, depending on the path traveled; the inertial positioning system is a navigation method for determining the coordinates and parameters of movement of various objects - ships, planes, missiles. The essence of the method is that it does not require external landmarks or signals. The accuracy of determining the current coordinates is 10 m, depending on the path traveled.*

*The obtained results can be used to select a navigation system according to the area of use and the required accuracy..*

*Keywords: navigation system, object positioning, BINS, RFID.*

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

У наш час існує багато задач, які потребують точної оцінки положення фізичного тіла (об'єкта) у просторі. Починаючи від морських кораблів і літаків, робототехніки, безпеки автомобілів і закінчуючи створенням доповненої реальності, де оцінка руху і орієнтації спостерігача потрібна для правильного відображення відносно нього віртуальних об'єктів [1-5].

Технічний прогрес не зупиняється, всі компоненти радіоелектроніки дотримуються принципу мініатюризації. Отже, рушієм технічного прогресу є саме мікроелектромеханічні технології, які характеризуються малою вагою, габаритами, низькими енергоспоживанням і, завдяки високим вимогам, невисокою вартістю порівняно з аналогами. Сфера їх застосування надзвичайно широка: створення безплатформних інерціальних навігаційних систем (ІНС), створення нових систем стабілізації, орієнтування, навігації, можливість удосконалення безпілотних автомобілів, автономних роботів тощо.

Метою цієї статті є дати огляд існуючих систем позиціонування для рухомих об'єктів, упор робиться на системи високої точності позиціонування та можливість їх використання в обмеженому об'ємі.

### Виклад основного матеріалу

Навігаційні системи в даний час є відносно технічно досконалими пристроями, які значно підвищують безпеку і комфорт пересування. Знання свого місцезнаходження завжди було необхідною умовою будь-якої діяльності людини, пов'язаної з переміщенням (доставкою) вантажів, подорожами, військовими діями. З цих потреб виросла наука «навігація», з'явилися різноманітні навігаційні прилади та засоби. На морі і в авіації найбільше використовувалися найсучасніші і технічно досконалі засоби навігації.

Технологія позиціонування є основою для побудови систем навігації рухомих об'єктів. Найпоширенішими методами позиціонування рухомих об'єктів є:

#### Глобальні навігаційні системи

Точність позиціонування менше 6 метрів забезпечує GPS (рис.1). Нове покоління запущених супутників забезпечує точність понад 60-90 см. Загальним недоліком глобальних навігаційних систем є відсутність сигналу в підвалах, тунелях і метро. На прийом сигналів GPS впливають перешкоди від наземних джерел. Оскільки орбіти GPS нахилені приблизно на 55°, точність на високих широтах значно знижується, оскільки супутники GPS видно низько над горизонтом [3, 6].

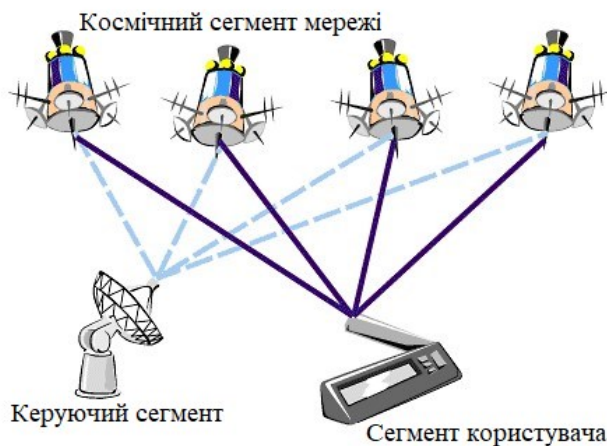


Рис.1. Загальна структура глобальних супутникових систем

#### Визначення місцезнаходження в мобільних мережах

Одним із перших було позиціонування в стільникових мережах, задовго до глобального. Це пояснюється широким поширенням стільникового зв'язку і відносною простотою стільникового методу Cell Of Origin - за місцем розташування стільника, до якого підключений абонент. Точність такого розміщення визначається радіусом стільника. Для «picosec» це 100-150 метрів, для більшості базових станцій - кілометр і більше.

Існують способи більш точного визначення координат за допомогою кількох базових станцій. Кут з прибуття - напрямлення до абонента. Метод заснований на тому, що базова

станція має 3-6 антенних решіток, кожна з яких обслуговує свій сектор (на своїй частоті). Місце розташування визначається на перетині секторів кількох станцій. Чим більше секторів в соті, тим менше сектор, тому перетин секторів менше, а точність вище.

