

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-2>
УДК 629.7:629.072.1

АФТАНАЗІВ ІВАН

Національний університет «Львівська політехніка» м. Львів, Україна
<http://orcid.org/0000-0003-3484-7966>
e-mail: ivan.aftanaziv@gmail.com

КОРЕНДІЙ ВІТАЛІЙ

Національний університет «Львівська політехніка» м. Львів, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-6025-3013>
e-mail: vitalii.m.korendii@lpnu.ua

СТРОГАН ОРИСЯ

Національний університет «Львівська політехніка» м. Львів, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-1790-6736>
e-mail: orysia.i.strohan@lpnu.ua

ФОСТЯК ВІТАЛІЙ

Національний університет «Львівська політехніка» м. Львів, Україна
e-mail: vitalii.t.fostiak@lpnu.ua

АЛГОРИТМ ПЕРЕХОПЛЕННЯ ТА ЗНИЩЕННЯ ВОРОЖИХ БПЛА КЕРОВАНИМИ ІШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ ДРОНАМИ-ЛІКВІДАТОРАМИ

Для підвищення обороноздатності населених пунктів та об'єктів їх інфраструктури, а також обороноздатності військових підрозділів України завдяки надійному спротиву атакам ворожих диверсійно-розвідувальних та ударних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) створена вдосконалена схема визначення точних координат рухомих у повітряному просторі об'єктів засобами кінематичного проектування.

Створена методика визначення траєкторій просторових переміщень рухомих об'єктів, їх швидкостей та координат засобами кінематичного проектування. У тому числі розроблено принципові схеми оптимального розміщення пошукового радіолокаційного устаткування для успішного виявлення ворожих літальних апаратів з метою подальшого їх знищення. Згідно запропонованій схемі визначені координати та параметри просторових переміщень ворожих БПЛА спрямовуються на опорні командні пункти, які оснащені дронами-ліквідаторами (камікадзе) та стрілецькою зброєю або на пункти управління зенітно-ракетними комплексами (ЗРК), які ліквідують ці літальні апарати.

Використання методик та засобів кінематичного проектування передбачає запровадження додаткового пошукового радіолокаційного обладнання, встановленого на піднятому в повітряний простір дроні-операторі, а також математичного апарату уточнених розрахунків координат і параметрів просторових переміщень рухомих об'єктів. Завдяки цьому дві спарені радіолокаційні пошукові системи, які оснащені сучасним швидко діючим обчислювальним обладнанням, а також належним програмним забезпеченням, спроможні безпомилково «відсіяти» хибні зворотні електромагнітні сигнали. Саме це надає можливість надійно виокремити розшукуваний рухомий об'єкт і у подальшому чітко відслідковувати його переміщення у просторі.

Запропоновані відповідні математичні залежності для уточнених розрахунків параметрів просторових переміщень рухомих об'єктів та їх миттєвих координат. У тому числі для розрахунків віддалі рухомого об'єкту до радіолокаційних станцій, його координат у запроваджених ортогональних системах координат, швидкості та пришвидшення руху тощо.

Усе це надає можливість підвищити ефективність виявлення ворожих диверсійно-розвідувальних та ударних безпілотних літальних апаратів, зокрема і дронів іранського виробництва моделі *Sahed-136*.

Ключові слова: пошук, координати, безпілотний літальний апарат, дрон-оператор, дрон-ліквідатор, радіолокаційна апаратура, озброєння, ліквідація.

AFTANAZIV IVAN, KORENDII VITALIY, STROHAN ORYSIA, FOSTYAK VITALIY
National University "Lviv Polytechnic"

ALGORITHM FOR INTERCEPTION AND DESTRUCTION OF ENEMY UAVS BY ARTIFICIAL INTELLIGENCE-CONTROLLED DRONES-LIQUIDATORS

To increase the defense capability of settlements and their infrastructure facilities, as well as the defense capability of military units of Ukraine due to reliable resistance to attacks by enemy sabotage, reconnaissance and strike unmanned aerial vehicles (UAVs), an improved scheme for determining the exact coordinates of objects moving in the airspace by means of kinematic design has been created. A methodology for determining the trajectories of spatial movements of moving objects, their speeds and coordinates by means of kinematic design has been created. Including, principle schemes for the optimal placement of search radar equipment for the successful detection of enemy aircraft with the aim of their subsequent destruction have been developed. According to the proposed scheme, the determined coordinates and parameters of the spatial movements of enemy UAVs are directed to the support command posts equipped with liquidator drones (kamikazes) and small arms or to the control points of anti-aircraft missile systems (AMS), which eliminate these aircraft. The use of kinematic design methods and tools involves the introduction of additional search radar equipment installed on a drone-operator raised into the airspace, as well as a mathematical apparatus for refined calculations of the coordinates and parameters of the spatial movements of moving objects. Thanks to this, two paired radar search systems, which are equipped with modern fast-acting computing equipment, as well as appropriate software, are able to unmistakably "screen out" false return electromagnetic signals. This is what makes it possible to reliably isolate the sought-after moving object and subsequently clearly track its movement in space. The corresponding mathematical dependencies are proposed for refined calculations of the parameters of spatial movements of moving objects and their instantaneous coordinates. Including for calculations of the distance of a moving object to radar stations, its coordinates in the introduced orthogonal coordinate systems, speed and acceleration of movement, etc. All this makes it possible to increase the efficiency of detecting enemy sabotage, reconnaissance and strike unmanned aerial vehicles, including Iranian-made drones of the *Sahed-136* model.

