

Підвищення точності пошуку координат морських мін засобами кінематичного проектування

І.С. Афтаназів, Л.І. Шевчук, І.Г. Свідрак, О.І. Строган, Л.Р. Струтинська
НУ “Львівська політехніка”, Львів, Україна

Анотація: Розглянуто актуальне для Європи на період активного розгортання на її території воєнних протистоянь питання розмінування водойм, річок та морських рейдів і портів. Тільки у морських територіальних водах України та в акваторіях її прісноводних водойм і річок за рік війни ворогом встановлено до тисячі різноманітних мін. Розмінування українських водних просторів моря, водойм та річок – важлива соціальна та економічна проблема, вирішення якої не терпить зволікання та очікування на повне завершення воєнних дій.

Мета роботи – розробка принципових схем оптимізації просторових переміщень пошукових розміновувальних суден та створення алгоритмів розрахунків уточнених координат просторового розташування плавучих, якірних та донних мін засобами кінематичного проектування.

Методологією проведення досліджень було застосування положень теорії відображення координат та траєкторій просторових переміщень рухомих об'єктів засобами нарисної геометрії із врахуванням специфіки та динамічних особливостей кінематичного проектування.

Розроблено принципову схему просторового розташування пошукових катерів-тралівників та БПЛА або допоміжних пошукових плавучих засобів при пошуку мін. Також встановлено математичні залежності для уточненого розрахунку координат виявлених мін на підставі даних застосованої теорії та схем кінематичного проектування. Для пошуку плавучих мін запропонована оптимальна траєкторія пошукових переміщень безпілотних літальних апаратів по спіралі Архімеда. Визначено оптимальну кількість літальних апаратів, що одночасно здійснюють пошуки плавучих мін. Як один із найдієвіших варіантів знешкодження мін запропоновано їх підірвання боезарядами, скинутими із літального безпілотника-ліквідатора.

Основним результатом дослідження є створення методики розрахунків уточнених координат пошуку плавучих, якірних та донних мін у поєднанні із оптимізацією траєкторій пошукових переміщень літальних та плавучих пошукових засобів по спіралі Архімеда. Цим забезпечується не тільки збільшення на 25–30% обстежених і розмінованих площ, а і пропорційна економія палива за рахунок зменшення обсягів переходів пошукових катерів-тралівників. Встановлено, що при швидкостях просторових переміщень пошукових літальних апаратів або допоміжних плавучих засобів $5 \div 5,5$ м/с, використовуючи запропоновану схему пошуку, можна щогодинно обстежувати до 6 квадратних кілометрів акваторії моря. При цьому можна зекономити до третини витрат вартісного палива завдяки зменшенню переміщень катера-тралівника.

Ключові слова: пошук, плавуча, якірна або донна міна, розмінування, катер-тралівник, літальний апарат, дрон, додатковий плавучий засіб, розрахунок, координати, кінематичне проектування.

Вступ

На період активного розгортання на території Європи воєнних протистоянь особливої вагомості набувають питання розмінування водойм, річок та морських рейдів і портів. Вбивство та каліцтво військових та мирного населення, перешкоди судноплавству та морській торгівлі – ось далеко не повний перелік завданих мінуванням ворогом втрат та збитків.

І якщо пошук та уточнення координат осібних мін та мінних полів на суходолах більш-менш узабезпечений надійними методиками та технічними засобами, то виявлення і знешкодження морських мін і надалі залишається проблемою підвищеної складності. Обумовлено це, перш за все, недосконалістю наявної пошукової апаратури, спроможної із достатньо високою точністю визначити у товщах морських чи прісних вод точні координати просторового розташування плавучих, якірних, а особливою мірою, донних мін [1]. Тому розмінування водних просторів моря, водойм та річок, у тому числі і українських, - важлива соціальна та економічна проблема, вирішення якої не терпить зволікання та очікування на повне завершення воєнних дій.

Метою даного дослідження була розробка принципових схем оптимізації просторових переміщень пошукових розміновувальних суден та створення алгоритмів розрахунків

уточнених координат просторового розташування плавучих, якірних та донних мін засобами кінематичного проектування.

Методологією проведення досліджень було застосування положень теорії відображення координат та траєкторій просторових переміщень рухомих об'єктів засобами нарисної геометрії із врахуванням специфіки та динамічних особливостей кінематичного проектування.

