

АФТАНАЗІВ ІВАН

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-3484-7966>E-mail: nhh.dept@lpnu.ua**ШЕВЧУК ЛІЛІЯ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-3484-7966>E-mail: TOP.dept@lpnu.ua**СТРУТИНСЬКА ЛЕСЯ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-0401-5475>E-mail: mpa.dept@lpnu.ua**СТРОГАН ОРИСЯ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-1790-6736>E-mail: nhh.dept@lpnu.ua

КІНЕМАТИЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ЯК ЗАСІБ УТОЧНЕННЯ КООРДИНАТ ВОРОЖИХ БПЛА

Метою роботи є підвищення обороноздатності військових підрозділів, населених пунктів України та об'єктів їх інфраструктури шляхом протистояння атакам ударних та диверсійно-розвідувальних безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Її основним результатом є створення методики визначення координат, швидкостей та траєкторій просторових переміщень рухомих об'єктів засобами кінематичного проектування та розробка принципів схем оптимального розміщення радіолокаційного пошукового устаткування для успішного виявлення ворожих БПЛА.

Схема захисту базується на визначенні координат, швидкостей руху та траєкторій просторових переміщень ворожих літальних апаратів засобами кінематичного проектування. Встановлені координати ворожих БПЛА повідомляються на оснащенні дронами-ліквідаторами (камікадзе) та стрілецькою зброєю опорні командні пункти або на пункти управління зенітно-ракетними комплексами (ЗРК), які ліквідують ці літальні апарати.

Вдосконалення радіолокаційного пошуку рухомих об'єктів засобами кінематичного проектування ґрунтується на запровадженні додаткового пошукового радіолокаційного обладнання та математичного апарату уточнених розрахунків координат і параметрів просторових переміщень рухомих об'єктів. Дві спарені радіолокаційні пошукові системи, що оснащені сучасним швидко діючим обчислювальним обладнанням із належним програмним забезпеченням, спроможні «відсіяти» хибні зворотні електромагнітні сигнали. Це надає можливість чітко виокремити розшукуваний рухомий об'єкт і у подальшому відслідковувати його переміщення у просторі.

Для розрахунків миттєвих координат та параметрів просторових переміщень рухомих об'єктів запропоновані відповідні математичні залежності, у тому числі для розрахунків віддалі рухомого об'єкту до радіолокаційних станцій, його координат у запровадженій ортогональній системі координат, швидкості та пришивидження руху тощо.

Усе це дозволить підвищити ефективність виявлення ворожих ударних та диверсійно-розвідувальних безпілотних літальних апаратів, включно із дронами іранського виробництва моделі *Sahed-136*.

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

AFTANAZIV IVAN, SHEVCHUK LILIA, STRUTYNSKA LESYA, STROGAN ORYCA
Lviv Polytechnic National University

KINEMATIC DESIGN AS A MEANS OF SPECIFYING THE COORDINATES OF ENEMY UAVS

The purpose of the work is to increase the defense capability of military units, populated areas of Ukraine and their infrastructure by resisting attacks by attack and sabotage reconnaissance unmanned aerial vehicles (UAVs). Its main result is the creation of a methodology for determining the coordinates, velocities and trajectories of spatial movements of moving objects by means of kinematic design and the development of principle schemes for the optimal placement of radar search equipment for the successful detection of enemy UAVs.

The protection scheme is based on the determination of coordinates, movement speeds and trajectories of spatial movements of enemy aircraft by means of kinematic design. The established coordinates of enemy UAVs are reported to command posts equipped with liquidator drones (kamikaze) and small arms or to control points of anti-aircraft missile systems (SAMS), which eliminate these aircraft.

The improvement of radar search of moving objects by means of kinematic design is based on the introduction of additional search radar equipment and mathematical apparatus for precise calculations of coordinates and parameters of spatial movements of moving objects. Two paired radar search systems, equipped with modern high-speed computing equipment with appropriate software, are able to "screen out" false return electromagnetic signals. This makes it possible to clearly single out the wanted moving object and subsequently track its movement in space.

For calculations of instantaneous coordinates and parameters of spatial movements of moving objects, appropriate mathematical dependencies are proposed, including for calculations of the distance of a moving object to radar stations, its coordinates in the introduced orthogonal coordinate system, speed and acceleration of movement, etc.

All this will increase the effectiveness of detecting enemy strike and sabotage-reconnaissance unmanned aerial vehicles, including Iranian-made drones of the *Sahed-136* model.

Key words: unmanned aerial vehicle, interceptor drone, liquidator drone, radar equipment, weapons, search, coordinates, liquidation.

Вступ

Доводиться констатувати, 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). Причиною такої кризовій ситуації постало, очевидно те, що наявні радіолокаційні засоби протиповітряної оборони виявились неспроможними до ефективного і своєчасного виявлення цих ударних літальних апаратів [1]. 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. Переважно 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. Ця ситуація найбільш характерна для рухомих об'єктів, що пролітають на незначних до 150-200 м висотах. Переважно саме на таких висотах і летять ворожі безпілотні літальні апарати, включно із дронами Shahed-136 [2, 3].

Звичайно вибухи ворожих дронів-камікадзе за руйнівною здатністю суттєво поступаються руйнаціям від ракетних ударів. Та все ж мало захищеним від бомбових ударів об'єктом інфраструктури, наприклад, електричним підстанціям, мережам газо- та водопостачання тощо завдають відчутної шкоди. До того ж, очевидно, враховуючи незначну вартість дронів моделі Shahed-136, що переважно не перевищує 11-15 тисяч доларів США, ворожі війська запускають їх одночасно десятками, що зайвий раз ускладнює задачу їх перехоплення. Очевидно саме тому на початкових етапах їх використання відсоток знищення ворожих дронів силами нашої оборони часто не перевищував 60%.

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

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Доречно відзначити, що проблематиці своєчасного виявлення пролітаючих на незначних висотах БПЛА у останні роки загострення військових протистоянь приділялась доволі підвищена увага як з боку науковців України, так і вченими багатьох зарубіжних країн. Зокрема 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 Чернишова М. І. та Куценко В. В., відображено у роботі [4]. Автори пропонують оцінку точності визначення координат БПЛА здійснювати так званим різницево-далекомірним методом в рухомій системі пасивної радіолокації на базі зенітних комплексів малої дальності. Похибки визначення координат літальних апаратів цим методом є несуттєвими. Даний метод дозволяє місця розташувань БПЛА визначити із точністю, співрозмірною із розмірами розшукуваних об'єктів [5,6]. Створені авторами математичні залежності надають змогу обирати оптимальні розташування бойових машин із обладнанням пасивної пеленгації.