Keywords: search, coordinates, unmanned aerial vehicle, drone operator, drone liquidator, radar equipment, weapons, liquidation

Стаття надійшла до редакції / Received 03.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Вступ

Слід визнати, що як підрозділи територіальної оборони, так і Військові сили України загалом виявилися недостатньо готовими до протистояння такому різновиду ворожої зброї як ударні та розвідувальні безпілотні літальні апарати (БПЛА). Наявні радіолокаційні засоби протиповітряної оборони виявились неспроможними до ефективного і своєчасного виявлення цих ударних літальних апаратів. Їх здатність до огинання нерівностей земного рельєфу, незначні висоти лету та власні габаритні розміри ускладнюють радіолокаційним пошуковим засобам спроможність до своєчасного виявлення та визначення координат і параметрів просторових переміщень цих диверсійних ударних апаратів. Це обумовлено технічними складнощами у відокремленні радіолокаційними станціями відбитих від мало розмірних дронів електромагнітних хвиль від так званих «хибних перешкод», які нашаровуються, відбиваючись від високих будівель, дерев та пагорбів тощо. Це характерно для рухомих об'єктів, що пролітають на незначних до 150-200 м висотах. Переважно саме на таких висотах і летять ворожі безпілотні літальні апарати, наприклад, моделі Shahed-136.

І хоч вибухи ворожих дронів-камікадзе за руйнівною здатністю поступаються руйнаціям від ракетних ударів, та все ж мало захищеним від бомбових ударів об'єктам інфраструктури, наприклад, електричним підстанціям, мережам газо- та водопостачання тощо вони завдають відчутної шкоди. Враховуючи незначну вартість дронів моделі Shahed-136, що переважно не перевищує 11-15 тисяч доларів США, ворожі війська запускають їх одночасно десятками, так званими роями. Це зайвий раз ускладнює задачу їх перехоплення. Як невітінний результат - на початкових етапах їх використання відсоток знищення ворожих дронів силами нашої оборони часто не перевищував 60%.

Отже слід визнати, що існує невідкладна потреба у вдосконаленні існуючих та розробці нових засобів і методик своєчасного виявлення та ліквідації ворожих безпілотних літальних апаратів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблематиці своєчасного виявлення пролітаючих на незначних висотах БПЛА у останні роки загострення військових протистоянь приділялась підвищена увага як з боку науковців України, так і вченими багатьох зарубіжних країн. Наприклад науковцями Харківського Національного університету повітряних сил ім. І. Кожедуба було досліджено так званий метод різницево-далекомірною визначення координат БПЛА. Результати цих досліджень, проведених під керівництвом Чернишева М. І. та Куценко В. В., відображено у роботах [1,2]. Автори пропонують оцінку точності визначення координат БПЛА здійснювати так званим різницево-далекомірним методом в рухомій системі пасивної радіолокації на базі зенітних комплексів малої дальності. Даний метод дозволяє місця розташувань БПЛА визначити із точністю, співрозмірною із розмірами розшукуваних об'єктів [3,4]. Проте відчутними недоліками цього різницево-далекомірною методу є його непридатність для БПЛА, які здійснюють польоти по наперед обумовлених траєкторіях руху без супутнього радіочастотного керування їх просторовим переміщенням. Або ж керуються за допомогою оптико-волоконних засобів передачі інформації. У цій ситуації відсутність електромагнітних імпульсів керування польотами БПЛА робить їх «невидимими» для пеленгаторів, а також і унеможливує виявлення їх точних координат.

Тому слід визнати, що не втрачають своєї актуальності дослідження, які спрямовані на визначення траєкторій просторових переміщень та координат рухомих у повітряному просторі об'єктів. Вивченням цієї проблематики свого часу активно займались науковці НУ «Львівська політехніка». Тут дані дослідження здійснювалися в двох взаємопов'язаних напрямках. Зокрема фахівці аерофотогеодезії досліджували спроможність визначення координат просторового розташування безпілотних дронів, задіяних до фотографування та відеозйомки місцевості при виготовленні фізичних карт та топографічних планів та [5,6,7]. Науковці ж кафедри нарисної геометрії свої пошуки спрямували у сферу вивчення та розробки методологій практичного застосування так званого кінематичного проектування. Проектування, що спроможне пов'язати між собою координати, швидкості та траєкторії рухів окремих складових проектування [8,9].

Грунтовно застосування методик кінематичного проектування для визначення точних координат ворожих диверсійно-розвідувальних БПЛА з метою їх ураження розглянуто у роботі [9]. У відповідності даній методиці миттєві координати рухомого у повітряному просторі об'єкта, а у даному випадку ворожого БПЛА, визначають перепроєктовуючи ортогональним проектуванням точку миттєвого розташування БПЛА, що виявлений двома пошуковими радіолокаційними станціями (РЛС). Тут використовують математичні залежності, які завдяки методиці кінематичного проектування ув'язують між собою віддалі від виявленого БПЛА до кожної із пошукових РЛС та розраховують координати точки миттєвого розташування цього рухомого об'єкта. На командному пункті, оснащеному обчислювальною апаратурою із належним програмним забезпеченням, володіючи точними розрахованими координатами БПЛА, приймають остаточне рішення щодо застосування відповідних технічних засобів та озброєння для ліквідації виявлених ворожих БПЛА.

У роботі [8] проілюстровано можливість практичного застосування цієї методики для облаштування захисних опорних пунктів навколо міст та містечок від ворожих диверсійно-розвідувальних БПЛА. Для успішної роботи ці опорні пункти повинні бути оснащені пошуковою радіолокаційною апаратурою, обчислювальною апаратурою із відповідним програмним забезпеченням, а також технічними засобами ліквідації виявлених ворожих БПЛА та бути пов'язаними між собою засобами радіозв'язку та передачі цифрової інформації. Для ліквідації виявлених ворожих літальних апаратів тут пропонується застосування дронів-камікадзе. Дрони-ліквідатори спрямовуються у завчасно прораховану точку повітряного простору, яку на певний завчасно прорахований момент часу пролітатиме ворожий БПЛА.