Матеріали і методика дослідження Аналіз застосовування різноманітних засобів для пошуку та знешкодження плавучих мін свідчить, що найоптимальнішим буде органічне поєднання переваг застосування морських плавучих засобів та літаючої техніки [2, 3]. Наприклад, це могло б бути поєднання одночасного застосування катерів-тралівників із безпілотними літальними апаратами (БПЛА). На катері-тралівнику, наприклад, моделі ARCIS Atlas Electronik, повинні бути облаштовані командний пункт із засобами керування пошуковими переміщеннями літальних апаратів та програмним забезпеченням розрахунків координат виявлених мін, радіолокаційна станція (РЛС) для відслідковування БПЛА, площадка для запуску та посадки літальних апаратів і звичайно спорядження для дистанційного знешкодження виявлених мін [1, 3, 4]. Виявлені дронами плавучі міни доцільно постійно відстежувати, а ще краще, забезпечивши безпеку для морських плавзасобів та людей, знищувати. Для цього можуть бути використаними ті ж таки пошукові дрони, що замість пошукової апаратури оснащені підвісними боезарядами [5].

Результати дослідження. Розмінування морської акваторії від плавучих мін із використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [2], відображено на рис. 1. Катер-тралівник 1 із завантаженими на нього чотирма БПЛА типу “дрон” 2, що оснащені пошуковим обладнанням, а також вибуховими зарядами для підриву виявлених мін, заходить в центральну частину виділеної йому для пошуків мін 3 ділянки акваторії моря. Виштовані в ряд пошукові дрони переміщуються навколо катера-тралівника по спіралі Архімеда, крок якої рівний сумарній довжині діаметрів ефективної дії пошукової апаратури дронів. Центр спіралі Архімеда, по якій переміщуються в повітрі пошукові дрони 2, умовно облаштований на катері-тралівнику 1, а висота польоту не перевищує радіуса r ефективної дії пошукової апаратури

(рис. 1). Траєкторія руху пошукових дронів по спіралі Архімеда обрано із двох міркувань:

- дана траєкторія не допускає наявності необстежених ділянок акваторії моря;
- ця плавна траєкторія, на відміну від інших можливих, не передбачає зворотних рухів та стрімких поворотів, що не є бажаним для літальних апаратів.

У випадку виявлення будь-яким із трьох дронів плавучої міни, дрони розташовуються над нею рівностороннім трикутником і використовуючи відповідну програму, уточнюють координати розташування даної міни (рис. 1). Дана програма передбачає запровадження уявної системи ортогональних просторових Декартових координат із розташуванням початку відліку координат на місці катера-тралівника 1 [3].

Встановленою на катері-тралівнику 1 радіолокаційною станцією (РЛС) визначають координати кожного із розміщених над міною 3 дронів 2 у запровадженій системі. До цих координат належить віддаль l від РЛС до кожного із трьох пошукових дронів 2, а також кути нахилу уявних проектуючих променів, що проходять від РЛС до кожного із дронів. На рис. 1 ці побудови позначено наступним чином:

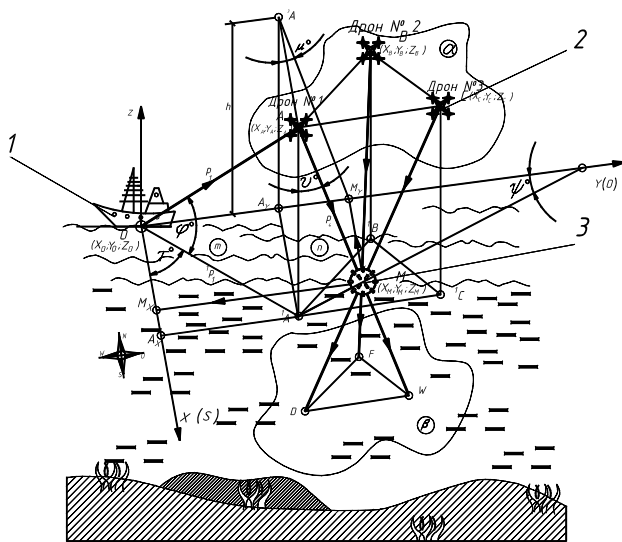


Рис. 1. Схема розрахунку координат виявленої пошуковими дронами плавучої міни

- пошукові дрони №1-А, №2-В та №3-С, а їх проекції на площину поверхні моря відповідно ${}^1A, {}^1B, {}^1C$;
- віддаль від РЛС до пошукових дронів $l_1 = OA; l_2 = OB; l_3 = OC$;
- проектуючі промені, що проходять від РЛС через пошукові дрони – p_1, p_2, p_3 . Їх проекції на площину поверхні моря відповідно ${}^1p_1, {}^1p_2, {}^1p_3$;
- кути між проектуючими променями та їх проекціями на площину поверхні моря відповідно:

$\varphi^\circ = p_1 \wedge {}^1p_1 = OA \wedge O^1A$ (рис. 1); $\nu^\circ = p_4 \wedge {}^1A = AM \wedge A^1A$ - кут нахилу цих проектуючого променя до перпендикуляра з точки A на поверхню площини моря,

Подальші розрахунки координат розташування виявленої міни здійснюють використовуючи відповідне програмне забезпечення. При цьому позначають утворену трьома дронами площину як базову площину $\alpha(A, B, C)$. Ця базова площина α паралельна поверхні

моря і віддалена від нього на висоту $h = \left| \alpha \perp \Pi \right|$. Нижче поверхні моря на глибині $h_1 = \frac{h}{2}$

уявно облаштовують програмою розрахунків ще одну паралельну поверхні моря ${}^1\Pi(x, y)$ та базовій площині $\alpha(A, B, C)$ так звану “картинну” площину β . Продовжують уявні проектуючі промені p_4, p_5 та p_6 , що проходять від пошукових дронів 2 через виявлену міну M , до перетину із “картинною” площиною β і розраховують координати їх точок перетину.

Координати виявленої міни (точка M) у прийнятій системі координат матимуть наступні розрахункові значення

$$x_M = x_A \pm \Delta x_M = l_1 \cdot \cos \varphi \cdot \cos \tau \pm h \cdot \operatorname{tg} \nu \cdot \sin \psi = h \left(\frac{\cos \tau}{\operatorname{tg} \varphi} \pm \operatorname{tg} \nu \cdot \sin \psi \right);$$

$$y_M = y_A \pm \Delta y_M = l_1 \cdot \cos \varphi \cdot \sin \tau \pm h \cdot \operatorname{tg} \nu \cdot \cos \psi = h \left(\frac{\sin \tau}{\operatorname{tg} \varphi} \pm \operatorname{tg} \nu \cdot \cos \psi \right),$$

$$z_M = 0$$

Тут τ° – кут між ${}^1p_1 = O^1A$ та віссю x ;

ψ° – кут нахилу площини, утвореної проектуючим променем p_4 та його проекцією 1p_4 , до вертикальної площини проекцій ${}^3\Pi(y; z)$.

Знак «+» у вище приведених залежностях застосовують якщо кут ψ° гострий, і знак «-» якщо він тупий.

За аналогічною схемою використання кінематичного проектування для уточнення координат просторового розташування об'єктів здійснюють і пошук якірних та донних мін. Пропоновану принципову схему уточнення координат при пошуку якірних мін відображено на рис. 2. У цій схемі в якості пошукових пристроїв використовують оснащені аналогічною пошуковою та обчислювальною апаратурою катер-тралівник та допоміжний пошуковий плавучий засіб (ДПЗ), наприклад, морський моторизований катер.

Як і катер-тралівник 1 допоміжний пошуковий плавучий засіб 2 облаштований пошуковою гідроакустичною локаційною апаратурою. Вилаштуванням у одну лінію катеру-тралівнику та допоміжному плавучому засобу в процесі пошуку мін 3 надають переміщення по спіралі Архімеда, крок якої рівний

$$t = D + d,$$

Де D та d – відповідно діаметри півсфер ефективного пошуку гідроакустичної апаратури катера-тралівника та допоміжного плавучого засобу.

Центр спіралі Архімеда, по якій переміщаються пошукові судна, умовно облаштований в центрі пошукової ділянки акваторії моря.

У якості базової площини $\alpha(A, B, C)$ в цьому випадку фігурує поверхня моря із умовно розміщеними в ній взаємно перпендикулярними осями x та y запровадженої просторової системи координат. Картинну площину β призначають в товщі морських глибин чи у дні водойми на віддалі H від поверхні водойми, що у 1,2–1,5 перевищує прогнозовану глибину розташування виявленої міни. Виявлені пошуковою апаратурою катера-тралівника 1 та ДПЗ 2 напрями на знайдену міну 3 спеціальною розрахунковою програмою на моніторі обчислювальної техніки замінюють проектуючими променями, перетин яких у точці M і надає інформацію про місце розташування міни 3 (рис. 2).

