

The possibility of using queuing systems techniques for modeling the combat operations of mobile combat robots is shown. The use of such techniques made it possible to obtain an analytical description of the final probabilities for an incompletely accessible queuing system and to expand the possibilities of taking into account the conditions for fulfilling the combat tasks of military units equipped with mobile combat robots. For this purpose, a model is described and considered that describes the battle when the firing is conducted on the observed targets and, in the event of a target hit, the fire is instantly transferred to the unaffected one. This model is illustrated by a functional diagram that clearly shows the work on the targets of five of the same type of mobile combat robots. In this case, the identification of targets is carried out by an exponential law with a function of distributing the service time of the target and the average intensity of their detection and destruction.

The characteristics of the efficiency of the queuing system in a stationary (steady state) mode, that is, with an unlimitedly growing time of its operation, are determined. Two coefficients have also been introduced that will characterize the relationship between the duration of the strike phase and the time of the entire process of serving the target. Based on the research, for example, the corresponding calculations were carried out and the boundaries of the possible use of a group of mobile combat robots, consisting of five units, for the military unit were outlined. The workload of each machine and, accordingly, the efficiency of the unit as a whole are determined, recommendations are given on their quantitative composition.

**Keywords:** application efficiency, mobile combat robot, combat modeling, queuing theory.

УДК 623.094

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.22.2020.43-47>

О.В. Майстренко, М.В. Бурдейний, С.І. Стегура, С.В. Стеців

*Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів*

## **ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ НАЗЕМНИХ ЦІЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ МАЛОГАБАРИТНИХ БПЛА НА ОСНОВІ ВДОСКОНАЛЕНОГО ПСЕВДОДАЛЬНОМІРНОГО МЕТОДУ**

У статті обґрунтована доцільність використання вдосконаленого псевдодальномірного методу для визначення координат наземних цілей із застосуванням малогабаритних безпілотних літальних апаратів, що використовується для визначення координат об'єкта на місцевості в режимі реального часу без залучення потужної обчислювальної техніки.

Проведено аналіз існуючих методів визначення координат наземних об'єктів за допомогою безпілотних літальних апаратів та запропоновано алгоритм їх визначення на основі вдосконаленого псевдодальномірного методу із використанням малогабаритних безпілотних літальних апаратів.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, псевдодальномірний метод, координати цілі.

### **Постановка проблеми**

Для ведення сучасних бойових дій потрібна висока інформативність розвідувальних даних, що забезпечується формуванням цифрових зображень з високою просторовою розрізненістю. Повнота, точність та оперативність надання достовірної інформації при використанні безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для виконання спеціальних задач суттєво залежить від умов, в яких здійснюється його застосування (рельєфу та забудови місцевості, впливу інших заважаючих факторів). Застосування БПЛА при виконанні спеціальних задач в інтересах охорони та оборони територіальної цілісності України, як правило, здійснюється в умовах складного рельєфу та забудови місцевості, впливу інших заважаючих факторів.

Сьогодні в умовах становлення і розвитку цифрової економіки України цифрові дані є ключовим фактором виробництва у всіх сферах соціально-економічної діяльності. Зростає попит на цифрові геопросторові дані, які виступають універсальним елементом зв'язку різних баз даних з метою побудови єдиного геоінформаційного простору в рамках стратегії розвитку Держави.

Традиційно велику частину геопросторових даних для єдиного геоінформаційного простору забезпечують засоби і методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) – космічна та аерофотозйомка (АФЗ).

В останнє десятиліття з розвитком мікроелектроніки, робототехніки, штучного інтелекту, активно розвивається виробництво малогабаритних і нескладних в управлінні БПЛА, які успішно використовуються для виконання АФЗ.

Безпілотники для підвищення рівня безпеки застосовуються у виявленні людей та різних об'єктів в будь-який час доби, за будь-якої погоди і кліматичних умовах. Виявляють несанкціоновану діяльність на території, що охороняється або заповідної території, нелегальні перетини кордону або передачу контрабанди, підготовку до вчинення терористичних актів тощо.

Можливість зависання над об'єктом безпілотних вертольотів і унікальна система автоматичного супроводу цілі дозволяють безпілотникам стежити за виявленим об'єктом, незалежно від того, пересувається він або знаходиться в статичному положенні.

Така робота безпілотників забезпечує своєчасну передачу службам безпеки інформації про знайдені об'єкти, яка дозволяє керівникам оцінити ситуацію, оперативно прийняти рішення і запобігти негативним ситуаціям і їх наслідкам.

На сьогодні розвитку технологій БПЛА приділяється велика увага і в найближчому майбутньому варто очікувати нових досягнень в частині підвищення точності визначення координат центрів проектування знімків, автоматизації фотограмметричної обробки знімків і дешифрування, використання засобів телекомунікації, що дозволяють виконувати контроль результатів АФЗ у режимі реального часу.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розв'язанню питань навігації та визначенню координат наземних об'єктів за допомогою БПЛА присвячено велику кількість публікацій, в яких у тому числі запропоновано використання оптичних полів [1–4], у разі застосування яких навігація за оптичним полем розглядається як інформаційна технологія “машинного зору”.