Дані дослідження свідчать, що методики кінематичного проектування здатні вдосконалювати наявні технології визначення траєкторій просторових переміщень ворожих безпілотних літальних апаратів та їх координат для ефективного їх перехоплення та знищення. Отже можна стверджувати, що актуальними залишаються дослідження, які спрямовані на розширення можливостей застосування кінематичного проектування для захисту військових підрозділів та цивільного населення, а також інфраструктури міст і селищ від ворожих атак БПЛА. Зокрема і тих, що пролітають на незначних висотах і важко піддаються ідентифікації традиційними радіолокаційними засобами.

Мета і задачі дослідження

Метою даного дослідження є підвищення обороноздатності населених пунктів України та її військових угруповань успішним протистоянням атакам ударних та диверсійно-розвідувальних ворожих безпілотних літальних апаратів шляхом визначення точних координат їх просторового розташування та параметрів руху, спрямованими на їх знищення дронами-ліквідаторами.

Задачі дослідження:

- розробка методик визначення точних координат просторового розташування ворожих БПЛА та параметрів руху спрямованих на їх знищення дронами-ліквідаторів;
- розробка вдосконаленої схеми просторового розташування складових елементів кінематичного проектування для підвищення точності визначення координат та параметрів просторових переміщень об'єктів проектування;
- розробка принципів схем розміщення радіолокаційного пошукового устаткування для успішного виявлення ворожих БПЛА;

Основним **об'єктом дослідження** у даному дослідженні була теорія кінематичного проектування як засіб графічного відображення особливостей та закономірностей просторових переміщень об'єктів.

Предметом дослідження була специфіка пошуку та фіксації траєкторій просторових переміщень безпілотних літальних апаратів методами кінематичного проектування з метою визначення координат їх миттєвого розташування у просторі.

Методи дослідження. При проведенні теоретико-експериментальних досліджень використовувались методи та методики фізичного і математичного моделювання швидкоплинних процесів, а також математичної статистики аналізу та класифікації їх результатів. У основі експериментального дослідження було застосовано основні положення теорії відображення координат та траєкторій просторових переміщень рухомих об'єктів засобами нарисної геометрії при органічному поєднанні класичного ортогонального проектування із динамікою та особливостями кінематичного проектування.

Основні результати дослідження

Методика визначення точних координат ворожих БПЛА засобами кінематичного проектування ґрунтується на використанні двох незалежних один від іншого джерел локаційного пошуку рухомих у просторі об'єктів. Схема їх облаштування та принципи взаємодії відображені на *рис. 1*. Командний пункт, що оснащений засобами радіолокаційного пошуку рухомих у просторі об'єктів, сучасною швидкодіючою комп'ютерною обчислювальною апаратурою із відповідним програмним забезпеченням, а також стартовою площадкою запуску дронів-перехоплювачів, розташовують на земній поверхні.