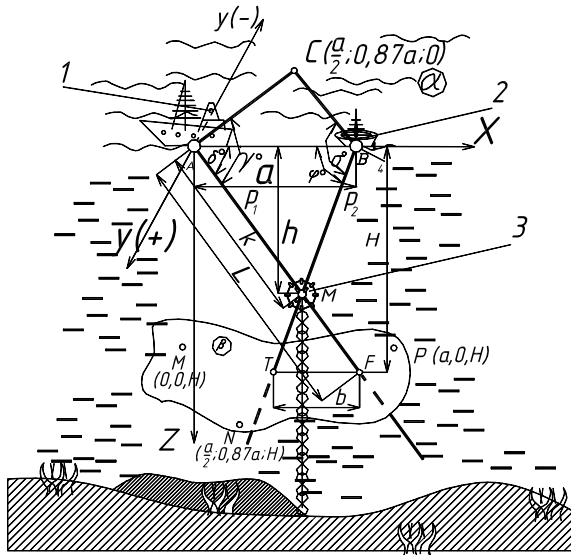


Рис. 2. Принципова схема використання кінематичного проектування для пошуку та визначення координат морських якорних мін

Визначають два вагомі для успішного пошуку міни параметри, а саме глибину розміщення міни h та віддаленість k цієї міни від катера-тралівника. Для цього використовують математичні залежності

$$k = h\sqrt{1 + (C \operatorname{tg} \varphi)^2}; \quad h = H \left(1 - \frac{b}{a+b}\right),$$

де k – віддаль від катера-тралівника до виявленої міни;

h – глибина розташування міни відносно поверхні водного плеса водойми чи моря;

H – задана віддаль від поверхні моря до “картинної” площини;

a – віддаль між катером-тралівником та ДПЗ;

b – віддаль між точками перетину проектуючих променів гідроакустичних пристроїв із “картинною” площиною;

φ – кут нахилу проектуючого променя (азимуту) гідроакустичного пристрою до лінії a .

Обговорення результатів дослідження. Основним результатом дослідження є створення методики розрахунків уточнених координат пошуку плавучих, якорних та донних мін у поєднанні із оптимізацією траєкторій пошукових переміщень літальних та плавучих пошукових засобів по спіралі Архімеда. Цим забезпечується не тільки збільшення на 25–30% обстежених і розмінованих площ, а і пропорційна економія палива за рахунок зменшення обсягів переходів пошукових катерів-тралівників. Встановлено, що при швидкостях просторових переміщень пошукових літальних апаратів або допоміжних плавучих засобів $5 \div 5,5$ м/с, використовуючи запропоновану схему пошуку, можна щогодинно обстежувати до 6 квадратних кілометрів акваторії моря. При цьому можна зекономити до третини витрат вартісного палива завдяки зменшенню переміщень катера-тралівника.

Висновки

1. Новітні можливості та технології виготовлення вибухових речовин, застосовувані для виготовлення мін сучасні матеріали, високоякісна електроніка керування моментом вибуху та інші досягнення перетворили сучасні морські міни із “пасивного очікувача” в потужних гіперактивних автономних руйнівників водних плавучих засобів.

2. Суть запропонованого методу полягає у застосуванні для пошуку плавучих мін групи безпілотних літальних апаратів типу “дрон”, результати пошуків яких зводяться до розрахунків координат виявленої плавучої міни засобами кінематичного проектування. Використання малогабаритних економних пошукових літальних апаратів усуває потребу в пошукових переміщеннях катерів-тралівників. Це відчутно здешевлює пошукові роботи, підвищує їх безпеку для командного складу катерів-тралівників.

3. Серед когорти можливих траєкторій переміщень додаткового пошукового судна та катера-тралівника при пошуках якірних та донних морських мін рекомендовано як оптимальну траєкторію пошукових переміщень групою, наприклад, із двох вилаштуваних в ряд суден по спіралі Архімеда із міжвитковим кроком, пропорційним кількості пошукових суден та радіусу ефективної дії їх пошукової апаратури.