Однак 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. У цій ситуації відсутність електромагнітних імпульсів керування польотами БПЛА робить їх «невидимими» для пеленгаторів, а також і унеможлиблює виявлення їх точних координат. До того ж відчутним недоліком даного способу визначення координат БПЛА є потреба у значній кількості технічних засобів для його реалізації. Зокрема, чотирьох маневрених віддалених один від іншого на віддалі 500-3000 метрів радіопеленгаторів, а також командного пункту. Тому для обслуговування такої значної кількості техніки знадобиться аж 10-15 осіб [4].

Отже 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 здійснювались 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 [7-9]. Науковці ж кафедри нарисної геометрії свої пошуки спрямували у сферу вивчення та розробки методологій практичного застосування так званого кінематичного проектування. Проектування, що спроможного пов'язати між собою координати, швидкості та траєкторії рухів окремих складових проектування [10, 11].

Започатковане у середині минулого століття кінематичне проектування переважно використовувалося лише у кінематографії для забезпечення узгодженості переміщень у просторі акторів, кінознімальної техніки та освітлювальної апаратури. Саме тут зуміли себе яскраво проявити такі переваги кінематичного проектування, як спроможність органічно пов'язати між собою у просторі та часі об'єкти проектування, так звану «картинну» площину та спостерігача [12].

Сучасні активні військові події на території України, масове застосування ворогуючими сторонами безпілотних апаратів як в морських глибинах, так і у повітряному просторі сприяли інтенсифікації досліджень в галузі використання кінематичного проектування, зокрема і для визначення координат ворожих ударних та диверсійно-розвідувальних БПЛА. Так у роботі [2] розглянуто можливість перехоплювати ворожі диверсійно-розвідувальні безпілотні літальні апарати своїми дронами-перехоплювачами, застосовуючи для розрахунків їх траєкторії руху та координат методики кінематичного проектування. Тут доволі ґрунтовно розкрито

специфіку запровадження координатної системи для відліку переміщень БПЛА кінематичним проектуванням, запропоновані математичні залежності для підрахунків координат та параметрів руху літальних апаратів [3, 13].

Доволі ефективний метод визначення точних координат ворожих диверсійно-розвідувальних БПЛА для їх ураження із застосуванням методик кінематичного проектування розглянуто у роботі [3]. Згідно даної методики миттєві координати БПЛА, як координати рухомого у повітряному просторі об'єкта, визначають перепроєктовуючи ортогональним проектуванням точку миттєвого розташування БПЛА, що виявлений двома пошуковими радіолокаційними станціями (РЛС). Для визначення координат точки миттєвого розташування рухомого об'єкту тут використовують математичні залежності, які завдяки методиці кінематичного проектування ув'язують між собою віддалі від виявленого БПЛА до кожної із пошукових РЛС. Володіючи точними розрахованими координатами БПЛА на командному пункті, оснащеному обчислювальною апаратурою із належним програмним забезпеченням, приймають остаточне рішення щодо застосування відповідних технічних засобів та озброєння для ліквідації виявлених ворожих БПЛА.

Певним недоліком даного методу визначення точних координат рухомих у повітряному просторі об'єктів, в тому числі і ворожих диверсійно-розвідувальних БПЛА, є обмежені можливості його використання на пересічній місцевості із значною кількістю різновисоких пагорбів, дерев та будівель. Враховуючи, що ворожі БПЛА переважно спрямовуються на ураження конкретної цілі, пролітаючи на незначних висотах та огинаючи нерівності земної поверхні, виявити їх встановленими на землі чи дахах висотних будівель стаціонарною радіолокаційною апаратурою вкрай важко. Тому переважно і доводиться ліквідувати ворожі БПЛА практично в останній фазі їх польоту, тобто в період перебування над обраною їм ціллю. Через обмеженість часу на ліквідацію ворожих БПЛА їм у такому випадку інколи вдається досягнути поставленої цілі, завдаючи шкоди інфраструктурі та здоров'ю і життю як військовому особовому складу, так і цивільному населенню.

Запізніле через технічну неспроможність РЛС виявлення ворожих БПЛА, навіть у випадку вдалого їх ураження засобами протиповітряної оборони, несе для населених пунктів певну небезпеку через падіння уламків на будівлі. Це переважно, супроводжується пожежами.

Спробу практичного застосування цієї методики для облаштування захисних опорних пунктів навколо міст та містечок від ворожих диверсійно-розвідувальних БПЛА частково проілюстровано у роботі [2]. Тут пропонується навколо населених пунктів облаштувати опорні пункти, що призначені для виявлення та ліквідації ворожих БПЛА. Ці пов'язані між собою засобами радіозв'язку та передачі цифрової інформації опорні пункти оснащені пошуковою радіолокаційною апаратурою, обчислювальною апаратурою із відповідним програмним забезпеченням, а також технічними засобами ліквідації виявлених ворожих БПЛА. Як один із можливих варіантів ліквідації виявлених ворожих літальних апаратів тут пропонується застосування дронів-камікадзе. Ці дрони-ліквідатори спрямовуються у завчасно прораховану точку простору, яку на цей момент пролітатиме ворожий БПЛА. Вибух дрона-ліквідатора в момент найменшого його зближення із ворожим БПЛА покликаний або механічно ушкодити його, або спровокувати детонацію його бойового заряду. У кожному із цих випадків ворожий БПЛА буде ушкоджено, що завдасть йому виконати поставлене бойове завдання.

Уточнення координат та траєкторії просторових переміщень ворожого БПЛА, при цьому, здійснюють із використанням методик кінематичного проектування. Для цього віддаленість виявленого радіолокаційними станціями ворожого БПЛА поділяють на декілька етапів. На перших етапах спостереження визначають швидкість, координати та траєкторію просторових переміщень ворожого БПЛА. А на заключному етапі знищення ворожого БПЛА, використовуючи запропоновані математичні залежності уточнюють координати точки мінімального його зближення із завчасно запущеним дроном-ліквідатором. Проте, як і у попередньому випадку, певним недоліком даної методики виявлення та знищення ворожих диверсійно-розвідувальних БПЛА є обмежені можливості наземних радіолокаційних стаціонарних пошукових станцій до своєчасного виявлення на земній поверхні із перешкодами та нерівностями рельєфу ворожих БПЛА. Це суттєво скорочує протяжність та тривалість подолання ворожим БПЛА зони спостереження, що затрудняє і може вносити похибки у визначення параметрів його руху. Як наслідок надані дрону-ліквідатору координати для ураження ворожого БПЛА можуть бути недостатньо точними, а його самопідривання не ефективним.