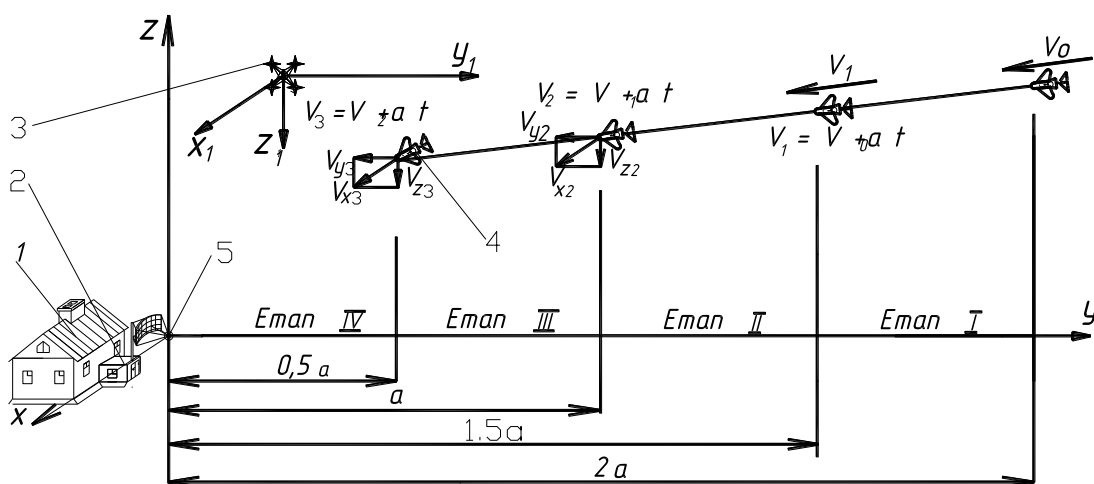
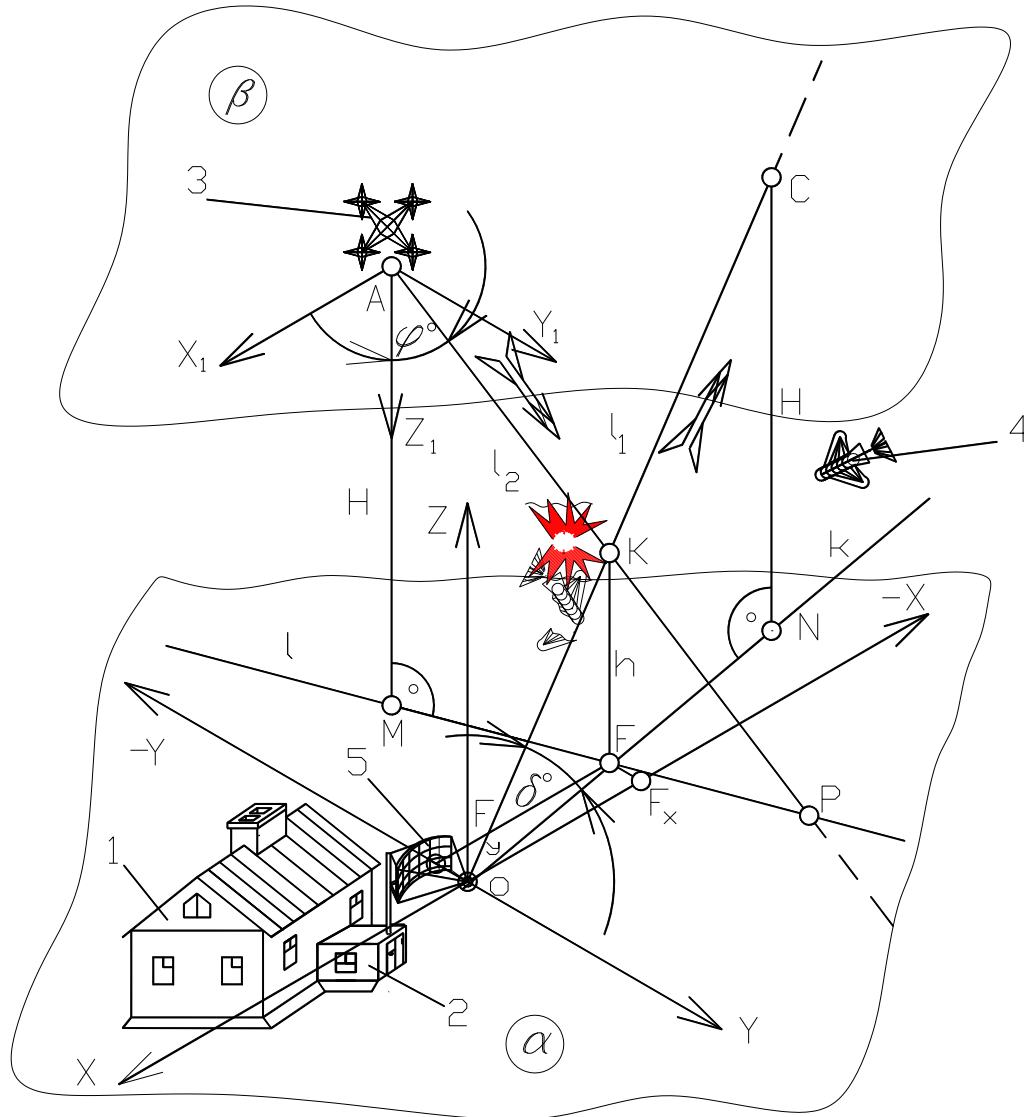


Рис.1 Схема поетапного визначення траєкторії та параметрів руху ворожого БПЛА

Джерело: розроблено авторами

Тут в точці локаційного випромінювання умовно облаштовують трьохвимірну систему декартових координат, спрямувавши взаємно перпендикулярні осі x та y в площині горизонту, а перпендикулярну їм вісь z - вертикально вгору. У цій системі координат осі x та y формують наземну горизонтальну картинну площину a . У випадку появи в районі очолюваного командним пунктом 1 регіону територіальної оборони ворожих БПЛА чи інших літальних об'єктів із стартової площадки 2 піднімають в повітряний простір оснащений засобами

Аналогічно наземній локаційній станції на доні-операторі 3 теж уявно облаштовують ще одну повітряну рухому трьохвимірну систему декартових координат із початком у точці миттєвого розташування дрона-оператора. Взаємно перпендикулярні осі x_1 та y_1 цієї рухомої системи координат паралельні осям x та y наземної системи координат і формують паралельну наземній повітряну картинну площину β , тобто x/x_1 ; y/y_1 ; z/z_1 ; α/β . Додатній напрям осі z_1 повітряної системи координат спрямовують вниз до земної поверхні.



Джерело: розроблено авторами.

Точку перетину проєктуючого променя із картинною площиною γ шукають або аналітичним, або графічним методами. При аналітичному методі пошуку точки перетину задають аналітичне рівняння проєктуючого променя l_1 або l_2 як рівняння прямої лінії, що проходить через відому точку (A або O) із заданими координатами під відомим кутом нахилу до «базових» картинних площини α або β , а також аналітичне рівняння

картинної площини γ , що проходить через будь-які її три точки із відомими координатами. Точкою перетину прямої із площиною у цьому випадку буде шукана точка, координати якої одночасно задовольняють і рівняння прямої, і рівняння площини.

Аналогічно із системи рівнянь двох проєктуючих променів l_1 та l_2 визначають координати точки $K(x_K; y_K; z_K)$ як точки їх перетину, у якій на дану мить часу розташований рухомий об'єкт [11]

Фіксують ці початкові координати розташування в повітряному просторі ворожого БПЛА і через інтервал часу Δt , рівний залежно від швидкості лету ворожого БПЛА від десятків секунд до декількох хвилин, аналогічно визначають чергові координати літаючого об'єкта на другому етапі (Рис.1). Кількість етапів, що достатні для розрахунку усіх необхідних параметрів руху ворожого літального апарату, рівна чотирьом. На першому етапі (етап I на рис. 2) виявляють літальний апарат, наприклад, ворожий БПЛА, і зводять на нього «перехрестя» проєктуючих променів для визначення його координат. На другому етапі (етап II на рис. 2) визначають його швидкість польоту.