Список літератури

1. Apalkov Ju.V. VMF SSSR y Rossyy. Korably protyvomynnoj oborony. Chast 2. - SPb: Morskoe nasledye, 2019. - 224 p. - ISBN 978-5-905795-32-9. [in Russian].
2. Kucherenko, Yu.F., Naumenko, M.V. & Kuznietsova M.Iu. (2018). Analysis of the experience of using unmanned aerial vehicles and determining the direction of their further development in conducting network-centric operations [Analiz dosvidu zastosuvannya bezpilotnykh litalnykh aparativ ta vyznachennia napriamku yikh podalshoho rozvytku pry provedenni merezhentsentrychnykh operatsii]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, 1, 25–30. doi:10.30748/soivt.2018.53.03 [in Ukrainian].
3. Svidrak, I.G., Aftanaziv, I.S., Shevchuk, L.I. & Strohan, O.I. (2022). Determination of coordinates of unmanned aircrafts by means of kinematic projection. *Mathematical Modeling and Computing*, 9(2), 459–469. doi: <https://doi.org/10.23939/mmc2022.02.459> [in English].
4. Lavrivskiy, M.Z. & Tur, N.Ye. (2015). The use of unmanned aerial vehicles in monitoring emergency situations in forest areas [Vykorystannia bezpilotnykh litalnykh aparativ v monitorynhu nadzvychainykh sytuatsii u lisovii mistsevosti]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, 258, 353–359. [in Ukrainian].
5. Svidrak, I.H., Aftanaziv, I.S., Strohan, O.I. & Shevchuk, A.O. (2021). Kinematic projection in modern technologies [Kinematychnе proetsiuvannia v suchasnykh tekhnolohiiakh]. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnolohii imeni S. Z. Gzhytskoho. Serii "Kharchovi tekhnolohii"*, 23(96), 67–75. doi: <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9612> [in Ukrainian].

Increasing the accuracy of finding the coordinates of sea mines by means of kinematic design

I. Aftanaziv, L. Shevchuk, I. Svidrak, O. Strohan, L. Strutynska

Abstract. *The issue of demining reservoirs, rivers and sea raids and ports, which is relevant for Europe during the period of active deployment of military confrontations on its territory, is considered. Only in the maritime territorial waters of Ukraine and in the water areas of its freshwater reservoirs and rivers, during the year of the war, the enemy laid up to a thousand different mines. Demining of the Ukrainian water spaces of the sea, reservoirs and rivers is an important social and economic problem, the solution of which does not tolerate delay and waiting for the full end of hostilities.*

The purpose of the work is the development of principle schemes for optimizing the spatial movements of search and mine clearance vessels and the creation of algorithms for calculating the precise coordinates of the spatial location of floating, anchor and bottom mines by means of kinematic design.

The research methodology was the application of the theory of mapping coordinates and trajectories of spatial movements of moving objects by means of graphic geometry, taking into account the specifics and dynamic features of kinematic design.

A schematic diagram of the spatial location of search trawlers and UAVs or auxiliary search floats when searching for mines has been developed. Mathematical dependencies have also been established for the precise calculation of the coordinates of detected mines based on the data of the applied theory and kinematic design schemes. For the search for floating mines, the optimal trajectory of search movements of unmanned aerial vehicles along the Archimedean spiral is proposed. The optimal number of aircraft that search for floating mines at the same time has been determined. As one of the most effective options for the disposal of mines, their detonation with warheads dropped from an aerial liquidator drone has been proposed.

The main result of the study is the creation of a methodology for calculating the refined coordinates of the search for floating, anchor and bottom mines in combination with the optimization of the trajectories of the search movements of aerial and floating search vehicles along the Archimedean spiral. This ensures not only a 25-30% increase in surveyed and demined areas, but also a proportional saving of fuel due to a reduction in the number of crossings of search trawlers. It has been established that at speeds of spatial movements of search aircraft or auxiliary floating means of 5÷5.5 m/s, using the proposed search scheme, it is possible to survey up to 6 square kilometers of sea water area every hour. At the same time, it is possible to save up to a third of the cost of expensive fuel due to the reduction of movements of the trawler boat.

Keywords: *search, floating, anchor or bottom mines, mine clearance, trawler boat, aircraft, drone, additional floating means, calculation, coordinates, kinematic design.*