Отже можна визнати, що методи кінематичного проектування спроможні вдосконалити наявні технології визначення координат та траєкторій просторових переміщень ворожих безпілотних літальних чи плаваючих апаратів для ефективного їх перехоплення та знищення. Однак досвіду використання кінематичного проектування для захисту військових об'єктів та населених пунктів від нападу ворожих безпілотних літальних апаратів поки що немає. Тому доцільними та актуальними залишаються дослідження, що спрямовані на розширення можливостей застосування кінематичного проектування для захисту особового складу військових підрозділів, цивільного населення та інфраструктури міст і селищ від атак ворожих БПЛА. У тому числі і тих, що пролітають на незначних висотах і важко піддаються ідентифікації радіолокаційними засобами.

Мета і задачі дослідження

Метою даного дослідження є підвищення обороноздатності військових угруповань та населених пунктів України шляхом їх протистояння атакам ударних та диверсійно-розвідувальних ворожих безпілотних літальних апаратів.

Задачі дослідження:

- створення методики визначення координат, швидкостей та траєкторій просторових переміщень рухомих об'єктів засобами кінематичного проектування;
- розробка принципових схем розміщення радіолокаційного пошукового устаткування для успішного виявлення ворожих БПЛА;

Основним *об'єктом дослідження* у даній роботі слугувала теорія кінематичного проектування як засіб графічного відображення закономірностей просторових переміщень об'єктів.

Предметом дослідження були специфічні особливості пошуку та фіксації траєкторій просторових переміщень безпілотних літальних апаратів із метою визначення координат їх миттєвого розташування у просторі.

Методи дослідження. У процесі проведення теоретико-експериментальних досліджень застосовувались методи та методики фізичного і математичного моделювання швидкоплинних процесів та математичної статистики аналізу та класифікації їх результатів. Основою експериментального дослідження були положення теорії відображення координат та траєкторій просторових переміщень рухомих об'єктів засобами нарисної геометрії при поєднанні класичного ортогонального проектування із динамічними особливостями кінематичного проектування.

Виклад основного матеріалу дослідження

Основними елементами, що спрямовані нами на вдосконалення застосування кінематичного проектування для виявлення та ураження ворожих БПЛА, є використання як мінімум двох додаткових безпілотних літальних апаратів. А саме так названого нами дрона-перехоплювача та дрона-ліквідатора (камікадзе).

На рис. 1 відображена запропонована схема просторового розташування обладнання та технічних засобів виявлення і визначення точних координат та ліквідації ворожих диверсійно-розвідувальних БПЛА. Основними її елементами та складовими є оснащений обчислювальною апаратурою із відповідним програмним забезпеченням для розрахунків командний пункт 1. Радіолокаційна станція 2 командного пункту 1 налаштована на сприйняття сигналів та інформації від завчасно розміщеного у повітряному просторі барожуючого дрона-перехоплювача 3 та фіксацію ворожого безпілотного літального апарату 4. Піднятий по оголошенню тривоги у повітряний простір дрон-перехоплювач 3 теж оснащено малогабаритним радаром 5, наприклад, вітчизняного виробництва моделі ADMU-12 або радаром моделі Thales Sauire, виготовленим у Нідерландах. Перевагою цих радарів є незначні (500x400 мм) розміри та маса (≈ 40 кг), що дозволяє облаштувати їх на легкових автомобілях та дронах середніх типорозмірів.

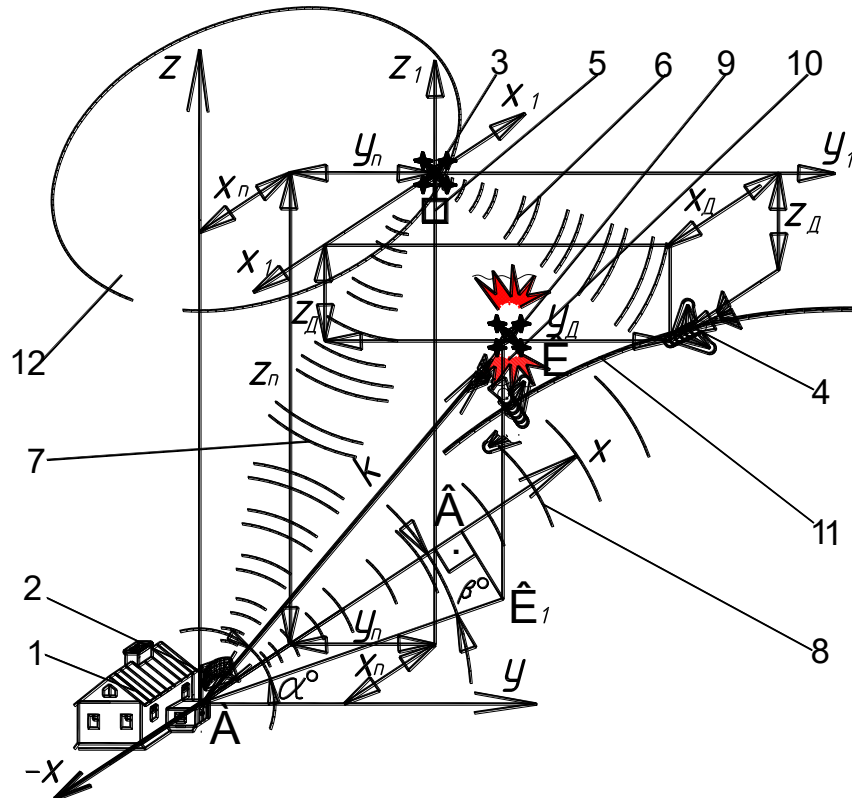


Рис. 1. Принципова схема уточнення координат ворожих БПЛА засобами кінематичного проектування
Джерело: розроблено авторами

Радар 5 дрона-перехоплювача 3 налаштовано на спрямування електромагнітних пошукових сигналів 6 на ворожий БПЛА, сприйняття відбитих від нього сигналів та передачу цієї інформації сигналами 7 електромагнітного випромінювання РЛС 2 командного пункту 1. Поряд із сприйняттям сигналів та інформації

від переносного радару 5 дрона-перехоплювача 4 радіолокаційна станція 2 командного пункту 1 налаштована і на геолокацію ворожого БПЛА сигналами 8 електромагнітного випромінювання. Тут же на фіг. 1 стрілками та розмірними лініями схематично відображено інформацію щодо визначення траєкторій 11 та 12, а також напрямів векторів швидкостей просторових переміщень дрона-перехоплювача та ворожого БПЛА і його віддаленості від командного пункту.