Для цього, володіючи даними щодо координат літального апарату на початку та на завершенні цього етапу, визначають його протяжність $S(км)$ із математичної залежності

$$S_i = \sqrt{(X_{Ki} - X_{K(i-1)})^2 + (Y_{Ki} - Y_{K(i-1)})^2 + (Z_{Ki} - Z_{K(i-1)})^2}, \quad (1)$$

де $X_{Ki}; Y_{Ki}; Z_{Ki}$ – координати ворожого БПЛА на заключній частині досліджуваного етапу його польоту; $X_{K(i-1)}; Y_{K(i-1)}; Z_{K(i-1)}$ – координати БПЛА на початку даного етапу або заключній частині попереднього етапу.

Володіючи цими даними та часом просторового переміщення об'єкту, визначають швидкість його лету із математичних залежностей 2.

$$v_i = \frac{CN}{t_i} = \frac{\sqrt{(X_{Ki} - X_{K(i-1)})^2 + (Y_{Ki} - Y_{K(i-1)})^2 + (Z_{Ki} - Z_{K(i-1)})^2}}{t_i}; \quad (2)$$

Аналогічні виміри та розрахунки здійснюють повторно і через наступний проміжок часу Δt_2 . У загальному швидкісні параметри лету безпілотного літального апарату визначають із наступних міркувань. Володіючи координатами просторового розташування рухомого об'єкту на кожному із запроваджених нами етапів вимірюють час Δt , тобто тривалість його перельоту із кожного попереднього етапу на наступний.

Тоді швидкість v_i на i -томі етапі перельоту визначається залежністю

$$v_i = v_{i-1} + at, \quad (3)$$

де v_{i-1} - швидкість БПЛА на попередньому етапі перельоту;

$a_{i-1} = \frac{v_{i-1} - v_{i-2}}{\Delta t}$ - пришвидження БПЛА на попередньому етапі;

На проміжному третьому етапі уточнюють траєкторію та параметри льоту ворожого БПЛА, а на четвертому етапі (етап IV на рис. 1) планується ураження ворожого літального апарату.

Таким чином, володіючи координатами поетапного польоту літаючого об'єкта визначають не тільки усі параметри його руху, а і траєкторію лету. Володіючи даними про параметри просторового переміщення літаючого об'єкту та його траєкторію руху, можна з достатньо високою точністю та імовірністю прогнозувати майбутнє положення літаючого об'єкту за умови незмінних його параметрів руху та траєкторії. Це надає можливість, задавши необхідні і завчасно прораховані параметри руху дрона-перехоплювача (камікадзе), спрямувати його в розраховану з високою точністю точку перетину просторових траєкторій його лету та лету ворожого БПЛА, тобто у точку їх зустрічі в повітряному просторі.

Дистанційно з командного пункту 1 подається команда на вибух боєвого заряду дрона-перехоплювача, який і руйнує ворожий БПЛА.

Якщо ця спроба ліквідації ворожого БПЛА виявиться невдалою, спрямовують на перехоплення наступний дрон-перехоплювач. Тут за наявності та із метою економії часу в повітряний простір одночасно може бути піднято декілька дронів-перехоплювачів. Керування їх траєкторіями руху, параметрами лету може здійснювати як командний пункт, так і за його вказівками завчасно піднятий у повітряний простір дрон-оператор.

Якщо спроби знищення ворожого БПЛА на віддаленому від командного пункту етапі виявляться невдалими, або ворог використовує одночасно декілька дронів і будь-який з них проникає безпосередньо в зону командного пункту, окреслену половиною радіуса дії локаційного випромінювання встановленого на дроні-операторі повітряного радара, на командному пункті перелаштовуються на розрахунки координат рухомих в повітряному просторі об'єктів із використанням двох паралельних між собою картинних площин (рис.2). Як відзначалось, одна з цих площин, так звана площина горизонту, умовно утворена пересічними осями x та y наземної координатної системи, інша – осями x_1 та y_1 повітряної координатної системи із початком координат в точці миттєвого розташування в повітряному просторі дрона-оператора. Аналогічно попередньому етапу обидва радари (наземний та повітряний) визначають азимути просторового розташування ворожого БПЛА, спеціальна комп'ютерна програма трансформує їх у проєктуючі промені, розраховує точки перетину проєктуючих променів із картинними площинами та координати точки взаємного перетину між собою проєктуючих променів, у якій на даний момент і буде розташований ворожий БПЛА. Аналогічно попередньому етапу за даними розрахованих координат ворожого дрона через певні задані інтервали часу визначають усі параметри просторових переміщень цього об'єкта, тобто його швидкість руху, пришвидження та траєкторію, і

призначають координати точки ураження. В цю точку і буде спрямовано дрон-ліквідатор, самопідживання якого і повинно ушкодити ворожий БПЛА.

На відміну від відомих і описаних в роботах [9,11,12] та відображеної на рис.1 схеми розрахунку координат рухомого об'єкта засобами кінематичного проектування із застосуванням одної уявної картинної площини, у даному випадку використано дві взаємно паралельні картинні площини (рис.2). У цьому випадку проектуючий промінь №1, що імітує випромінювання наземної радіолокаційної станції командного пункту 1, проходить через точку миттєвого розташування ворожого БПЛА у повітряному просторі і перетинає повітряну картинну площину в точці C (рис.2). Координати цієї точки C на повітряній картинній площині розраховують рішенням системи двох рівнянь, перше з яких рівняння прямої лінії №1, що проходить через початок (точка O) запровадженої координатної системи під відомим кутом α° до горизонтальної наземної картинної площини α_0 . Друге рівняння – це рівняння повітряної картинної площини β .

Аналогічно визначають і координати точки P , що є точкою перетину проектуючого променя №2, який має свій початок в точці A миттєвого розташування в просторі дрона-оператора, із наземною горизонтальною картинною площиною α .