Time of arrival (рис. 2) - час прибуття. Цей метод вимірює час приходу сигналу від абонента як мінімум до трьох базових станцій. Досягнення точності вимагає синхронізації базових станцій з атомним годинником або супутниковими сигналами. Точність методу становить близько 100 метрів. Гібридний спосіб зводиться до оснащення мобільного телефону GPS-приймачем. Крім того, існує ряд фірмових технологій [3,7]:

- radioCameraTM - точність 50 м;
- система мобільного позиціонування ( Ericsson ) - точність 100 м;
- cursorTM (CPS) - точність 50 м;
- snapTrackTM ( бездротовий GPS - помічник ) - точність до 15 м (рис.3);
- finder ( CellPoint ) - точність 75 м.

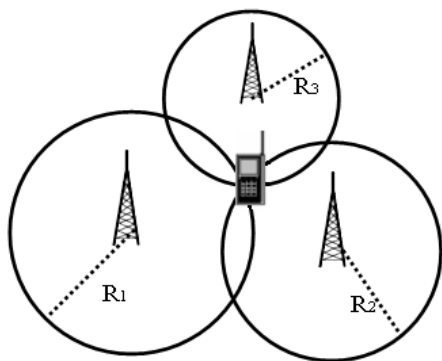


Рис. 2. Time of arrival



Рис. 3. Автомобільний GPS трекер

Вартість методу залежить від точності визначення координат. Ідентифікація об'єктів у стільникових мережах можлива, але зазвичай не є основним завданням.

#### Локальні системи позиціонування

До локальних систем позиціонування належать оптичні (зазвичай інфрачервоні) та ультразвукові системи. Їх радіус дії становить приблизно 3-10 метрів. Оскільки світло і звук практично не проходять через стіну, це гарантує розташування об'єкта в конкретному приміщенні.

Інфрачервоне позиціонування. Мобільна мітка в системі інфрачервоного позиціонування випромінює інфрачервоні імпульси, які приймаються приймачами системи з фіксованими координатами. Розташування мітки обчислюється по Time – of – flight ( ToF ) – час поширення сигналу від джерела до приймача. Недоліком методу є його чутливість до перешкод від сонячного світла. Використання інфрачервоного лазера збільшує радіус дії, точність, але, на жаль, також і вартість. Точність позиціонування цим методом становить 10-30 сантиметрів [8, 9].

Ультразвукові системи позиціонування використовують частоти від 40 кГц до 130 кГц (рис. 4). Для визначення координат мітки час польоту зазвичай вимірюють чотирма приймачами. Головний недолік - чутливість до втрати сигналу. Таку систему необхідно ретельно спланувати, щоб усунути недоліки. Перевагою ультразвукових систем є найвища точність позиціонування, яка досягає трьох сантиметрів [10, 11].

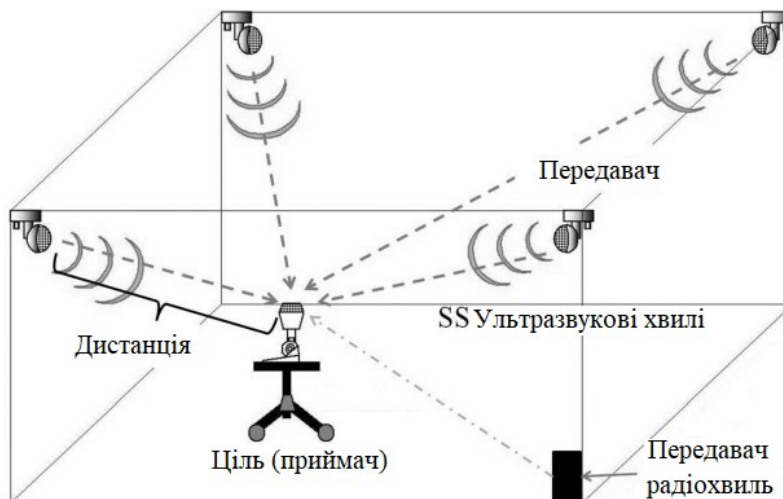


Рис.4. Схема роботи ультразвукові системи позиціонування

#### Wi-Fi позиціонування

Найпростіший спосіб визначити своє місцезнаходження в мережах Wi-Fi (рис.5). Цей метод використовується для надання різних послуг залежно від типу підключеного пристрою та його розташування. Радіус дії точок доступу Wi-Fi зазвичай становить від 30 до 200 метрів, і від цього залежить точність визначення місцезнаходження. Для підвищення точності необхідно збільшити потужність радіосигналу, час проходження від абонента до точки доступу, напрямком. Точність таких систем в ідеальних умовах становить 3-5 метрів, в реальності вона в 3 рази нижча. Як і при позиціонуванні в стільникових мережах, можлива ідентифікація об'єктів [12-14].