Для ліквідації ворожих БПЛА 4 передбачено застосування крупнокаліберної стрілецької зброї (на фіг. не відображено) або дронів-ліквідаторів (камікадзе) 9, що оснащені дистанційно керованим боєзарядом 10, та завчасно спрямовані у точку простору із розрахованими командним пунктом 1 просторовими координатами прильоту ворожого БПЛА.

На рис. 2 відображено схему поетапного визначення траєкторії та параметрів руху ворожого БПЛА. Нумерацію позицій тут та на рис.3 збережено у відповідності рис. 1. Віддаль a від командного пункту 1 до віддаленості на момент фіксації ворожого БПЛА 4 радаром 5 дрона-перехоплювача 3 тут умовно розділено на чотири однакових по довжині частини протяжністю $0,25a$ кожна, які у подальшому називатимуться етапами I – IV. Перший з цих етапів (етап I), як у часовому відліку, так і у просторовій його віддаленості, починається з моменту фіксації ворожого БПЛА радаром 5 дрона-перехоплювача 3 або радіолокаційною станцією 2 командного пункту 1. На момент фіксації ворожого БПЛА 4 обчислювальною програмою командного пункту 1 перераховують азимутні координати цього виявленого літального апарату у ортогональні $(x_0; y_0; z_0)$ в завчасно запровадженій декартовій системі координат. Швидкість V_0 цього ворожого літального апарату та його траєкторія польоту тут ще не відомі.

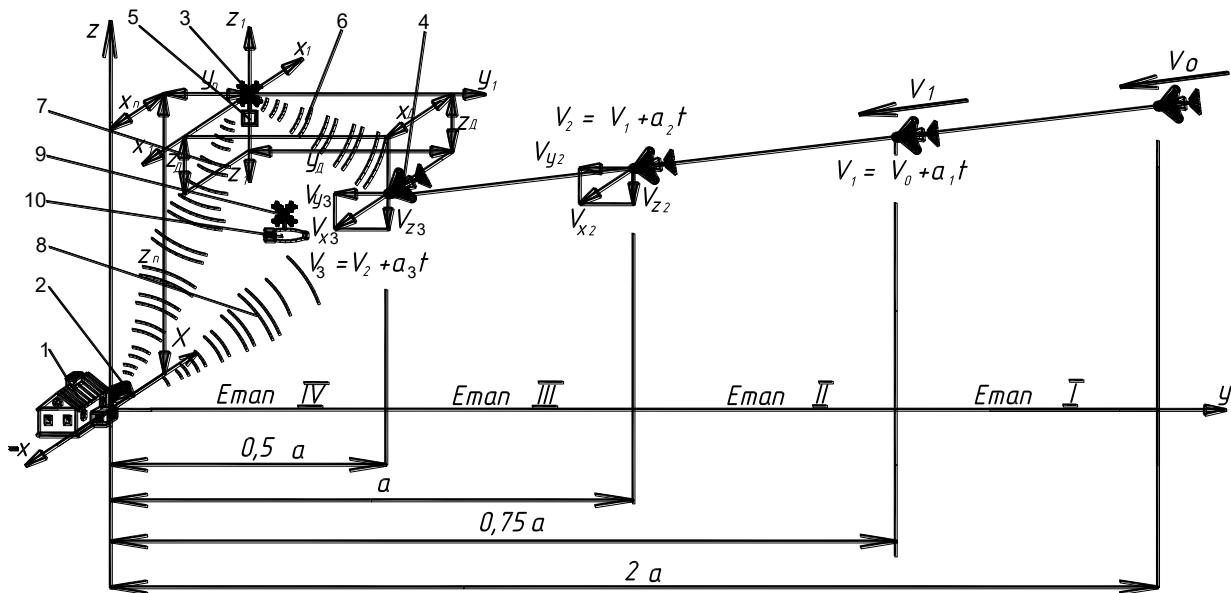


Рис. 2. Схема поетапного визначення траєкторії та параметрів руху ворожого БПЛА
Джерело: розроблено авторами

На межі закінчення першого етапу та початку другого знову фіксують ортогональні координати ворожого БПЛА 4. Тут на другому етапі (етап II на рис. 2), володіючи даними щодо координат та пройденого шляху $S(км)$ від етапу I, а також тривалістю цього польоту $t(c)$, визначають швидкість польоту літального апарату 4

$$V_{II} = \frac{S_{I-II}}{t_{I-II}} = \frac{\sqrt{(X_{K1} - X_{K2})^2 + (Y_{K1} - Y_{K2})^2 + (Z_{K1} - Z_{K2})^2}}{t_{I-II}}, \quad (1)$$

де $K_I(X_{K1}; Y_{K1}; Z_{K1})$ та $K_{II}(X_{K2}; Y_{K2}; Z_{K2})$ – координати літального апарату на позиціях I та II; t_{I-II} – тривалість польоту ворожого БПЛА на етапі I.

На проміжному третьому етапі уточнюють траєкторію та параметри польоту ворожого БПЛА.

Швидкісні параметри польоту 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 -тому етапі перельоту визначатиметься залежністю

$$V_i = V_{i-1} + a_{i-1}t,$$

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

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

t – тривалість перельоту від попереднього до розрахункового етапу.

Тут же на завершенні другого етапу і впродовж тривалості третього етапу за потреби визначають тензорні вектори швидкостей руху ворожого літального апарата за напрямками осей запроваджених систем ортогональних координат. При цьому використовують залежності

$$v_x = \frac{(x_3 - x_2)}{\Delta t}; \quad v_y = \frac{(y_3 - y_2)}{\Delta t}; \quad v_z = \frac{(z_3 - z_2)}{\Delta t};$$

де x_3 , y_3 та z_3 – координати ворожого літального апарата на межі етапу III;

x_2 , y_2 та z_2 – координати ворожого літального апарата на межі етапу II;

Δt – тривалість перельоту літального апарата над дистанцією третього етапу.