Перепроєктовують точки C (точка перетину проектуючого променя №1 із повітряною картинною площиною β) та точки A (точка миттєвого просторового розташування дрона-оператора) на горизонтальну наземну картинну площину α і розглядають два утворені проектуємими променями №1 та №2 прямокутні трикутники $\triangle AMP$ та $\triangle CON$ (рис.3).

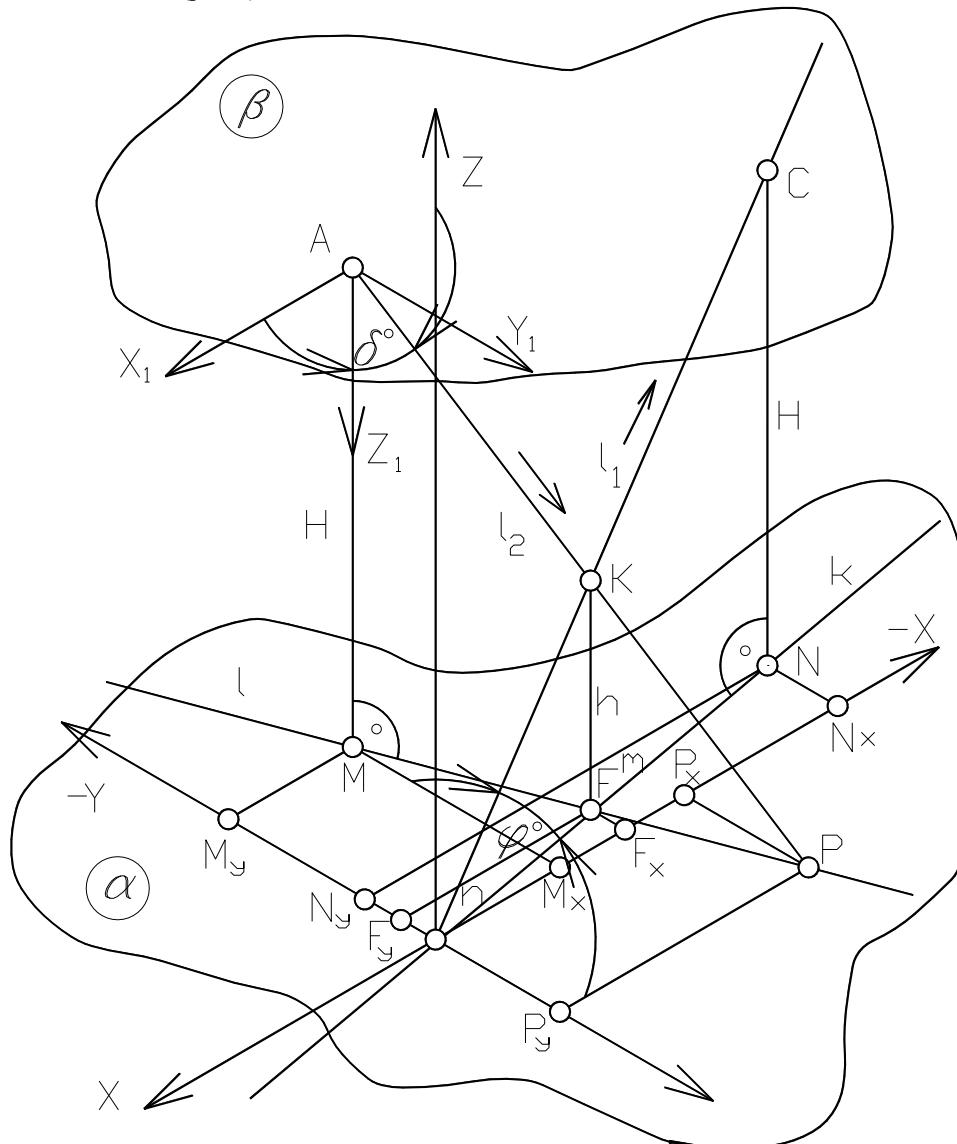


Рис.3 Принципова схема розрахунку координат рухомого у повітряному просторі об'єкта кінематичним проектуванням із використанням двох картинних площин
Джерело: розроблено авторами

Гіпотенузами цих трикутників є проектуючі промені №1 та №2, що перетинаються в точці K , координати якої і є шуканими координатами миттєвого розташування ворожого БПЛА. Вертикальні катети цих прямокутних трикутників паралельні та рівні між собою $AM=CN=H$, де H – віддаль між наземною α та повітряною β картинними площинами. Оскільки гіпотенузи цих прямокутних трикутників перетинаються між собою у точці K , то їх горизонтальні катети MP та ON теж перетинаються між собою в точці F , яка є проекцією точки K на горизонтальну

картинну площину. Записавши рівняння прямих l_1 та l_2 , що проходять через відомі координати точок, відповідно, M і P та O і N , та рішивши систему рівнянь цих двох пересічних прямих, знаходять координати точки $F(F_x; F_y)$, які і є координатами ворожого БПЛА в горизонтальній картинній площині α° .

Для пошуку ще невідомої координати h ворожого БПЛА по висоті його розташування, тобто по осі Z , для прямокутного трикутника ΔCON визначають довжину його горизонтального катета $m = ON$ та його частини $n = OF$, де точка F – проекція на наземну картинну площину α точки K , що є точкою миттєвого розташування ворожого БПЛА. Довжини цих відрізків m та n визначають як довжину відрізка між двома його крайніми точками із відомими координатами.