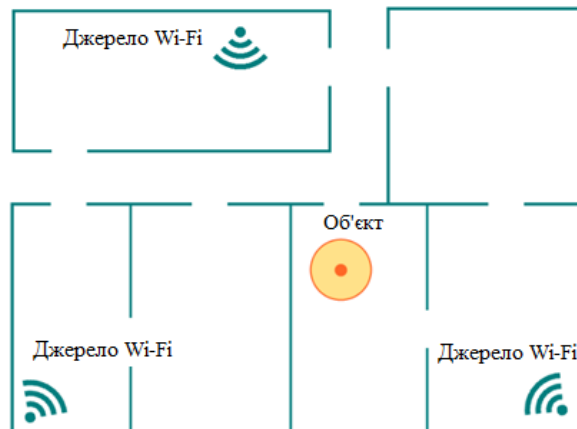


Рис. 5. Визначення внутрішньої геолокації через мережі Wi-Fi

#### Системи позиціонування з використанням активних радіочастотних ідентифікаторів (RFID)

Активні радіочастотні мітки використовуються, коли необхідно стежити за об'єктами на відносно великих відстанях (рис. 6). Активні робочі частоти RFID – 455 МГц, 2,4 ГГц або 5,8 ГГц, а радіус дії – до 100 метрів. Наводяться активні мітки від вбудованого акумулятора (рис. 7). Існує два типи активних ярликів: радіомаяки та транспондери [15]. Транспондери вмикаються при отриманні сигналу зчитувача. Вони використовуються в контрольно-пропускних пунктах, для оплати поїздок, в'їзних порталів та інших подібних систем.

Радіомаяки використовуються в системах позиціонування в реальному часі. Маяк надсилає пакети з унікальним ідентифікаційним кодом за командою або з певною частотою. Пакети приймаються не менше ніж трьома приймачами, розташованими по периметру контрольованої зони. Відстань від радіомаяка до приймачів із фіксованою координатою визначається напрямним кутом до кута прийому радіомаяка, часом прибуття сигналу, часом прибуття (ToA) або часом поширення сигналу від маяка до приймача часу (ToF) [3].

Інфраструктура системи позиціонування побудована на основі дротової мережі і потребує синхронізації в двох останніх випадках. Термін «активний RFID» охоплює великий клас різних продуктів. Більшість систем радіочастотного позиціонування використовують активну RFID для ідентифікації та визначення місцезнаходження об'єктів. Тому характеристики активних радіочастотних міток, що включають точність позиціонування та вартість, сильно відрізняються в залежності від конкретного виробника.

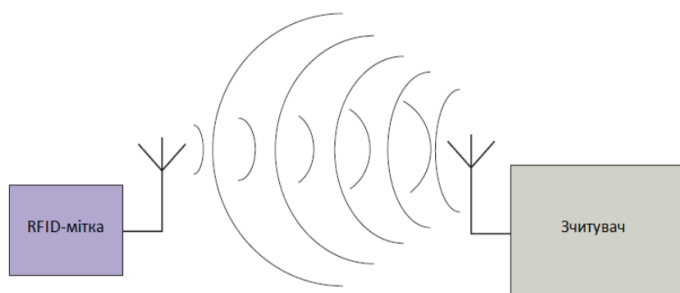


Рис. 6. Модуляція зворотного розсіювання



Рис. 7. Активні RFID-мітки

#### Системи позиціонування з використанням пасивних радіочастотних ідентифікаторів (RFID)

Системи з пасивними RFID-мітками в основному використовуються для ідентифікації, переважно за допомогою магнітних карток або штрих-кодів (рис. 8). До складу системи входять RFID - етикетки з унікальними кодами та зчитувач. Зчитувач безперервно генерує радіовипромінювання певної частоти, мікросхема (чіп) мітки, що потрапляє в схему зчитувача, використовує це випромінювання як джерело енергії та передає ідентифікаційний код зчитувача. Радіус дії зчитувача становить близько одного метра [16]. Вартість систем з пасивними RFID-мітками вища за вартість систем зі магнітними карток або штрих-кодами, але використання пасивної RFID істотно розвантажує операторів.