По почергових точках координат та вирахованих параметрах руху (швидкість, пришвидшення, тривалість тощо) розраховують координати зручної для ураження ворожого БПЛА 4 його просторової диспозиції на етапі IV та час прибуття туди цього рухомого ворожого літального апарату.

На четвертому етапі (етап IV на рис. 2) планується ураження ворожого літального апарату. Тут на підставі визначених координат рухомого об'єкту $K_{III}(X_{K3}; Y_{K3}; Z_{K3})$, його швидкості $v_{III} = v_{II} + a_{II-III}t$ та напрямку руху, окресленого траєкторією на етапах I, II та III, націлюють на ворожий літальний апарат 4 наявни на опорному командному пункті 1 дрона-камікадзе 9. Прорахувавши на етапах II та III параметри та траєкторію руху ворожого літального апарату 4, із опорного командного пункту 1 піднімають у повітря дрон-камікадзе 9 із боєзарядом 10, що оснащений вибухівкою із картечю або шрапнеллю. Цей дрон-камікадзе 9 спрямовують у точку повітряного простору (етап IV на рис. 2), координати якої розраховують як майбутні можливі координати ворожого БПЛА 4 по прильоті його на позицію IV, тобто у точку із координатами $(X_K; Y_K; Z_K)$. У момент прильоту ворожого БПЛА 4 на позицію IV при мінімальному наближенні до очікуючого його дрона-камікадзе 9 подається команда на вибух бойового заряду 10 дрона-камікадзе 9. Є сподівання, що вибухова хвиля, уламки дрона, шрапнель чи картеч вибухового заряду пошкодять ворожий БПЛА 4 і він буде неспроможним виконати поставлену йому бойову задачу.

Тут миттєві координати X_K , Y_K та Z_K просторового розташування ворожого БПЛА та його віддаленість k від командного пункту визначають, розраховуючи їх з математичних залежностей

$$X_K = |x_n - x_g| \pm (v_{nx} - v_{gx}) \Delta t; \quad Y_K = |y_n - y_g| \pm (v_{ny} - v_{gy}) \Delta t; \quad Z_K = |z_n - z_g| \pm (v_{nz} - v_{gz}) \Delta t;$$

$$k = \frac{x_K}{\cos \alpha \cdot \cos \beta} \pm \sqrt{(v_{nx} - v_{gx})^2 + (v_{ny} - v_{gy})^2 + (v_{nz} - v_{gz})^2} \cdot \Delta t, \quad (2)$$

де x_n , y_n та z_n – координати дрона-перехоплювача в стаціонарній ортогональній системі координат із початком відліку на антені РЛС командного пункту;

x_g , y_g та z_g – координати ворожого БПЛА в рухомій системі координат із початком відліку на радарі дрона-перехоплювача;

v_{nx} ; v_{ny} та v_{nz} – складові тензора швидкостей просторових переміщень дрона-перехоплювача за напрямками осей в рухомій системі координат;

v_{gx} ; v_{gy} та v_{gz} – складові тензора швидкостей просторових переміщень ворожого БПЛА за напрямками осей стаціонарної системи координат;

Δt – тривалість часу між сусідніми почерговими замірами параметрів руху ворожого БПЛА;

α – кут нахилу відрізка прямої, що проходить через РЛС і ворожий БПЛА, до площини горизонту xou ;

β – кут нахилу проекції цього відрізка на площину горизонту $x0u$ до осі x стаціонарної ортогональної системи координат із початком відліку на антені РЛС командного пункту.

Знак « + » використовують при співпадінні напрямів осей стаціонарної та рухомої систем координат командного пункту та дрона-перехоплювача. Відповідно « - », якщо напрями цих осей протилежні.

Результати розрахунків прикладу застосування запропонованого методу для захисту військових угруповань, населених пунктів та об'єктів їх інфраструктури від нападу ворожих ударних та диверсійно-розвідувальних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) відображено на рис.3 і у таблицях 1 та 2.

Нехай початок запровадженої стаціонарної ортогональної системи координат облаштовано у точці розміщення антени радіолокаційної станції 2 (точка А) командного пункту 1 (рис. 3), вісь x спрямована вздовж лінії горизонту, вісь z спрямована вгору, а вісь y перпендикулярна осям x та z і направлена в напрямку очікуваної появи літального апарату 4. По аналогічних напрямках спрямовано осі x_1 , y_1 та z_1 рухомої ортогональної системи декартових координат, облаштованої на спорядженому пересувним радаром 5 дрона-перехоплювачі 3, що здійснює політ на незначних швидкостях по круговій чи еліптичній траєкторії над командним пунктом 1 та над територією етапу IV, де передбачено ураження ворожого БПЛА 4.

Нехай на рівні початку першого етапу I було виявлено ворожий безпілотний літальний апарат 4, що прямує у напрямку населеного пункту, міста чи об'єкту інфраструктури, яке захищає даний опорний захисний

пункт 1. Вважатимемо, що спрямовані радаром 5 дрона-перехоплювача 3 електромагнітні випромінювання зафіксували даний літальний апарат 4, виявивши орієнтований напрям його розташування та наближені координати $K_0(x_0; y_0; z_0) = K_0(2500 \text{ м}; 10000 \text{ м}; 200 \text{ м})$.