В деяких роботах [5–7] подано системний аналіз використання різного типу моделей БПЛА з метою аерознімання територій для картографування.

Зазначені підходи досить добре опрацьовані в теоретичному плані, але під час їх практичної реалізації потребують великих об'ємів пам'яті та потужних обчислювальних ресурсів, що є критичним для малогабаритних БПЛА.

**Метою статті** є розробка алгоритму визначення координат наземних цілей з використанням малогабаритних БПЛА на основі вдосконаленого псевдодальномірного методу, який забезпечить визначення координат об'єкта на місцевості в режимі реального часу без використання потужних обчислювальних ресурсів.

### Виклад основного матеріалу

Визначення координат наземних об'єктів за допомогою існуючих БПЛА здійснюється шляхом порівняння зображення, що отримується з відеокамери,

розташованої на БПЛА, з електронною картою місцевості, на якій відбувається спостереження. Після досягнення максимального збігу зазначених зображень визначаються координати точки на місцевості. Точність та час визначення координат точки залежить від якості знімку, їх кількості, ракурсу та інших факторів.

Таким чином, на основі аналізу роботи БПЛА щодо визначення координат точки на місцевості пропонується алгоритм визначення координат наземних цілей з використанням малогабаритних БПЛА на основі вдосконаленого псевдодальномірного методу, який полягає в наступному:

на борту БПЛА необхідно додатково встановити портативний лазерний далекомір синхронізований з камерою;

при виявленні цілі необхідно зробити від трьох знімків з одночасним виміром дальності від БПЛА до цілі, та визначення поточних координат БПЛА на момент здійснення знімку за допомогою бортової навігаційної системи (GPS);

використовуючи вдосконалий псевдодальномірний метод розрахувати координати цілі.

Псевдодальномірний метод має вигляд:

$$\begin{cases} D_1 = \sqrt{(x_1 - x_{Ц})^2 + (y_1 - y_{Ц})^2 + (h_1 - h_{Ц})^2} \\ D_2 = \sqrt{(x_2 - x_{Ц})^2 + (y_2 - y_{Ц})^2 + (h_2 - h_{Ц})^2} \\ D_3 = \sqrt{(x_3 - x_{Ц})^2 + (y_3 - y_{Ц})^2 + (h_3 - h_{Ц})^2} \end{cases}, \quad (1)$$

де  $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3, h_1, h_2, h_3$  – відомі координати трьох точок вимірювань відповідно;

$D_1, D_2, D_3$  – дальності від БПЛА до цілі відповідного знімку;

$x_{Ц}, y_{Ц}, h_{Ц}$  – невідомі координати цілі.

Псевдодальномірний метод використовується в сучасних супутникових навігаційних приймачах. Проте з виразу (1) в загальному вигляді визначити координати ( $x_{Ц}, y_{Ц}, h_{Ц}$ ) неможливо, за винятком часткових випадків, зокрема, коли координати БПЛА під час першого знімку знаходиться на початку системи координат, а інші координати знімків повинні знаходитись в одній координатній площині, при цьому одна з цих координат лежить на будь-якій координатній осі. В сучасних супутникових навігаційних приймачах псевдодальномірний метод розв'язується на основі використання методів “найменших квадратів”; “послідовних наближень”; “ітеративним” та іншими методами. Необхідно зазначити, що застосування перелічених методів дає результати, які мають наближені значення.

Розглянемо процедуру приведення довільного розташування БПЛА під час зйомок до зазначеного

вище часткового випадку шляхом введення спеціальної системи координат, яка задовольняє введени обмеження. Після чого отримуємо аналітичне рішення для спеціальної системи координат і виконаємо його перетворення до загальноприйнятої системи координат (СК-42). На рис. 1 наведена графічна ілюстрація введення додаткової спеціальної системи координат в системі координат (СК-42).

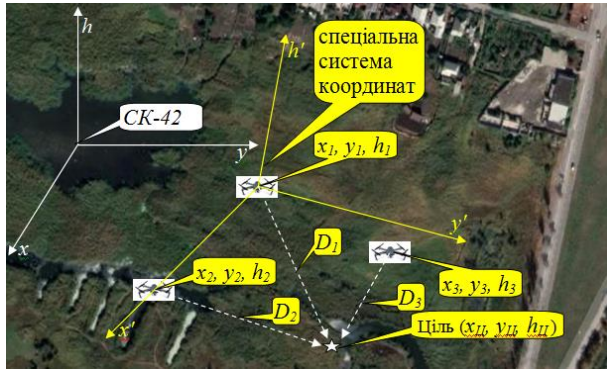


Рис. 1. Графічна ілюстрація введення спеціальної системи координат в системі координат (СК-42)

На основі аналізу рис. 1 приведемо систему рівнянь (1) для визначення значення координат цілі в спеціальній системі координат до вигляду:

$$\begin{cases} D_1 = \sqrt{(0 - x'_{Ц})^2 + (0 - y'_{Ц})^2 + (0 - h'_{Ц})^2} \\ D_2 = \sqrt{(x'_2 - x'_{Ц})^2 + (0 - y'_{Ц})^2 + (0 - h'_{Ц})^2} \\ D_3 = \sqrt{(x'_3 - x'_{Ц})^2 + (y'_3 - y'_{Ц})^2 + (0 - h'_{Ц})^2} \end{cases}, \quad (2)$$

де  $x'_{Ц}$ ,  $y'_{Ц}$ ,  $h'_{Ц}$  – невідомі координати цілі в спеціальній системі координат;

$x'_2$ ,  $x'_3$ ,  $y'_3$  – координати точок вимірювань в спеціальній системі координат, які в свою чергу розраховуються з геометричних співвідношень, що наведені на рис. 2.