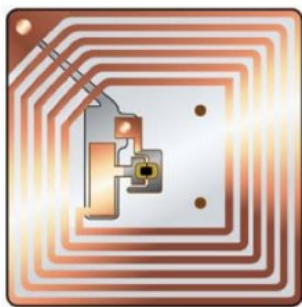


Рис. 8. Пасивна RFID-мітка

#### Позиціонування за технологією "ближнього поля"

Технологія дистанційного вимірювання в ближньому електромагнітному полі (near field electromagnetic range - NFER) використовує передавачі міток і один або більше приймачів. У системах NFER приймач використовується для визначення відстані між різними електромагнітними полями. Оскільки ця різниця змінюється від  $90^\circ$  поблизу випромінюючої антени до нуля на відстані півхвилі, довжина півхвилі визначає радіус дії системи.

На частоті 1 МГц довжина хвилі 300 м і дальність дії 150 м, на частоті 10 МГц - 30 і 15 м. Точність визначення положення в реальних умовах близько метра на відстані до 30 м. Відносно низька частота радіохвиль полегшує їх проходження через складні виробничі середовища. Радіохвилі

покривають перешкоди і не відбиваються. Тому технологія NFER має переваги в складній конфігурації виробничих приміщень з великою кількістю перешкод [17-19].

Недоліком системи NFER є низька ефективність антени. Для ефективної роботи антена повинна мати порівнянну довжину хвилі. Насправді вона у сто разів менший, що вимагає збільшення передавача, а отже, розміру та ваги міток.

#### Ultra Wideband (UWB) позиціонування

Технологія UWB використовує короткі імпульси з максимальною пропускну здатністю на мінімальній центральній частоті (рис. 9). У більшості виробників центральна частота становить кілька ГГц, відносна смуга пропускання 25-100%. Технологія використовується для зв'язку, радарів, визначення дальності та позиціонування. Це відбувається при передачі коротких імпульсів широкосмугового характеру. Ідеальний імпульс, як показує аналіз Фур'є, забезпечує нескінченну смугу пропускання. Сигнал UWB не схожий на модульовану синусоїду, а нагадує послідовність імпульсів.

Виробники пропонують різні варіанти технології UWB. Розрізняють різні форми імпульсів. В одних випадках від сильних окремих імпульсів, в інших - від сотень мільйонів імпульсів низької енергії в секунду. Він використовується як послідовна обробка сигналів і не є когерентним. Все це призводить до істотної різниці в характеристиках UWB систем різних виробників.

Переваги технології: надійна робота, висока точність, стійкість до вицвітання багатьох променів. Обмеження: складність створення передавача значної потужності (типова потужність – 50 мкВт, найбільш потужна – 10 мВт) [20-23].

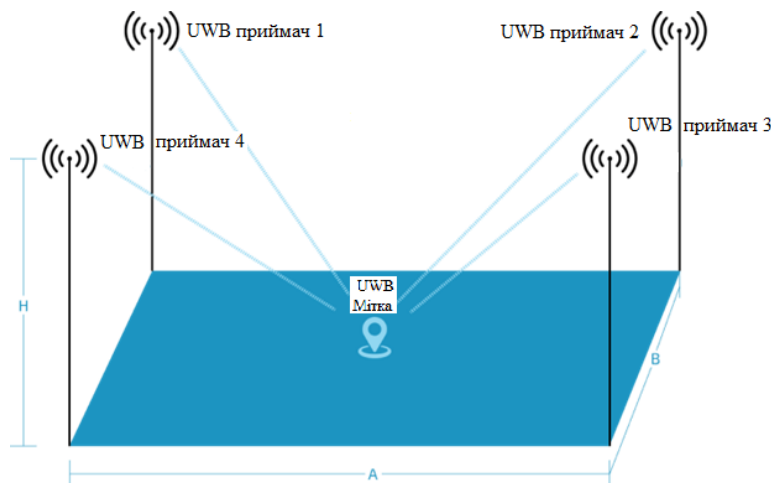


Рис. 9. Схема роботи Ultra Wideband (UWB) позиціонування

Крім того, є обмеження з боку органів контролю частоти (як правило, система використовується в приміщеннях, де їх малопотужний сигнал практично не виявляється на фоні шумів). Інфраструктура системи побудована на основі дротової мережі і потребує синхронізації.