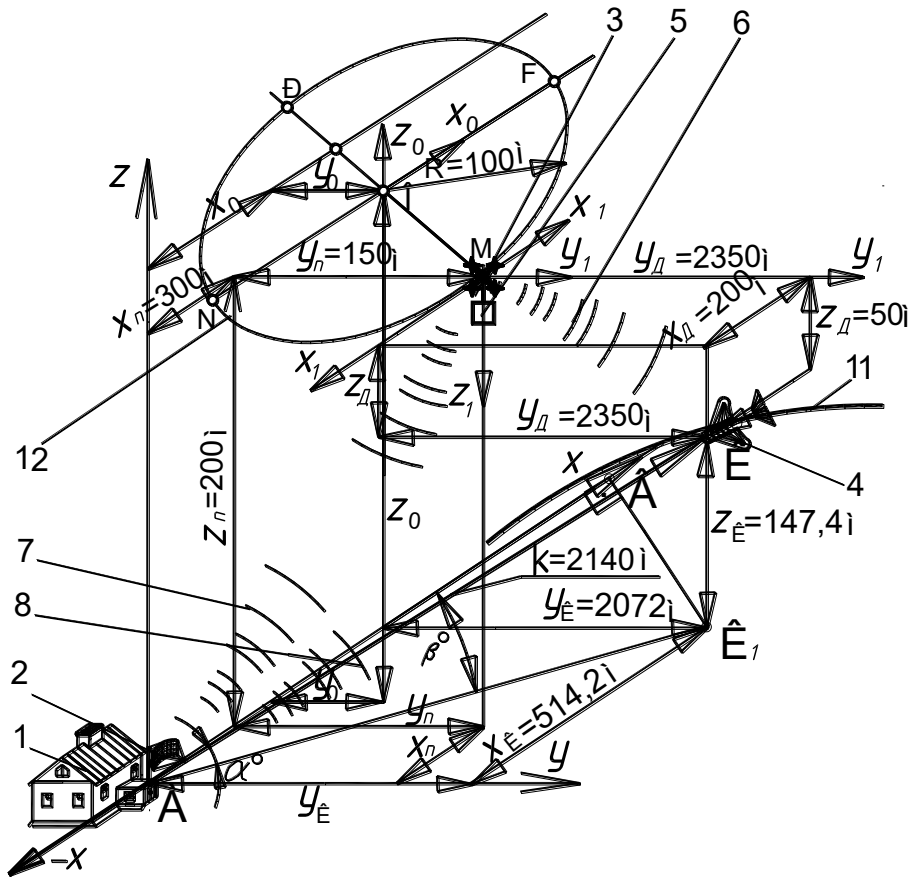


Рис. 3. Приклад застосування кінематичного проектування для визначення координат БПЛА у наблизеній до нього точці $M(x_m, y_m, z_m)$ розташування дрона-перехоплювача
Джерело: розроблено авторами

Ця інформація про виявлений дронам-перехоплювачем 3 рухомий у просторі об'єкт, а саме орієнтовний напрям його переміщення та відповідні азимуту його розташування, передаються на обчислювальну апаратуру командного пункту 1. Відповідним програмним забезпеченням ця інформація опрацьовується, перераховуючи азимут та напрямок розміщення літального апарату на його координати у стаціонарній системі ортогональних координат командного пункту 1. По мірі наближення ворожого БПЛА 4 та подолання ним усіх запроваджених етапів I, II та III на підставі даних радара 5 дрона-перехоплювача 3 на кожному з них по чергово перераховуються та уточнюються усі координати, траєкторія та параметри руху ворожого літального апарату 4.

Для спрощення та полегшення сприйняття прикладу реалізації способу вважатимемо, що ворожий БПЛА 4 рухається із незначними боковими відхиленнями в площині, що паралельна площині проєкцій ($y O z$) по наблизеній до параболітичної спадаючій траєкторії (фіг. 3 та фіг. 4) із параметрами руху та координатами, що відображені у таблиці 1. Для перехоплення цього ворожого БПЛА на ділянці ураження (етап IV) у повітряний простір піднято дрон-перехоплювач 3, оснащений переносним радаром 5 для відслідковування координат та траєкторії руху ворожого літального апарату 4. Дрону-перехоплювачу 3 задано наступні параметри польоту:

- траєкторія руху – коло радіусом $R=100 \text{ м}$;
- висота польоту $h=200 \text{ м}$, швидкість польоту $v_n=15 \text{ км/год.} = 4,2 \text{ м/с}$;
- траєкторія польоту паралельна площині горизонту $x O y$, висота польоту постійна;
- координати центра кола траєкторії польоту дрона-перехоплювача 3 в стаціонарній ортогональній системі координат командного пункту 1 $O_1(300 \text{ м}; 50 \text{ м}; 200 \text{ м})$.

Для демонстрації можливостей запропонованого способу координати ворожого БПЛА на ділянці ураження розраховано при чотирьох типових варіантах розташування дрона-перехоплювача 3 у повітряному просторі. А саме у діаметрально протилежних точках кола траєкторії руху, що розташовані на паралельних осях x та y діаметрах. Розрахунки координат ворожого БПЛА 4 здійснено по запропонованих математичних залежностях (1) та (2) при заданій швидкості польоту ворожого БПЛА $v_g=162 \text{ км/год.} \approx 45 \text{ м/с}$.

У даному випадку значення швидкостей дрона-перехоплювача v_n та ворожого БПЛА v_g за встановленими напрямками осей визначено із використанням математичної залежності (2) як співвідношення довжини здійсненого ним перельоту S до його тривалості Δt у запроваджених системах координат. А саме :

– для дрона-перехоплювача в стаціонарній системі координат

$$v_{nx} = v_{ny} = \frac{S_n}{\Delta t}; \quad v_{nz} = 0;$$

– для ворожого БПЛА

$$v_{gx} = \frac{S_{gx}}{\Delta t}; \quad v_{gy} = \frac{S_{gy}}{\Delta t}; \quad v_{gz} = \frac{S_{gz}}{\Delta t}$$

Для аналізованої в прикладі застосування даного методу точки М (рис.3) ці параметри матимуть наступні значення:

– для дрона-перехоплювача 3, що переміщається по колу радіусом $R = 100\text{ м}$ із сталою швидкістю $v_n = 15\text{ км/год.} = 14,2\text{ м/с}$

$$v_{nx} = v_{ny} = \frac{14,2}{10} = 1,42\text{ м/с}; \quad v_{nz} = 0;$$

– для ворожого БПЛА 4, що рухається із сповільненням в паралельній двом осям площині zOy

$$v_{gx} = \frac{S_{gx}}{\Delta t} = 0; \quad v_{gy} = \frac{S_{gy}}{\Delta t} = \frac{442}{10} = 44,2\text{ м/с}, \text{ де } S_{gy} = 442\text{ м/с} - \text{ пройдений БПЛА за } \Delta t = 10\text{ с шлях в}$$

напрямі осі y при його швидкості польоту $v_g = 165\text{ км/год.} \approx 45\text{ м/с}$;

$$v_{gz} = \frac{S_{gz}}{\Delta t} = 0,26\text{ м/с} - \text{ де } S_{gz} = 2,6\text{ м} - \text{ перепад висоти польоту БПЛА впродовж 10 секунд.}$$

Аналогічними вони будуть і для точки F та інших точок кола польоту дрона-перехоплювача.