Із подібності прямокутних трикутників ΔCON та ΔKOF слідує, що

$$\frac{KF}{OF} = \frac{CN}{ON} \text{ або } \frac{h}{n} = \frac{H}{m}. \quad (4)$$

Отже, шукана вертикальна координата Z_K просторового розташування ворожого БПЛА визначатиметься із математичної залежності

$$Z_K = h = \frac{H \cdot n}{m}. \quad (5)$$

Таким чином, використовуючи вище наведену послідовність дій та розрахунків визначають усі параметри руху та координати миттєвого розташування ворожого БПЛА у запровадженій системі координат. Цього достатньо для спрямування дрона-ліквідатора на ураження ворожого БПЛА.

Переваги запропонованого технічного рішення

Порівняно із попередніми відомими схемами використання кінематичного проектування для визначення точних координат рухомих у повітряному просторі об'єктів [8,9,10], в яких єдина картинна площина розташовувалась перпендикулярно площині горизонту, запропонована комбінована схема просторового розташування картинних площин має свої переваги. Зокрема, тут вертикальну картинну площину переважно використовують для визначення траєкторії та швидкостей і пришвидшень рухомого об'єкту. А точні просторові координати та уточнення параметрів руху визначають використовуючи дві паралельні між собою горизонтальні площини – наземну α та повітряну β . Обумовлено це тим, що по мірі наближення рухомого об'єкту до засобів локаційного відстежування проектуючі промені, що спрямовані від радарів через рухомий в просторі розшукуваний об'єкт, на картинній площині стрімко віддаляються один від іншого. І похибка у визначенні радаром кутів нахилу проектуючих променів до горизонту навіть на декілька десятків градусів тут може трансформуватись у координатах точок перетину їх із картинною площиною, віддаленою на 750-1000 метрів, у декілька метрів. Тоді хибними будуть і перераховані координати ворожого БПЛА чи іншого літаючого об'єкту.

У вперше запропонованому нами варіанті застосування двох паралельних між собою горизонтальних картинних площин цей недолік усунуто. В зоні ураження ворожого БПЛА, де їх використовують, довжина кожного з двох проектуючих променів максимально може лише на $\sqrt{2}$ може перевищувати віддаль H між двома картинними площинами. Відповідно і похибки у визначенні координат точок перетину проектуючих променів із картинними площинами, та похідних від них координат ворожого БПЛА тут не перевищують десятка-двох сантиметрів. І це абсолютно співприйнятно для успішного ураження ворожого БПЛА будь-якими із наявних засобів ППО, у тому числі і дронами-ліквідаторами.

Ще одна із переваг запропонованої схеми використання двоплощинного кінематичного проектування полягає у спроможності використання оснащеного програмним забезпеченням штучного інтелекту дрона-оператора. За наявності відповідних засобів ППО це надає можливість успішно протистояти так званім багаточисельним «роям» ворожих БПЛА.

Висновки

1. Запропонована вдосконалена схема кінематичного проектування із використанням двох горизонтальних паралельних між собою картинних площин дозволяє підвищити точність визначення координат рухомих у повітряному просторі об'єктів, у тому числі ворожих БПЛА.

2. Неодмінною складовою застосування кінематичного проектування із наявністю двох картинних площин є розміщення в повітряному просторі та оснащення засобами локаційного пошуку і сприйняття та передачі цифрової інформації дрон-оператор.

3. Запропонована схема визначення точних координат рухомих у повітряному просторі літаючих об'єктів, а також їх траєкторій та параметрів руху може використовуватися в якості алгоритмів формування комп'ютерних програм штучного інтелекту для успішного протистояння роям ворожих літальних апаратів.

Література

1. Pozdniakov Y.K., Tkachenko V.N., Korotkov V.V. Increase of accuracy of definition of coordinates by multi-position passive complexes on a basis of difference-distance measuring method and the problem solution in redundancy conditions. *Radio electronics and Communications Systems*. 2014. Vol. 57. No. 9. P. 394.

2. Чернишов М. І., Куценко В. В. Оцінка точності визначення положення БПЛА різницево-далекомірним методом в рухомій системі пасивної радіолокації зенітних комплексів малої дальності. *Системи озброєння і військова техніка*, 2018. Вип. 2. С. 61–66.

3. Куценко В.В. Parameters numerical values of errors distribution law in coordinate measuring process at the difference-distancemeasuring passive location method / В.В. Куценко, С.П. Коваленко, Д.Д. Добровольський. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2017. Вип 1. С. 82-84. <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.17>.
4. Куценко Л. М., Запольський Л. Л., Сухарькова О. І. Геометричне моделювання мобільної гравітаційної установки для захисту безпілотників типу літака. *Прикладна геометрія та інженерна графіка: міжвидом. наук. – техн. збірник*. 2018. Вип. 94. С. 60-65.
5. Янчук Р. М., Трохимець С. М. Створення картографічної основи для розробки генеральних планів населених пунктів за матеріалами аерознімання з непрофесійних БПЛА. *Серія Технічні науки*. 2017. Вип. 1. 77. С. 32–39.
6. Шульц Р. В., Войтенко С. П., Крельштейн П. Д., Маліна І. А. До питання розрахунку точності визначення координат точок під час аерофотознімання з безпілотних літальних апаратів. *Інженерна геодезія*. 2015. Вип. 62. С. 124–136.
7. Глотов В., Фис М., Пашетник О. Розробка методики підвищення точності визначення просторових координат точок об'єктів при аерозніманні з БПЛА *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. Львів, 2020. Вип. 92. С. 45–54. doi: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2020.92.045>
8. Афтаназів І.С., Стоцько Р.З., Шевчук А.О., Струтинська Л.Р., Строган О.І., Бойко О.О. Захист населених пунктів від ударних та диверсійно-розвідувальних БПЛА. *Системи озброєння і військова техніка*. 2022. №1 (73).С.83-95, DOI:10.30748/soivt. 2023.73/10.
9. Афтаназів І.С., Стоцько Р.З., Шевчук А.О., Строган О.І., Бойко О.О. Визначення координат та параметрів руху безпілотних літальних апаратів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2022. №3 (71).С.49-59.
10. Кінематичне проєціювання як засіб управління технікою в автоматизованих землеробних комплексах / І. Г. Свідрак, Л. І. Шевчук, О. І. Строган, Л. Р. Струтинська, І. В. Строган. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2021. № 5. Т. 31. С. 102–107.
11. Svidrak I. G., Aftanaziv I. S., Shevchuk L. I., Strogan O. Determination of coordinates of unmanned aircrafts by means of kinematic projection. *Mathematical Modeling and Computing*, -2022. Vol. 9, № 2. – P. 459–469.
12. Афтаназів І. С., Шевчук Л. І., Стоцько Р. З., Свідрак І. Г., Строган О. І., Струтинська Л. Р. Пошук безпілотними літальними апаратами плаваючих мін методами кінематичного проєктування. *Розвиток транспорту*.– 2022.– Вип. 3 (14).– С.143–165.