#### Безплатформна інерційна система

Базовий компонент системи є безплатформна інерціальна система (БІНС), тобто яка не має гіроскопічно стабілізованої платформи [24].

Безплатформний принцип організації інерціальних навігаційних систем і систем орієнтування заснований на інтегруванні кутових швидкостей і прискорень. У системах орієнтування використовуються

три методи: на основі кутів Ейлера –Крилова, на основі напрямних косинусів і на основі параметрів Родріга–Гамільтона (кватерніонів).

При складанні алгоритмів роботи інерціальних систем активно використовується надмірність інформації, отриманої від MEMS-пристроїв - мікрогіроскопів, магнітометрів, мікроакселерометрів, для компенсації небезпечної помилки - дрейфу гіроскопів.

Основним джерелом інформації для алгоритму інерціального орієнтування є проекція відносної кутової швидкості, отримана за сигналами трьох датчиків кутової швидкості (ДКШ), і проекція кутової швидкості географічного тригранника, отримана розрахунковим шляхом. Результатом роботи алгоритму орієнтації є оцінки кутів тангажу, крену та повороту:  $\nu$ ,  $\gamma$ ,  $\psi$ . Алгоритм БІНС використовує інтеграцію сигналів прискорення щодо системи координат Землі, витягнутих з інформаційного сигналу акселерометрів, щоб отримати координати об'єкта – висоту польоту та кути широти та довготи місця [24].

У БІНС акселерометри та гіроскопи жорстко приєднанні до корпусу пристрою. Характерною особливістю БІНС є використання гіроскопів як датчиків кутових швидкостей, а перехід до географічної системи координат здійснюється алгоритмічно шляхом інтегрування цих швидкостей. Дані інших навігаційних систем, зокрема глобальних навігаційних супутникових систем, радіонавігації, магнітометрів (для отримання даних про курс), одометрів (для отримання даних про пройдено відстань у наземному застосуванні) використовуються для компенсації накопичених похибок орієнтації, кути і координати, властиві ІНС). Поєднання даних з різних навігаційних систем зазвичай здійснюється поза БІНС.

У БІНС дані інерційного лічильника доповнюються даними магнітометра у випадках, коли відсутня дія сильних магнітних полів сильнострумів ланцюгів або металевих конструкцій, що призводить до ймовірності помилок. Загалом система дислокації особового складу сил реагування працює автономно в місцях ліквідації надзвичайних ситуацій, у тому числі на закритих просторах, адаптується до умов проведення операції та забезпечує оператору Єдиної системи управління силами і засобами навігаційні дані про пересування персоналу по території та (або) всередині об'єкта.

#### *Інерційна система позиціонування*

Інерціальна навігація — метод навігації для визначення координат і параметрів руху різних об'єктів — кораблів, літаків, ракет. Суть методу полягає в тому, що він не потребує зовнішніх орієнтирів чи сигналів [25-27]. Суть інерціальної навігації полягає у визначенні прискорення об'єкта і його кутової швидкості за допомогою приладів і обладнання, встановлених на рухомому об'єкті. За даними з цих приладів можна визначити координати цього об'єкта, його хід, швидкість, пройдено відстань тощо. Це робиться за допомогою:

- датчиків лінійного прискорення (акселерометрів);
- гіроскопічних пристроїв, що відтворюють об'єкт опорної системи (наприклад, за допомогою гіроскопічно стабілізованої платформи) і дозволяють визначити кути повороту та нахил об'єкта, що використовуються для стабілізації та керування рухом;
- обчислювальних пристроїв, які використовують свою інтеграцію для визначення швидкості об'єкта, його координат тощо. Перевагами інерціальних методів навігації є автономність, стійкість до перешкод і повна автоматизація всіх процесів навігації.

Завдяки цим методам інерціальна навігація все ширше використовується при вирішенні навігаційних завдань на підводних човнах і літаках, космічних кораблях і транспортних засобах та інших рухомих об'єктах [25-27].