Вихідні та розрахункові дані прикладу застосування даного способу для визначення координат безпілотного літального апарату приведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Координати та параметри руху ворожого БПЛА для прикладу реалізації способу

№ з/п	Розрахункові величини та їх числові значення		Етапи фіксації ворожого БПЛА			
	Назва параметра	Значення параметра	Етап № I	Етап № II	Етап № III	Етап № IV (зона ураження)
I	Загальні параметри опорного захисного пункту					
1	Віддаль від командного пункту до проміжних етапів фіксації ворожого БПЛА		10 км	7,5 км	5 км	2,5 км
II	Розраховані параметри руху					
2.1	Координати ворожого БПЛА	$K(X_K; Y_K; Z_K)$	$x_{K1} = 2500$ м	$x_{K2} = 2500$ м	$x_{K3} = 2500$ м	$x_{K4} = 2500$ м
			$y_{K1} = 10000$ м	$y_{K2} = 7500$ м	$y_{K3} = 5000$ м	$y_{K4} = 2500$ м
			$z_{K1} = 200$ м	$z_{K2} = 180$ м	$z_{K3} = 165$ м	$z_{K4} = 150$ м
2.2	Параметри польоту ворожого БПЛА:		Етап №1	Етап №2	Етап №3	Етап №4
	- швидкість	v , км/год.	175	169	162	155
	- пришвидшення	a , м/с ²	0,033	0,035	0,042	0,055
	- тривалість перельоту	t , с	52	54	56,6	36,6 (до зони ураження)

Координати точок розташування дрона-перехоплювача 3, на яких проілюстровано послідовність визначення координат БПЛА згідно запропонованому способу, приведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Координати точок розташування дрона-перехоплювача

№ з/п	Координати точок просторового розташування дрона-перехоплювача (м)	Координати ворожого БПЛА		Координати (м) ворожого БПЛА у стаціонарній системі координат РЛС командного пункту через інтервали вимірювання Δt (с)		
		в рухомій системі координат дрона-перехоплювача, (м)	в стаціонарній системі координат РЛС командного пункту, (м)	10 с	20 с	30 с
1	Точка М (рис.3)	$X_{gM} = X_g - X_M = 500 - 300 = 200$ $Y_{gM} = 2500 - 150 = 2350$ $Z_M = 50$	Дрон-перехоплювач в точці М	$X_K = 514,2$ $Y_K = 2072$ $Z_K = 147,4$	$X_K = 528,4$ $Y_K = 1644$ $Z_{KM} = 144,8$	$X_K = 542,6$ $Y_K = 1216$ $Z_K = 142,2$
	$X_M = 300$ $Y_M = 150$ $Z_M = 200$		$X_{KM} = X_M + X_{gM} = 300 + 200 = 500$ $Y_{KM} = 150 + 2350 = 2500$ $Z_{KM} = 150$			
2	Точка F	$X_{gF} = X_g - X_F = 500 - 400 = 100$ $Y_{gF} = 2500 - 50 = 2450$ $Z_{gF} = 50$	Дрон-перехоплювач в точці F	$X_K = 514,2$ $Y_K = 2072$ $Z_K = 147,4$	$X_K = 528,4$ $Y_K = 1644$ $Z_{KM} = 144,8$	$X_K = 542,6$ $Y_K = 1216$ $Z_K = 142,2$
	$X_F = 400$ $Y_F = 50$ $Z_F = 200$		$X_{KF} = X_F + X_{gF} = 400 + 100 = 500$ $Y_{KF} = 50 + 2450 = 2500$ $Z_{KF} = 150$			
3	Точка P	$X_{gP} = X_g - X_P = 500 - 300 = 200$ $Y_{gP} = 2500 - (-50) = 2550$ $Z_{gP} = 50$	Дрон-перехоплювач в точці P	$X_K = 514,2$ $Y_K = 2072$ $Z_K = 147,4$	$X_K = 528,4$ $Y_K = 1644$ $Z_{KM} = 144,8$	$X_K = 542,6$ $Y_K = 1216$ $Z_K = 142,2$
	$X_P = 300$ $Y_P = -50$ $Z_P = 200$		$X_{KP} = X_P + X_{gP} = 300 + 200 = 500$ $Y_{KP} = -50 + 2550 = 2500$ $Z_{KP} = 150$			
4	Точка N	$X_{gN} = X_g - X_N = 500 - 200 = 300$ $Y_{gN} = 2500 - 50 = 2450$ $Z_{gN} = 50$	Дрон-перехоплювач в точці N	$X_K = 514,2$ $Y_K = 2072$ $Z_K = 147,4$	$X_K = 528,4$ $Y_K = 1644$ $Z_{KM} = 144,8$	$X_K = 542,6$ $Y_K = 1216$ $Z_K = 142,2$
	$X_N = 200$ $Y_N = 50$ $Z_N = 200$		$X_{KN} = X_N + X_{gN} = 200 + 300 = 500$ $Y_{KN} = 50 + 2450 = 2500$ $Z_{KN} = 150$			

Віддаль ворожого БПЛА 4 від командного пункту 1 та координати його просторового розташування тут визначено із математичних залежностей (1) та (2) із врахуванням швидкостей просторових переміщень його та дрона-перехоплювача 3 впродовж призначених інтервалів часу тривалістю Δt (с) = 10, 20 та 30 секунд. Ця інформація необхідна щоб розрахувати та задати параметри польоту спрямованого на знищення ворожого БПЛА 4 дрона-камікадзе 9 у очікуваний квадрат повітряного простору їх зустрічі.

Визначені координати дрона-перехоплювача 3 у стаціонарній ортогональній системі координат командного пункту 1 (таблиця 2) співпадають для усіх точок можливого розташування дрона-перехоплювача 3 на довжині кола його кругової траєкторії. Це свідчить про доцільність практичного застосування запропонованих математичних залежностей, про їх придатність для уточнення координат миттєвого розташування у просторі рухомих об'єктів, а відповідно, і відображення траєкторій їх просторових переміщень.