References

1. Pozdniakov Y.K., Tkachenko V.N., Korotkov V.V. (2014). Increase of accuracy of definition of coordinates by multi-position passive complexes on a basis of dif-ference-distance measuring method and the problem solution in redundancy conditions. [Increase of accuracy of definition of coordinates by multi-position passive complexes on a basis of dif-ference-distance measuring method and the problem solution in redundancy conditions.] *Radio electronics and Communications Systems*. 57. 9. 394. [in English].
2. Chernyshev M. I., Kutsenko V. V. (2018). Otsinka tochnosti vyznachennia polozhennia BpLA riznytsevo-dalekomimym metodom v rukhomii systemi pasyvnoi radiolokatsii zenitnykh kompleksiv maloi dalnosti. [Assessment of the accuracy of determining the position of the UAV by the difference-range measuring method in the mobile passive radar system of short-range anti-aircraft complexes.] *Sistemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. 2, 1– 66. [in Ukrainian].
3. Kutsenko V.V. (2017) Parameters numerical values of errors distribution law in coordinate measuring process at the difference-distancemeasuring passive location method /V.V. Kutsenko, S.P. Kovalenko, D.D. Dobrovolskyi. [Parameters numerical values of errors distribution law in coordinate measuring process at the difference-distancemeasuring passive location method] *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy*. 1. 82-84. <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.17>. [in Ukrainian].
- 4.Kutsenko L. M., Zapolskyi L. L., Sukharkova O. I. (2018). Heometrychne modeliuvannia mobilnoi hravitatsiinoi ustanovky dlia zakhystu bezpilotnykh tipu litaka. [Geometric modeling of a mobile gravity installation for the protection of aircraft-type drones.] *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika: mizhvidom. nauk. – tekhn. zbirnyk*. 94. 60-65. [in Ukrainian].
5. Yanchuk, R.M. & Trokhymets, S.M. (2017). Creation of a cartographic basis for the development of general plans of settlements based on the materials of aerial photography from non-professional UAVs [Stvorennia kartohrafichnoi osnovy dlia rozrobky heneralnykh planiv naselennykh punktiv za materialamy aerezoznimannia z neprofesiinykh BPLA]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Tekhnichni nauky*, 1, 32–39. [in Ukrainian].
6. Shults, R.V., Voitenko, S.P., Krelshstein, P.D. & Malina, I.A. (2015). To the question of calculating the accuracy of determining the coordinates of points during aerial photography from unmanned aerial vehicles [Do pytannia rozrakhunku tochnosti vyznachennia koordynat tochk pid chas aerofotoznimannia z bezpilotnykh litalnykh apparativ]. *Inzhenerna heodeziia*, 62, 124–136. [in Ukrainian].
7. Hlotov, V., Fys, M. & Pashchetnyk, O. (2020). Development of a technique for increasing the accuracy of determining the spatial coordinates of object points during aerial photography from a UAV [Pashchetnyk Rozrobka metodyky pidvyshchennia tochnosti vyznachennia prostorovykh koordynat tochk obektiv pry aerezoznimanni z BPLA]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia*, 92, 45–54. doi:<https://doi.org/10.23939/istcgcap2020.92.045-54>. [in Ukrainian].
8. Aftanaziv I.S., Stotsko R.Z., Shevchuk A.O., Strutyńska L.R., Strohan O.I., Boiko O.O. (2022). Protection of settlements from attack and sabotage reconnaissance UAVs. [Zakhyst naselennykh punktiv vid udarnykh ta dyversiino-rozviduvalnykh BPLA] *Sistemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. №1 (73).S.83-95, DOI:10.30748/soivt. 2023.73/10. [in Ukrainian].
9. Aftanaziv I.S., Stocko R.Z., Shevchuk A.O., Strogan O.I.,Bojko O.O. (2022). Determination of coordinates and movement parameters of unmanned aerial vehicles [Vyznachennja koordynat ta parametriv ruhu bezpilotnykh litalnykh apparativ]. *Sistemy ozbrojennja i vijs'kova tekhnika*, 3 (71), 49–59. [in Ukrainian].
10. Svidrak, I.H., Aftanaziv, I.S., Strohan, O.I. & Shevchuk, A.O. (2021). Kinematic projection in modern technologies [Kinematychnie proetsiuuvannia v suchasnykh tekhnolohiiakh]. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnolohii imeni S. Z. Gzhytskoho. Seriya "Kharchovi tekhnolohii"*, 23(96), 67–75. doi: <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9612> [in Ukrainian].
11. Svidrak, I.G., Aftanaziv, I.S., Shevchuk, L.I. & Strohan, O.I. (2022). Determination of coordinates of unmanned aircrafts by means of kinematic projection. [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].