

Навігація та геоінформаційні системи

УДК 629.123

doi: 10.26906/SUNZ.2023.4.005

А. Ю. Засць, Є. В. Калініченко

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАВІГАЦІЇ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

Анотація. У цій статті проведено всеосяжний аналіз сучасних методів навігації автономних підводних апаратів, акцентуючи увагу на їхніх технологічних особливостях, перевагах та обмеженнях. Основна увага приділена п'яти ключовим методам: акустичній навігації, глобальним системам позиціонування, навігації за допомогою Доплерівського вимірника швидкості (DVL), інерціальній навігації, навігація з використанням спостерігачів траєкторії на основі дифузії, а також забезпечення навігації груп підводних апаратів. Результати дослідження вказують на те, що інтеграція різноманітних методів навігації може значно покращити надійність та точність позиціонування підводних апаратів, забезпечуючи ефективне виконання місій у складних умовах. Враховуючи поточні тенденції розвитку технологій та оперативних вимог, в статті також окреслено напрями подальших досліджень та розробок у галузі підводної навігації.

Ключові слова: автономні підводні апарати, акустична навігація, Long Baseline, Ultra Short Baseline, Short Baseline, фільтр Калмана, Doppler Velocity Log, алгоритм для інтегрованої навігації NARX-RKF, навігація методом навігаційного числення та інерціальні навігаційні системи.

Вступ

Протягом останніх десяти років розробка комерційно доступних, точних, датчиків навігації з високою частотою оновлення, таких як Доплерівські сонари, оптичні гірокомпаси та блоки інерційного вимірювання (IMU), доповнила традиційні підводні сенсори, такі як акустичні позиціонувальні системи, магнітні компаси та датчики глибини за тиском. Дані з цих сенсорів, разом з даними від наукових датчиків, таких як батиметричні сонари та оптичні камери, стали каталізатором для розробки нових методологій навігації. Багато з цих методологій доповнюють дані сенсорів інформацією з динамічних або кінематичних моделей.

Мотивація для вдосконалення навігації підводних транспортних засобів виникає з необхідності розширити можливості цих засобів і додатково збільшити їх цінність для океанографії.

Майбутні вдосконалення в навігації підводних транспортних засобів дозволять нам оптимізувати інфраструктуру, необхідну для навігації, та дозволять підводним апаратам оптимально досягати конкретних цілей. Ці поліпшення збільшать цінність, кількість та вартісну ефективність наукових даних, отриманих за допомогою цих транспортних засобів.

Мета статті – проаналізувати переваги та недоліки сучасних методи навігації автономних підводних апаратів та їх груп з використанням у тому числі нейронних мереж і визначити перспективи їх розвитку.

Основний матеріал

1. **Методи акустичної навігації** продовжують використовуватися і сьогодні. Long Baseline (LBL),

при якій транспортний засіб триангулює своє положення від акустичних діапазонів у мережі обстежених передавачів, та навігація з ультракороткою базовою лінією (USBL), де використовується сонарний масив для визначення діапазону та напрямку до транспортного засобу, регулярно використовуються сьогодні.

1.1 Зовнішні акустичні системи. Зовнішні акустичні системи позиціонування використовуються підводними транспортними засобами для триангуляції їхнього положення на основі лише дальності або інформації про напрямок і дальність між зовнішніми акустичними транспондерами та передавачем, встановленим на транспортному засобі. Основна перевага цих систем полягає в тому, що вимоги до розміру та енергоспоживання підводного транспортного засобу мінімальні порівняно з іншими навігаційними методами. Однак, на відміну від інших навігаційних методів, деякі з зовнішніх акустичних систем вимагають розгортання акустичних транспондерів на морському дні в районі операцій [1].

У зовнішній акустичній системі транспортний засіб обчислює свою відстань до кожного транспондера, використовуючи час польоту акустичного сигналу та оцінку швидкості звуку в водному стовпі між транспортним засобом і транспондером. Наявність інформації про напрямок залежить від геометрії мережі акустичних транспондерів. Для зовнішніх акустичних навігаційних систем використовуються три різних основних геометрії: Short Baseline (SBL), Ultra Short Baseline (USBL) та Long Baseline (LBL) [2].

Всі типи зовнішніх акустичних систем позиціонування зіткнулися з деякими загальними викликами. Однією з таких проблем є досягнення сумісності систем координат між усіма вимірами. Орієнтація

датчика, положення транспортного засобу та положення корпусу для передавачів, встановлених на корпусі, усі впливають на трансформації систем координат. Наступні дискусії про різні геометрії навігаційних систем передбачають, що відповідні трансформації координат були проведені, щоб розрахувати положення транспортного засобу в загальній системі координат. Найбільш фундаментальною проблемою навігації підводного транспортного засобу є ефективне відхилення викидів та помилкових повернень. Дійсні акустичні передачі можуть викликати складні многодоріжжкові сценарії, тоді як алгоритми навігації розроблені на основі передположення про прямолінійну передачу [3].