#### **Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Розглянуто існуючі системи навігації, згідно з поставленими задачами, обрано інерціальну систему позиціонування, даний метод навігації базується на визначенні прискорення об'єкту і його кутових швидкостей за допомогою встановлених на об'єкті, що рухається, приладів і пристроїв, для даного метода не потрібні зовнішні орієнтири або сигнали. Розглянуті системи мають свої переваги та недоліки. Вибирати потрібно в залежності від поставленої задачі, де буде рухатись об'єкт в приміщенні чи зовні.

#### **Література**

- [1] Безвесільна О.М., Киричук Ю. В. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем (Технологічні вимірювання та прилади), навч. посіб. для студентів приладобудівних спец. ВНЗ. Житомир, Україна: ЖДТУ, 2008, 172 с.
- [2] Киричук Ю.В. Основні функції робота / Ю.В. Киричук, Ю.Ю. Хазанович, Я.В. Макаров // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2022). П'ятнадцята міжнародна науково-практична конференція 17-18 травня 2022 р., Київ, Україна. – К.: НАУ, 2022. – 241 с. (збірка тез).
- [3] Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии. Под общ. ред. Б.С.Алешина, К.К.Веремеенко, А.И.Черноморского. М.: Физматлит, 2006. С. 60–73.
- [4] Конспект лекцій: Сучасна елементна база систем управління ЛА [Електронний ресурс] <http://uadoc.zavantag.com/text/5429/index1.html?page=8>. – 27.12.22.

- [5] Градецкий, В. Г. Динамические процессы в многозвенных микросистемах / В. Г. Градецкий, Л. Н. Кравчук, М. М. Пушкин. Микросистемная техника, 2000, №4. С 10-15.
- [6] Глобальні супутникові навігаційні системи GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, SBAS, GBAS [Електронний ресурс] <https://nau.edu.ua/ua/menu/science/naukovi-rozrobki/globalni-suputnikovi-navigacijni-sistemi-gps-glonass-galileo-sbas-gbas.html>
- [7] Технології визначення місцеположення користувачів мобільних мереж [Електронний ресурс] // - URL: [http://zadereyko.info/moi\\_publicacii/tehnologii\\_opredeleniya\\_mestopolozeni\\_ua.htm](http://zadereyko.info/moi_publicacii/tehnologii_opredeleniya_mestopolozeni_ua.htm)
- [8] S. Cincotta, C. He, A. Neild and J. Armstrong, "QADA-PLUS: A Novel Two-Stage Receiver for Visible Light Positioning", 2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1-5, 2018.
- [9] E. Aparicio-Esteve, A. Hernández, J. Ureña and J. M. Villadangos, "Visible Light Positioning System based on a Quadrant Photodiode and Encoding Techniques", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018.
- [10] Romprakhun Tientadakul, Hiroaki Nakanishi, Tomoo Shiigi, Zichen Huang, Lok Wai Jacky Tsay, Naoshi Kondo, "Indoor Navigation System by Combining Ultrasonic Wave TOA and Inertial Measurement", 2020 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), pp.1690-1695, 2020.
- [11] Dominik Esslinger, Martin Oberdorfer, Michael Zeitz, Cristina Tarín, "Improving ultrasound-based indoor localization systems for quality assurance in manual assembly", 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), pp.563-570, 2020