Обговорення результатів дослідження

Порівняно із відомими методами визначення координат та параметрів руху літаючих на незначних висотах літальних апаратів перевагою вище описаного є те, що він завдяки підняттю в повітряний простір на дроні-перехоплювачі радарові, спроможний у півтора-два рази збільшити радіус ділянки виявлення невідомих літальних апаратів. Більший радіус ділянки виявлення рухомого об'єкта забезпечує більше часу на визначення точніших координат та параметрів руху цього об'єкта. Особливо це актуально у часи воєнних

протистоянь, коли подібні низькошвидкісні літальні апарати (дрони) активно застосовують для ураження як бойового особового складу та мирного населення, так і військової техніки та об'єктів інфраструктури. Важливо і те, що визначення завдяки даному методу точних координат ворожих БПЛА надає можливість застосування для їх ураження порівняно дешевших за ракети протиповітряної оборони дронів-камікадзе. До того ж і у нічний період доби, коли стрімко понижується ефективність стрілецького озброєння.

Як підсумок можна означити наступне. Запропонована схема організації опорних пунктів ліквідації ворожих низько швидкісних пілотованих чи безпілотних літальних апаратів ґрунтується на облаштуванні оснащених обчислювальною апаратурою із відповідним програмним забезпеченням командних пунктів із доступними засобами ліквідації цих ворожих літальних апаратів. Як один із найдієвіших варіантів безпосередньо ліквідації ворожих літальних апаратів пропонується застосування дронів-камікадзе. У основу розрахунків точних координат літальних об'єктів, параметрів їх руху та траєкторій покладено методологію кінематичного проектування, яка передбачає можливість оперувати усіма рухомими у просторі складовими проектування. У даному випадку таким рухомим об'єктом постають ворожий безпілотний літальний апарат, дрон-перехоплювач та дрон-ліквідатор (камікадзе).

Без сумніву, дана методика визначення точних координат літальних об'єктів може застосовуватися не лише для дронів Shahed-136, а і для інших літаючих на незначних висотах та швидкостях літальних апаратів, наприклад, гвинтокрилів, безпілотних літальних апаратів типу «Орлан» [14] тощо.

Є у даного методу визначення точних координат рухомих у повітряному просторі об'єктів і певні застереження у можливості його застосування у негоду при швидкостях вітрів понад 8–10 м/с та ще і у супроводі активних атмосферних опадів. Зрозуміло, що ні дроном-перехоплювачем, ні дроном-камікадзе тоді скористатися не вдасться [15]. Однак, можна вважати, що наявні переваги вагоміші за недоліки, обумовлені не такими вже і частими для території України штормовими негодами.

Висновки

1. Запропонована авторами ідея використання засобів кінематичного проектування для визначення координат та параметрів руху безпілотних літальних апаратів ґрунтується на органічному поєднанні спроможності радіолокаційних пошукових засобів до виявлення орієнтовних напрямів просторового розташування рухомих об'єктів із придатністю кінематичного проектування до обчислення координат та параметрів переміщення цих об'єктів у просторі.

2. У основу розрахунків координат пілотованих та безпілотних літальних апаратів кінематичним проектуванням покладено одночасне відслідковування декількома радіолокаційними станціями динаміки змін розмірів та кутів просторового переміщення у просторі цих об'єктів. Використовувані при цьому умовні проектуючі промені імітують сфокусований напрям на об'єкт електромагнітних хвиль радарів.

3. У основу визначення таких параметрів руху БПЛА, як його швидкість та пришвидшення покладено фіксацію на певних етапах лету проміжних миттєвих координат просторового розташування літального апарату в поєднанні із відслідковуванням часу його переміщення між цими етапами.

4. Надана кінематичним проектуванням можливість прогнозування траєкторій та майбутніх координат ворожих літальних апаратів надає спроможність застосування для їх ліквідації порівняно дешевших за вартісні ракетні комплекси засобів ураження, наприклад, стрілецької крупнокаліберної зброї чи оснащених дистанційно керованим вибуховим боєзарядом дронів-камікадзе. Надані кінематичним проектуванням точні миттєві координати просторового розташування ворожих літальних апаратів відкривають хорошу перспективу можливості ураження ворожих літальних апаратів і у нічні періоди доби, чи за умов їх поганої видимості.

Література

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 difference-distance measuring method and the problem solution in redundancy conditions. *Radio electronics and Communications Systems*. 57. 9. 394.
2. Aftanaziv I.S., Stotsko R.Z., Shevchuk A.O., Strutynska L.R., Strohan O.I., Boiko O.O. (2022). Protection of settlements from attack and sabotage reconnaissance UAVs. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. №1 (73).S.83-95, DOI:10.30748/soivt. 2023.73/10.
3. 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. *Systemy ozbrojennja i vijs'kova tekhnika*, 3 (71), 49–59.
4. Chernyshev M. I., Kutsenko V. V. (2018). 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. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. 2, 1– 66.
5. Kutsenko V.V., Kovalenko S.P., Dobrovolskyi D.D. (2017). 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>.
6. Kutsenko L. M., Zapolskyi L. L., Sukharkova O. I. (2018). 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.

7. 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. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Tekhnichni nauky*, 1, 32–39.
8. 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. *Inzhenerna heodeziia*, 62, 124–136.
9. 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. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia*, 92, 45–54. [oi:https://doi.org/10.23939/istcgcap2020.92.045-54](https://doi.org/10.23939/istcgcap2020.92.045-54).
10. Svidrak I.H., Shevchuk L.I., Strohan O.I., Strutynska L.R. & Strohan I.V. (2021). Kinematic projection as a means of controlling equipment in automated agricultural complexes. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, 31(5), 102–107.
11. Svidrak I.H., Aftanaziv I.S., Strohan O.I., Shevchuk A.O. (2021). Kinematic projection in modern technologies. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnologii imeni S. Z. Gzhytskoho. Seriia "Kharchovi tekhnologii"*, 23(96), 67–75. [doi: https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9612](https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9612).
12. Svidrak I.H., Baranetska O.R., Topchii V.I., Shevchuk A.O., Halkina N.S. (2014). Determination of spatial coordinates of points of panoramic shooting. *Zbirnyk naukovykh prats MDPU im. B. Khmelnytskoho*, 2, 136–140.
13. 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](https://doi.org/10.23939/mmc2022.02.459)
14. Aftanaziv I. S., Shevchuk L. I., Stotsko R. Z., Svidrak I. H., Strohan O. I., Strutynska L. R. (2022). Search by unmanned aerial vehicles for floating mines using kinematic design methods. *Rozvytok transportu*. 3 (14). 143–165.
15. Virchenko S. H. (2018). Some issues of complex dynamic shaping on the example of aircraft wing design. Geometric modeling of a mobile gravity installation for the protection of aircraft-type drones. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafiika: mizhvidom. nauk.-tekhn. zirnyk*. 94. 20-25.