1.2 Short Baseline (SBL). Перший розроблений зовнішній акустичний системний тип був системою позиціонування акустичною короткою базовою лінією (SBL), яка використовувалась для слідування чи навігації підводних апаратів на короткі відстані. Ці системи включають в себе один транспондер або перетворювач, який монтується на підводному апараті, і акустичну мережу, яка зазвичай монтується на корпусі господарського судна. Акустична мережа складається з комбінації трьох або більше акустичних перетворювачів, гідрофонів та транспондерів, які монтуються на корпусі корабля, щоб досягти максимально можливого геометричного розділення, яке зазвичай становить від 10 до 20 метрів, як показано на рисунку 2. Геометрія акустичної мережі, що монтується на корпусі, повинна точно обстежуватися під час початкового встановлення системи [4]. У конфігурації слідування, запущеного судном, транспондер монтується на підводному апараті, і мережа SBL зазвичай включає в себе один або два перетворювачі та кілька гідрофонів. Один перетворювач в акустичній мережі опитує транспондер на апараті, і всі елементи в акустичній мережі отримують відповідь транспондера. Далі розраховуються відстані між апаратом та кожним елементом акустичної мережі і використовуються для визначення позиції апарату.

Для автономної навігації підводного апарату геометрія інвертується, так що один перетворювач розташований на автономному підводному апараті (AUV), а акустична мережа складається з транспондерів. Хоча акустична мережа часто монтується на корпусі, були розроблені системи, в яких акустична мережа монтується в відомій геометрії на розгортній рамці також. У цій конфігурації AUV опитує акустичну мережу та розраховує свою власну оцінку позиції відносно місця розташування акустичної мережі. Щоб AUV визначив свою глобальну позицію, акустична мережа транспондерів повинна залишатися на фіксованому місці або її місцезнаходження під час кожного опитування повинно передаватися AUV через акустичний зв'язок.

1.3 Ultra Short Baseline (USBL). У 1970-х роках були розроблені системи навігації з ультракороткою базовою лінією (USBL) як спрощена альтернатива системам SBL. Ці системи USBL можуть працювати від підводного апарату або його головного судна. Системи USBL, що працюють від AUV (автономного підводного апарату), які іноді називають інвертованими

системами USBL, дозволяють AUV орієнтуватися відносно місця розташування єдиного зовнішнього акустичного транспондера [5].

Якщо транспондер монтується на корпусі господарського судна, AUV орієнтується відносно позиції господарського судна. Якщо транспондер монтується на дні із відомими геодезичними координатами, апарат може орієнтуватися за справжніми координатами.

Системи, які працюють від головного судна, використовуються для слідування або навігації дистанційно керованих апаратів. Ці системи головного судна можуть забезпечити навігацію в глобальних координатах завжди, коли місцезнаходження цього судна може бути точно визначено за допомогою GPS. У цьому сценарії єдиний акустичний транспондер прикріплений до підводного апарату, а масив акустичних перетворювачів розташований на головному судні. Системи USBL, які працюють на частотах порядку 100 кГц, можуть використовуватися для навігації на короткі відстані порядку 100-500 м. Також існують системи для глибокого моря, які ефективні до 6000 м і працюють на частотах від 14,5 до 17,5 кГц. [4, 5]

Основна відмінність між USBL та іншими типами акустичних систем позиціонування полягає в тому, що USBL використовує різниці у фазах акустичних сигналів, отриманих різними датчиками перетворювача, для визначення азимуту до транспондера, а також дальності. Оскільки датчики перетворювача мають точно відому геометрію, різниця у фазах між сигналами, отриманими різними датчиками, може використовуватися для розрахунку механічного кута падіння. Цей механічний кут падіння, у свою чергу, може використовуватися для розрахунку азимуту між транспондером та масивом перетворювача. В залежності від конкретної системи, яка використовується, позицію підводного апарату можна потім оцінити відносно господарського судна або зовнішнього акустичного транспондера, використовуючи інформацію про азимут та дальність.

1.4 Long Baseline (LBL). На принципі, системи навігації з довгою базовою лінією (LBL) схожі на обертнені системи SBL, але відрізняються тим, що зовнішні транспондери розгортаються окремо в океані, а не монтовані на корпусі господарського судна чи розгортаному каркасі. Явна наслідок цієї різниці полягає в тому, що геометрія мережі транспондерів не відома завчасно і потребує визначення на місці. Типові системи LBL розгортають між чотирма і дванадцятьма акустичними транспондерами в залежності від завдань, хоча можуть працювати і з двома транспондерами. Щоб транспортний засіб міг навігуватися в глобальній системі координат, потрібно визначити та передати до підводного транспортного засобу глобальні розташування маяків. [6] Існують самокалібруючі маяки, які можуть визначати своє положення відносно одного іншого. Ці маяки дорожчі, але вони зменшують час опитування, тому що потрібні лише достатні дані опитування для фіксації каліброваної мережі в глобальних координатах.