- [12] An Improved Algorithm to Generate a Wi-Fi Fingerprint Database for Indoor Positioning / L. Chen, B. Li, K. Zhao, C. Rizos, Z. Zheng // *Sensors*. – 2013. DOI: 10.3390/s130811085.
- [13] Indoor Wi-Fi Positioning System for Android-based Smartphone / BeomJu Shin, Kwang-Won Lee, Sun-Ho Choi, Joo-Yeon Kim, Woo Jin Lee [и др.] // Department of Information and Communication Engineering. – 2010.
- [14] An Introduction to Wi-Fi [Електронний ресурс] // Digi International Inc. – 2008. – Режим доступу до ресурсу: [http://ftp1.digi.com/support/documentation/0190170\\_b.pdf](http://ftp1.digi.com/support/documentation/0190170_b.pdf)
- [15] Chan M., Zhang X. "Reader leveled RFID localization approaches and their simulation", IEEE Long Island System, Applications and Technology Conference, 2017, pp. 1-6.
- [16] He Xu, Ye Ding, Peng Li, Wang R., Yizhu Li. (2017) "An RFID indoor positioning algorithm based on Bayesian Probability and k-nearest neighbor", *Sensors(Basel)*, 1806,
- [17] Han, Ke & Liu, Yun & Deng, Zhongliang & Yin, Lu & Shi, Lingjie. (2019). Direct Positioning Method of Mixed Far-field and Near-field Based on 5G Massive MIMO System. *IEEE Access*. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2019.2906330.
- [18] H. Gazzah and J. P. Delmas, "Crb-based design of linear antenna arrays for near-field source localization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 4, pp. 1965–1974, 2014.
- [19] A. de Jesus Torres, A. A. D'Amico, L. Sanguinetti, and M. Z. Win, "Cramer-rao bounds for near-field localization," in ' 2021 55th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. IEEE, 2021, pp. 1250–1254
- [20] H. Shaman and J. -S. Hong, "Ultra-Wideband (UWB) Bandpass Filter With Embedded Band Notch Structures," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 17, no. 3, pp. 193-195, March 2007, doi: 10.1109/LMWC.2006.890467.
- [21] Herbruggen, B.V., Fontaine, J., & Poorter, E.D. (2021). Anchor Pair Selection for Error Correction in Time Difference of Arrival (TDoA) Ultra Wideband (UWB) Positioning Systems. *2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 1-8.
- [22] Zhou, Ning, Lawrence Lau, Ruibin Bai and Terry Moore. "Novel prior position determination approaches in particle filter for ultra wideband (UWB)-based indoor positioning." *NAVIGATION* (2021): n. pag.
- [23] Shi, G., & Ming, Y. (2016). Survey of Indoor Positioning Systems Based on Ultra-wideband (UWB) Technology.
- [24] Bieliakov, Robert, Simulation of Platform-Free Inertial Navigation System of Unmanned Aerial Vehicles Based on Neural Network Algorithms (February 26, 2021). Technology audit and production reserves, 1 (2 (57)), 15-19, 2021. doi: 10.15587/2706-5448.2021.225282, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3796950>
- [25] Zhao, Y. (2011). GPS/IMU Integrated System for Land Vehicle Navigation based on MEMS.
- [26] Hodas, S., Izvoltova, J., & Rekus, D. (2021). Trends in Inertial Navigation Technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 906.
- [27] Braasch, M.S. (2016). Inertial Navigation Systems. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*.