Акустичні транспондери розгортаються з господарського судна у районі майбутніх операцій підводного транспортного засобу, а потім геометрія масиву

транспондерів калібрується шляхом «опитування» розташування кожного транспондера. Ця калібровка здійснюється шляхом послідовного опитування кожного транспондера трансдуктором, розташованим на корпусі господарського судна. Господарське судно пересувається в різні місця, опитує транспондери, а потім використовує точні дані про розташування корабля з координат GPS у поєднанні з розрахованим діапазоном до кожного транспондера, щоб глобально розташувати транспондери.

Це калібрування, або «опитування», мережі транспондерів часто є найбільшим джерелом помилок в системах навігації LBL [3, 6].

Після отримання даних з тривимірної мережі транспондерів, розташування кожного з транспондерів передається підводному транспортному засобу. Транспортний засіб навігується шляхом періодичного отримання даних (опитування) транспондерів та розрахунку діапазонів до кожного маяка на основі часу польоту процесу опитування. Зазвичай транспортний засіб опитує всі маяки на одній основній частоті, і вони відповідають на унікальній частоті. Для цього використовується найкраща оцінка швидкості звуку у воді, помножену на половину часу польоту для кожного маяка, щоб розрахувати діапазон до цього маяка.

Системи LBL були розроблені з використанням різних діапазонів частот для виконання різних завдань. Хоча основні принципи та спосіб роботи є ідентичними, варіація в акустичних сигналах частот дозволяє різні рівні точності на різних ефективних діапазонах операцій. Типові високочастотні системи працюють приблизно на рівні 300 кГц, тоді як низькочастотні системи працюють приблизно на рівні 12 кГц.

Залежно від кількості діапазонів, доступних в кінці кожного циклу опитування, позиція транспортного засобу розраховується різними способами. Інформація про глибину від датчиків на борту транспортного засобу та транспондерів використовується для зменшення проблеми триангуляції до двовимірної горизонтальної площини. Якщо доступні діапазони лише від двох зовнішніх транспондерів, транспортний засіб розраховує дві точки перетину діапазонів кола від цих транспондерів. Використовуючи завчасне знання про те, з якого боку базової лінії транспондера він розташований, транспортний засіб може визначити, яке з двох можливих рішень представляє його поточне положення. Три або більше діапазонів транспондера дозволяють транспортному засобу унікально визначити його положення за допомогою методу найменших квадратів. [4]

Після того, як позиція транспортного засобу була «триангульована» за допомогою діапазонів від транспондерів LBL, транспортний засіб розраховує свій маршрут мертвого відліку до наступного набору діапазонів LBL. Після кожного циклу опитування позиція транспортного засобу визначається та використовується для повторного ініціалізації маршруту мертвого відліку. Швидкість оновлення, з якою може бути повторно ініціалізована система, обмежена швидкістю звуку у воді, яка дорівнює приблизно 1500

метрів за секунду у воді. Інтеграція інформації з DVL у рішення мертвого відліку показала значне покращення частот навігації LBL, особливо в низькочастотних налаштуваннях із повільними швидкостями оновлення. Ця система використовує доповнювальні лінійні фільтри для комбінування фіксацій LBL з низьким пропусканням, які є шумними, але глобально точними, з фіксаціями позиції Доплера, які є точними протягом коротких періодів. [7]

Альтернативний обчислювальний алгоритм для навігації AUV за допомогою системи LBL використовує фільтр Калмана (KF). Фільтр Калмана комбінує інформацію від бортових датчиків та завчасне знання про неточності цих датчиків із динамічною моделлю простору стану загальної системи для надання даних про стан у реальному часі. [8] Позиція транспортного засобу спочатку визначається так, як описано вище, але оновлення оцінки позиції обчислюються за допомогою обережного застосування KF. Оскільки рух підводного транспортного засобу є нелінійним, замість цього використовується розширений фільтр Калмана (ЕКФ). Проте основне обмеження використання будь-якого виду фільтра Калмана з системами навігації LBL пов'язане з характером шуму в системі LBL. Систематичні помилки в типовій конфігурації LBL включають невизначеність швидкості води; початкові помилки обстеження позиції бакенів; рух бакенів через течії; акустичні многодоріжкові шляхи; втрата прямого акустичного шляху; та погані співвідношення сигнал/шум через машинний та електромагнітний шум. Тому деякі з отриманих LBL корекцій є неточними з великими, негауссівськими помилками. Ці негауссівські помилки порушують основне припущення алгоритмів фільтра Калмана, що системний шум є гауссівським. В кінці операцій підводного транспортного засобу в районі, акустичні транспондери повинні бути повернуті. Зазвичай більшість морських транспондерів включає акустичний реліз. Коли конкретний кодований акустичний сигнал відправляється до транспондерів, важений

Міцний трос відпускається, і акустичний транспондер піднімається до поверхні для вилучення. Незважаючи на витрати та час, необхідний для обробки акустичних транспондерів, системи навігації LBL залишаються стандартом для дешевих операцій транспортних засобів у глибокому океані.

2. Навігація за допомогою Доплера (Doppler Velocity Log). Розробка високочастотних багатолучевих сонарів Доплера, які забезпечують вимірювання швидкості дна з точністю 0,3% або менше та швидкістю оновлення до 5 Гц, надає дослідникам вимірювання швидкості для навігації біля дна (18–100 м). Це дозволило розробити багато технік навігації на основі Доплера, у тому числі і для поліпшення оцінок стану в інерціальних навігаційних системах (INS) [8].

Doppler Velocity Log (DVL) використовуються в різноманітних підводних апаратах, включаючи автономні підводні судна (AUV), підводні роботи (ROV) та підводні глайдери та є ключовим інструментом для підводних апаратів, який вимірює швидкість відносно морського дна або водної колони, використовуючи ефект Доплера. Вони дозволяють підводним

апаратам здійснювати точну навігацію під водою, де GPS сигнали не доступні. Принцип роботи DVL полягає у випромінює акустичні хвилі (або пучки) у різних напрямках, зазвичай вниз до дна або по водній колоні [9]. Акустичні хвилі відображаються від частинок у воді або морського дна і повертаються до DVL. Коли апарат рухається, частота повернутих акустичних хвиль змінюється через ефект Доплера. DVL вимірює цю зміну частоти між випроміненими та повернутими хвилями, що дозволяє DVL обчислити швидкість руху апарату відносно дна або водної колони. Більшість DVL мають кілька пучків, які випромінюються під різними кутами для обчислення швидкості у трьох вимірах.

2.1 Алгоритм для інтегрованої навігації NARX-RKF (Nonlinear AutoRegressive with eXogenous input model with Robast Kalman Filter). Згідно з аналізом [10], навігаційні параметри взаємопов'язані між собою, а зміщення датчика тісно пов'язане з зовнішнім середовищем та станом руху. Помилки Strapdown Inertial Navigation System (SINS) змінюються за конкретними законами, і помилка статусу навігації сильно корелює з інформацією історії переміщень. Це відповідає характеристикам моделі прогнозування часових рядів, тому використовується модель прогнозування часових рядів для прогнозування виводу DVL. Внутрішню модель помилки інерційного пристрою можна отримати шляхом навчання нейронної мережі. Для цього використовується модель прогнозування на основі мережі NARX. Коли інформація про швидкість виводу DVL є нормальною, інформацію, отриману від рішення SINS, та інформацію про вивід DVL можна використовувати для навчання моделі [11].

У режимі навчання моделі, коли DVL доступний, використовується набір даних, вимірних блоками інерційного вимірювання (IMU), для двоканального рішення. Іншими словами, SINS виводить два набори незалежних даних через рішення двох незалежних каналів. Після надання початкової навігаційної інформації рішення повністю залежить від інерційних даних IMU.

NARX-RKF включає модуль прогнозування несправності DVL на основі моделі NARX та інтегроване навігаційне кільце RKF.

NARX може використовувати інформацію про вивід інерційної навігації для прогнозування виводу, коли DVL переривається, та використовувати RKF для інтегрованої навігації [12].

3. Інерціальна навігація. Блоки інерційного вимірювання (IMU) надають чудові можливості для навігації без зовнішніх опор, але їх споживана потужність (від 12 до 30 В) та вартість (часто більше ніж \$100,000 США) до недавнього часу обмежували їх поширене використання у цивільних океанографічних засобах. Зазвичай IMU використовують для вимірювання швидкості Доплера та вимірювання положення з GPS або акустичних систем навігації для корекції помилок у вимірюваннях IMU. IMU часто використовують у високоточних обстеженнях та коли засоби запускаються під льодовими шапками або у середній глибинній зоні [4].