## References

- [1] Bezvesilna O.M., Kyrychuk Yu.V. Converting devices of devices and computerized systems (Technological measurements and devices), ed. manual for students of instrument-making specialties. university Zhytomyr, Ukraine: ZHTU, 2008, 172 p.

- [2] Kyrychuk Yu.V. The main functions of the robot / Yu.V. Kyrychuk, Yu.Yu. Khazanovych, Y.V. Makarov // Integrated intelligent robotic complexes (IIRTK-2022). Fifteenth International Scientific and Practical Conference May 17-18, 2022, Kyiv, Ukraine. - K.: NAU, 2022. - 241 p. (a collection of theses).
- [3] Orientation and navigation of moving objects: modern information technologies. Under the municipality ed. B.S. Aleshina, K.K. Veremeenko, A.I. Chernomorskogo. M.: Fizmatlit, 2006. P. 60–73.
- [4] Synopsis of lectures: Modern element base of aircraft control systems [Electronic resource] <http://uadoc.zavantag.com/text/5429/index1.html?page=8>.
- [5] Gradetsky, V. G. Dynamic processes in multi-link microsystems / V. G. Gradetsky, JL N. Kravchuk, M. M. Pushkin. *Microsystem technology*, 2000, №4. P. 10-15.
- [6] Global satellite navigation systems GPS, GLONASS, GALILEO, SBAS, GBAS [Electronic resource] <https://nau.edu.ua/ua/menu/science/naukovi-rozrobki/globalni-suputnikovi-navigaczijni-sistemi-gps-glonass-galileo-sbas-gbas.html>
- [7] Technologies for determining the location of users of mobile networks [Electronic resource] // - URL: [http://zadereyko.info/moi\\_publicakcii/tehnologii\\_opredeleniya\\_mestopolojeniya.htm](http://zadereyko.info/moi_publicakcii/tehnologii_opredeleniya_mestopolojeniya.htm)
- [8] S. Cincotta, C. He, A. Neild and J. Armstrong, "QADA-PLUS: A Novel Two-Stage Receiver for Visible Light Positioning", *2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 1-5, 2018.
- [9] E. Aparicio-Esteve, A. Hernández, J. Ureña and J. M. Villadangos, "Visible Light Positioning System based on a Quadrant Photodiode and Encoding Techniques", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018.
- [10] Romprakhun Tientadukul, Hiroaki Nakanishi, Tomoo Shiigi, Zichen Huang, Lok Wai Jacky Tsay, Naoshi Kondo, "Indoor Navigation System by Combining Ultrasonic Wave TOA and Inertial Measurement", 2020 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), pp.1690-1695, 2020.
- [11] Dominik Esslinger, Martin Oberdorfer, Michael Zeitz, Cristina Tarin, "Improving ultrasound-based indoor localization systems for quality assurance in manual assembly", 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), pp.563-570, 2020
- [12] An Improved Algorithm to Generate a Wi-Fi Fingerprint Database for Indoor Positioning / L. Chen, B. Li, K. Zhao, C. Rizos, Z. Zheng // *Sensors*. – 2013. DOI: 10.3390/s130811085.
- [13] Indoor Wi-Fi Positioning System for Android-based Smartphone / BeomJu Shin, Kwang-Won Lee, Sun-Ho Choi, Joo-Yeon Kim, Woo Jin Lee [и др.] // Department of Information and Communication Engineering. – 2010.
- [14] An Introduction to Wi-Fi [Electronic resource] // Digi International Inc. – 2008. – Режим доступу до ресурсу: [http://ftp1.digi.com/support/documentation/0190170\\_b.pdf](http://ftp1.digi.com/support/documentation/0190170_b.pdf)
- [15] Chan M., Zhang X. "Reader leveled RFID localization approaches and their simulation", IEEE Long Island System, Applications and Technology Conference, 2017, pp. 1-6.
- [16] He Xu, Ye Ding, Peng Li, Wang R., Yizhu Li. (2017) "An RFID indoor positioning algorithm based on Bayesian Probability and k-nearest neighbor", *Sensors(Basel)*, 1806,
- [17] Han, Ke & Liu, Yun & Deng, Zhongliang & Yin, Lu & Shi, Lingjie. (2019). Direct Positioning Method of Mixed Far-field and Near-field Based on 5G Massive MIMO System. *IEEE Access*. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2019.2906330.
- [18] H. Gazzah and J. P. Delmas, "Crb-based design of linear antenna arrays for near-field source localization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 4, pp. 1965–1974, 2014.
- [19] A. de Jesus Torres, A. A. D'Amico, L. Sanguinetti, and M. Z. Win, "Cramer-rao bounds for near-field localization," in '2021 55th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. IEEE, 2021, pp. 1250–1254
- [20] H. Shaman and J. -S. Hong, "Ultra-Wideband (UWB) Bandpass Filter With Embedded Band Notch Structures," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 17, no. 3, pp. 193-195, March 2007, doi: 10.1109/LMWC.2006.890467.
- [21] Herbruggen, B.V., Fontaine, J., & Poorter, E.D. (2021). Anchor Pair Selection for Error Correction in Time Difference of Arrival (TDoA) Ultra Wideband (UWB) Positioning Systems. *2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 1-8.
- [22] Zhou, Ning, Lawrence Lau, Ruibin Bai and Terry Moore. "Novel prior position determination approaches in particle filter for ultra wideband (UWB)-based indoor positioning." *NAVIGATION* (2021): n. pag.
- [23] Shi, G., & Ming, Y. (2016). Survey of Indoor Positioning Systems Based on Ultra-wideband (UWB) Technology.
- [24] Bieliakov, Robert, Simulation of Platform-Free Inertial Navigation System of Unmanned Aerial Vehicles Based on Neural Network Algorithms (February 26, 2021). Technology audit and production reserves, 1 (2 (57)), 15-19, 2021. doi: 10.15587/2706-5448.2021.225282, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3796950>
- [25] Zhao, Y. (2011). GPS/IMU Integrated System for Land Vehicle Navigation based on MEMS.
- [26] Hodas, S., Izvoltova, J., & Rekus, D. (2021). Trends in Inertial Navigation Technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 906.
- [27] Braasch, M.S. (2016). Inertial Navigation Systems. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*.