3.1 Навігація методом навігаційного числення та інерціальні навігаційні системи

Навігація методом навігаційного числення (dead reckoning – DR) та інерціальні навігаційні системи (INS) є базовими навігаційними методами. У обох цих системах транспортний засіб отримує початкове положення, а потім використовує інформацію від бортових сенсорів для постійного оновлення оцінки свого положення. Оскільки позиція транспортного засобу не ініціалізується протягом підводних операцій, помилки в оцінці позиції накопичуються протягом місії. Ці помилки виникають з різних джерел, таких як власна помилка бортових сенсорів, та зовнішніх екологічних сил, які не адекватно спостерігаються сенсорами, використовуваними у відповідній навігаційній системі. [4]

У навігації методом DR швидкість транспортного засобу інтегрується відносно часу, щоб оцінити шлях руху транспортного засобу. Найбільш примітивні системи методом DR оцінюють швидкість, використовуючи апріорні калібрування швидкості гвинта проти швидкості води транспортного засобу. Цей метод генерує лише наближену оцінку передової швидкості, не враховуючи впливи течій чи зсуву. На практиці ці системи не прийнятні для повільних транспортних засобів, таких як AUVs. Тому навігаційні системи включають точні вимірювання швидкості, такі як ті, що отримані з Doppler Velocity Logs (DVL), які вимірюють швидкість транспортного засобу відносно морського дна або водного потоку чи струменю [9].

Аналогічно, у базових системах DR курс може бути визначений тільки магнітним компасом. Проте магнітні компаси можуть бути піддані великим змінним помилкам, особливо біля морського дна, де підводні об'єкти можуть спричинити відхилення курсу компаса від магнітного півночі. Тому гіроскопічні компаси включені в системи DR для покращення точності вимірювань курсу.

Подальше удосконалення концепції навігації навігаційного числення - це інерціальна навігаційна система (INS), яка зазвичай включає інерціальний блок руху/вимірювань із алгоритмом Калмана. Вимірювання прискорення транспортного засобу з інерціального блоку руху інтегруються двічі відносно часу, щоб отримати швидкість транспортного засобу. Алгоритм Калмана - це управляючий алгоритм, який потім включає знання попереднього положення транспортного засобу, вхідні дані сенсора та динамічну модель системи для оцінки поточного положення транспортного засобу.

Основна проблема використання систем навігації DR або INS як єдиного методу навігації підводного транспортного засобу полягає в тому, що помилка оцінки положення постійно збільшується з часом і відстанню.

У поверхневих операціях, коли транспортний засіб може періодично виходити на поверхню і повторно ініціалізувати навігаційну систему за допомогою даних від Глобальної системи позиціонування (GPS), дешеві системи INS можуть бути дуже ефективними. Проте для глибоководних операцій часте виходження

на поверхню для ініціалізації системи не є можливим. Хоча існують дуже точні системи навігації на основі INS, їх завищена вартість, розмір та потреби у живленні традиційно робили їх абсолютно непридатними для малих, недорогих транспортних засобів. Прогрес в технології компонентів продовжує знижувати вартість та розмір високоточних систем навігації INS, але, на сьогоднішній день, зовнішні акустичні системи позиціонування залишаються стандартом для наукових місій на малих, недорогих підводних транспортних засобах

4. Глобальна система позиціонування Глобальні системи позиціонування (ГСП або GNSS - Global Navigation Satellite Systems) використовують сигнали від супутників, які обертаються навколо Землі, для визначення географічного положення об'єкта на поверхні Землі [13]. Найбільш відомою і розповсюдженою ГСП є GPS (Global Positioning System). Сигнали GPS у радіочастотному діапазоні блокуються морською водою, тому сигнали GPS не можуть безпосередньо прийматися глибоко зануреними океанічними засобами. Проте GPS часто допомагає ряду технік навігації підводних транспортних засобів, включаючи обстеження акустичних передатчиків, корекцію положення для IMU, калібрування вирівнювання сонарів Доплера та поверхневі системи LBL. ГСП базуються на супутниках, які посилають специфічні радіосигнали. Кожна система має велику кількість супутників, що забезпечують покриття всієї поверхні Землі. Обладнання має приймач, який "ловить" сигнали від чотирьох або більше супутників. Використовуючи час відправки, час прийому та відому позицію супутника, приймач може визначити свою точну географічну позицію (широта, довгота та висота). Сучасні комерційні системи можуть забезпечити точність позиціонування від 3 до 10 метрів. Спеціальне обладнання та корекційні сигнали можуть покращити цю точність до декількох сантиметрів.

5. Навігація з використанням спостерігачів траєкторії на основі дифузії. У цій статті представлено підхід для оцінки траєкторії підводного апарату, використовуючи головним чином гіродоплерівські вимірювання (вимірювання швидкості) та систему акустичного позиціонування (горизонтальне положення). Метод заснований на використанні дифузійних спостерігачів, які, на відміну від традиційних спостерігачів стану, здатні обробляти цілі сегменти траєкторії системи за раз [14]. Таким чином, вони будуть називатися спостерігачами траєкторії. Як видно, однією з головних переваг такого підходу є те, що, на відміну від інших досліджень з навігації, багато труднощів, пов'язаних із комбінацією доплерівського гіроскопа/USBL (різні швидкості інформації, дрейф доплерівського гіроскопа, виходи, збої в системі акустичного позиціонування тощо), розглядаються дуже просто, починаючи з тих самих основних рівнянь, таким чином ведучи до досить єдиного погляду на проблему. Ще одна суттєва перевага методу полягає в тому, що структура диференціальних рівнянь із частинними похідними (PDE), у яку він вбудований, дозволяє проводити

суворе практичне та теоретичне дослідження, оскільки доступно багато математичних інструментів для вирішення важливих питань, таких як стабільність, надійність, реалізація, а метафора дифузії використовується в усьому документі дозволяє підтримувати алгоритмічний опис у відносно простій, інтуїтивно зрозумілій та компактній формі.

6. Використання асинхронних ГАНС для забезпечення навігації груп AUV

6.1. Поширенням рішенням навігації груп AUV вважається використання асинхронної LBL з донними або поверхневими маяками-відповідачами (МВ). Даний метод навігації ґрунтується на вимірюванні часу відгуку маяка відповідача на вихідний від підводного апарату сигнал. Передбачається, що в акваторії на відстані не більше 10-15 кілометрів від підводного апарату є набір МВ (не менше 2), шляхом триангуляції отриманих часових затримок відгуку від маяків відповідачів встановлюється відстань від МВ до AUV. При цьому кількість МВ істотно покращує точність визначення місцезнаходження AUV.

При реалізації такого підходу для навігації груп AUV виникає проблема, при якій необхідно із заданою оптимальною періодичністю надавати гідроакустичний канал зв'язку кожному AUV, що входить до групи, для визначення свого місцеположення. Що по черзі призводить до істотного затягування процесу навігації окремого підводного апарату. При цьому також виникають проблеми при необхідності додавання нового AUV до складу існуючої групи. Оскільки доводиться виділяти нове часові вікно для нового підводного апарату.

У роботі [15] розроблена комплексна система підводного позиціонування і зв'язку для управління кількома автономними підводними апаратами. Вона складається з напівзануреного автономного надводного апарату як ретрансляційної системи позиціонування і зв'язку на рухомій поверхні, телеуправління безпілотного підводного апарату як ретрансляційної системи підводного зв'язку та LBL для індивідуальної орієнтації AUV (три надводних буя). Час випромінювання синхронізовано із сигналом системи динамічного позиціонування. AUV у зоні дії трьох буїв можуть приймати три сигнали передавача за допомогою встановленого гідрофона та розраховувати своє місцеположення за різницею у часі прийнятих сигналів, на додачу до даних їхнього датчика глибини.

6.2. Алгоритм вирішення навігаційного завдання для групи AUV в рамках проекту THESAURUS використовує дані від USLB і ґрунтується на фільтрі Калмана (ФК) з урахуванням особливостей організації мережевого зв'язку. Відносно єдиної станції морського дна AUV можуть оцінювати своє місцезнаходження без необхідності використання високошвидкісної інерціальної навігаційної системи або труднощів калібрування. Метод підходить для автономних підводних апаратів, оскільки не вимагає жодної іншої зовнішньої допомоги, крім єдиної станції морського дна. Основна ідея полягає в використанні взаємних акустичних вимірювань між транспортним засобом і єдиною станцією

морського дна. Принцип дії простий: AUV починає з акустичного опитування єдиної станції морського дна і вимірює відстань між двома блоками, а також пеленг єдиної станції морського дна відносно AUV в системі відліку AUV; потім, єдина станція морського дна обчислює пеленг AUV відносно себе і передає цю інформацію назад в AUV за допомогою аналогічного акустичного пристрою.

Об'єднуючи цю інформацію та вводячи її в структуру нелінійного фільтра, який включає вимірювання швидкості руху AUV по землі та кутової швидкості ризику, AUV обчислює оцінки свого положення та курсу. Ефективність методу була перевірена за допомогою моделювання, заснованого на результатах експерименту.

7. Алгоритми організації групової навігації, засновані на використанні інформації про дистанції між AUV всередині групи.

Існує AUV лідер, який визначає своє місцезнаходження з високою точністю. Інші апарати у групі визначають своє положення на основі обчислення з використанням бортових навігаційних датчиків і уточнюють його на основі даних про відстані до апарата лідера. У статті [16] описана ГАНС з мобільною базою. У даному випадку декілька дорогих AUV, оснащених високоточною навігаційною системою, виконують роль маяків для інших більш простих та дешевих AUV.

Аналогічна ідея описана в роботі [17], в якій у місії брали участь два типи апаратів: дорогий з навігаційною системою високої точності та дешевий з навігаційною системою низької точності. Треба було за допомогою гідроакустичних модемів забезпечити навігацію дешевих апаратів з точністю дорогих апаратів. При вирішенні завдання було здійснено порівняння методу триангуляції з ФК, де фільтр Калмана показав вищу точність оцінювання місцезнаходження підводних апаратів.

У статті [18] запропоновано єдиний метод спільної навігації провідного і проведеного AUV, який в основному фокусується на плануванні оптимального шляху провідного AUV методом різниці в часі, за умови, що шлях проведеного AUV було заплановано. Спочатку встановлюється модель спільної навігації з декількома AUV і аналізується спостережувана проблема системи. По-друге, для єдиної системи спільної навігації AUV провідний-проведений створена базована на процесі прийняття рішень Маркова модель спільної навігації з декількома AUV, і розроблений метод планування шляху провідного AUV на основі методу різниці в часі. Алгоритми нелінійного розширеного фільтра Калмана і нелінійної фільтрації фільтра Калмана застосовуються для моделювання та перевірки алгоритму, запропонованого в цій статті. Результати показують, що теоретичну помилку позиціонування проведеного AUV можна регулювати приблизно до 3,2 м, плануючи траєкторію провідного AUV з використанням методу різниці в часі. Цей метод може не тільки зменшити помилку спостереження та помилку позиціонування проведеного AUV протягом всього процесу спільної навігації, але також підтримувати відносну відстань

вимірювання між провідним AUV та проведеним AUV в відповідному діапазоні.

Висновки

Останнє десятиліття прогресу в технології та алгоритмах підводної навігації значно покращило існуючі методи навігації та, більше того, призвело до з'явлення нових методів навігації. Оскільки дослідження у сфері навігації розвивається, щоб відповідати на ці виклики, інновації у цій сфері забезпечуватимуть нові завдання для підводних транспортних засобів, які раніше вважалися непрактичними або нездійсненними:

- покращення навігації біля дна. Хоча точність та частота оновлення багатьох технік навігації біля дна достатні для динамічного позиціонування, ці характеристики все ще поступаються тим, що є у високороздільних наукових сенсорах. Додаткові покращення в навігації біля дна допоможуть заповнити цей розрив та, в результаті, дозвлять вченим більш повно використовувати наукові дані про процеси біля дна;

- навігація з декількома транспортними засобами Завдяки досягненням у сфері акустичних модемів та технік навігації з одностороннім часом подорожі, дослідники можуть розглядати методології навігації, які використовують дані з декількох транспортних засобів. У таких техніках транспортний засіб використовує інформацію про стан і сенсори інших транспортних засобів, додатково до даних, які він має від власних сенсорів та систем навігації. Розгортання декількох транспортних засобів на місцях наукового інтересу (наприклад, термокліни або гідротермальні виходи) разом із покращеними техніками оцінки стану навколишнього середовища та навігації значно підвищує нашу здатність ефективно проводити пошук, локацію та вивчення наукових процесів. Можливість транспортних засобів працювати в одному регіоні та обмінюватися інформацією може дозволити зменшити витрати ресурсів (наприклад, LBL-транспондери, високороздільні батиметричні зонди, гіроскопи), необхідні для дослідження океану. Ці досягнення значно підвищать наші можливості використовувати підводні транспортні засоби в океанографії і, можливо, змінять стратегії дослідження океану.

- навігація в середньозоні Тривимірною навігацією по поверхні була успішно вирішена за допомогою GPS, а також доплерових сонарів і навігації за орієнтирами в значній мірі покращили навігацію поблизу дна. Проте акустичні системи часу польоту та інерціальні вимірювальні пристрої (IMU) є єдиними ефективними сенсорами для вимірювання стану XY в середній зоні глибин (водяний шар подалі від поверхні моря та подалі від дна моря). Це обмежує нашу здатність до точної навігації в цьому регіоні океану. На даний момент ці техніки є достатніми для океанографічних досліджень, однак постійне збільшення інтересу до кількісної біологічної та фізичної океанографії в середній зоні глибин стимулює розробку вдосконалених систем навігації. Обмежена кількість вимірювань сенсорів, доступних на цих глибинах, передбачає важливу роль модельних оцінювачів стану в цих досягненнях.

У випадку, коли транспортні засоби працюють в середній зоні глибин одночасно з транспортними засобами, які працюють близько до поверхні або біля дна, досягнення у сфері навігації декількома транспортними засобами можуть сприяти поліпшенню навігації в цих умовах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kinsey J. C. A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges / James C. Kinsey, Ryan M. EUSTICE, Louis L. Whitcomb // IFAC conference of manoeuvring and control of marine craft. – 2006. – P. 1–12.
2. Smallwood D. A. A new hydrodynamics test facility for UUV dynamics and control research / D. A. Smallwood, J. C. Kinsey, L. L. Whitcomb // Proceedings of IEEE/MTS Oceans. – 2003. – P. 356–361.
3. Bingham B. Hypothesis Grids: Improving Long Baseline Navigation for Autonomous Underwater Vehicles [Electronic resource] / B. Bingham, W. Seering // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2006. – Vol. 31, no. 1. – P. 209–218. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/joe.2006.872220>.
4. Inzartsev A. Underwater Vehicles / Alexander Inzartsev. – London: Intechopen, 2009. – 596 p.
5. USBL Integration and Assessment in a Multisensor Navigation Approach for AUVs 1 This work is partially supported by Ministry of Economy and Competitiveness under contracts TIN2014-58662-R, DPI2014-57746-C3-2-R and FEDER funds. [Electronic resource] / Eric Guerrero Font [et al.] // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Vol. 50, no. 1. – P. 7905–7910. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.754>.
6. Dubrovin F. Navigation for AUV, located in the shadow area of LBL, during the group operations / Fedor Dubrovin // Global Oceans 2020: Singapore–US Gulf Coast. IEEE. – 2020. – P. 1–6.
7. Leonard J. J. Autonomous underwater vehicle navigation / John J. Leonard, Alexander Bahr // Springer handbook of ocean engineering. – 2016. – P. 341–358.
8. Wang Q. System noise variance matrix adaptive Kalman filter method for AUV INS/DVL navigation system [Electronic resource] / Qiuying Wang, Kaiyue Liu, Zhongyi Cao // Ocean Engineering. – 2023. – Vol. 267. – P. 113269. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113269>
9. An experimental comparison of Deep Learning strategies for AUV navigation in DVL-denied environments [Electronic resource] / Edoardo Topini [et al.] // Ocean Engineering. – 2023. – Vol. 274. – P. 114034. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114034>
10. An INS/GNSS integrated navigation in GNSS denied environment using recurrent neural network [Electronic resource] / Haifa Dai [et al.] // Defence Technology. – 2020. – Vol. 16, no. 2. – P. 334–340. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.08.011>
11. A SINS/DVL Integrated Positioning System through Filtering Gain Compensation Adaptive Filtering [Electronic resource] / Xiaozhen Yan [et al.] // Sensors. – 2019. – Vol. 19, no. 20. – P. 4576. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/s19204576>
12. Navnet: AUV Navigation Through Deep Sequential Learning [Electronic resource] / Xin Zhang [et al.] // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 59845–59861. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2982272>
13. Petritoli E. High Accuracy Attitude and Navigation System for an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) [Electronic resource] / Enrico Petritoli, Fabio Leccese // ACTA IMEKO. – 2018. – Vol. 7, no. 2. – P. 3. – Mode of access: https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v7i2.535
14. Jouffroy J. Underwater Vehicle Navigation Using Diffusion-Based Trajectory Observers [Electronic resource] / Jérôme Jouffroy, Jan Opderbecke // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2007. – Vol. 32, no. 2. – P. 313–326. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/joe.2006.880392>
15. Development of a Regional Underwater Positioning and Communication System for Control of Multiple Autonomous Underwater Vehicles / Sasano M., Inaba S., Okamoto A.—// Proc. of the IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV).— 2016.— № 6.— P. 431–434.
16. Experimental Validation of the Moving Long Base Line Navigation Concept / Vaganay J., Leonard J., Curcio J., Willcox S.— // Proc. of the Int. Conf. AUV.— 2004.— № 4.— P. 1–7.
17. An Algorithm for Cooperative Navigation of Multiple UUVs / Zhang L., Xu D., Liu M., Yan W., Gao J.—// Proc. of the sixth Int. Symposium on Underwater Technology, UT2009,— 2009.— № 78.— P. 1–6.
18. Comparing Kalman and particle filter approaches to coordinated multi-vehicle navigation / Mirabellot D., Sandersont A., Bliedberg D.—// Proc. of the Int. Conf. UUST 2007.— 2007.— № 78.— P. 1–6.

Received (Надійшла) 11.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.11.2023

Analysis of contemporary methods and prospects for the development of underwater vehicle navigation

A. Zaiets, Y. Kalinichenko

Abstract. This article conducts a comprehensive analysis of modern navigation methods for autonomous underwater vehicles, emphasizing their technological features, advantages, and limitations. Primary attention is given to five key methods: acoustic navigation, global positioning systems, Doppler velocity log (DVL) navigation, inertial navigation, trajectory observation navigation based on diffusion, as well as ensuring the navigation of groups of underwater vehicles. The study's results indicate that integrating various navigation methods can significantly enhance the reliability and accuracy of positioning underwater vehicles, ensuring effective mission execution in challenging conditions. Considering current technology development trends and operational requirements, the article also outlines directions for further research and developments in underwater navigation.

Keywords: autonomous underwater vehicles, acoustic navigation, Long Baseline, Ultra Short Baseline, Short Baseline, Kalman filter, Doppler Velocity Log, algorithm for integrated navigation NARX-RKF, dead reckoning navigation method and inertial navigation systems.