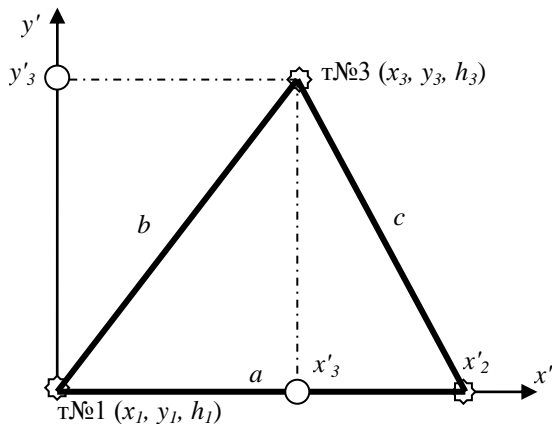


Рис. 2. Графічна ілюстрація геометричних співвідношень для розташування трьох точок вимірювань у площині

На підставі відомих геометричних співвідношень згідно з рис. 2, формули для розрахунку невідомих координат точок вимірювань в спеціальній системі координат матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} x'_2 &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (h_2 - h_1)^2}; \\ y'_3 &= \frac{2\sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}}{a}; \\ x'_3 &= \sqrt{b - y'^2_3}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $p$  – півпериметр, який розраховується за формулою:

$$\begin{aligned} p &= \frac{a + b + c}{2}; \\ a &= x'_2; \\ b &= \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (h_3 - h_1)^2}; \\ c &= \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (h_3 - h_2)^2}. \end{aligned}$$

Для отримання розрахункових формул, які дозволяють обчислювати координати цілі в спеціальній системі координат, виконаємо відповідні перетворення системи рівнянь (2), в результаті отримаємо:

$$\begin{cases} x'_{Ц} = \frac{D_1^2 - D_2^2 + x'^2_2}{2x'_2}; \\ y'_{Ц} = \frac{D_2^2 - D_3^2 - x'^2_2 + 2x'_2x'_{Ц} + x'^2_3 - 2x'_3x'_{Ц} + y'^2_3}{2y'_3}; \\ h'_{Ц} = \sqrt{D_1^2 - x'^2_{Ц} - y'^2_{Ц}}. \end{cases}, \quad (4)$$

На підставі отриманих координат цілі в спеціальній системі координат необхідно виконати їх перерахунок до системи координат СК-42. Перерахунок здійснюється в наступній послідовності.

Введемо базис ортонормованих одиничних векторів, які пов'язані з аналізованими координатними системами, як це показано на рис. 3.

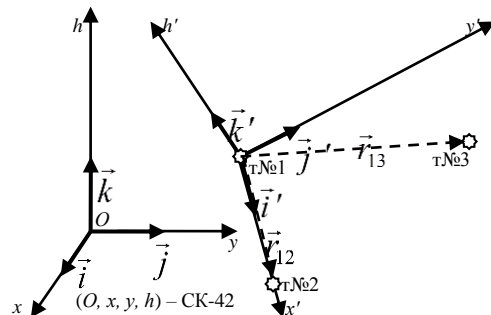


Рис. 3. Графічна ілюстрація представлення базисів одиничних векторів координатних систем

Виведемо формули для розрахунку одиночних векторів ( $\vec{i}'$ ,  $\vec{j}'$ ,  $\vec{k}'$ ) через відомі елементи.

Розрахуємо одиничний вектор  $\vec{i}'$  через відомі координати точок вимірювань в СК-42:

$$\vec{i}' = \frac{\vec{r}_{12}}{|\vec{r}_{12}|} = c_{11}\vec{i} + c_{12}\vec{j} + c_{13}\vec{k}, \quad (5)$$

де відповідні складові розраховуються за очевидними формулами:

$$\begin{aligned} \vec{r}_{12} &= (x_2 - x_1)\vec{i} + (y_2 - y_1)\vec{j} + (h_2 - h_1)\vec{k}; \\ |\vec{r}_{12}| &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (h_2 - h_1)^2}; \\ c_{11} &= \frac{x_2 - x_1}{|\vec{r}_{12}|}, c_{12} = \frac{y_2 - y_1}{|\vec{r}_{12}|}, c_{13} = \frac{h_2 - h_1}{|\vec{r}_{12}|}. \end{aligned}$$

Одиничний вектор  $\vec{k}'$  можна обчислити як результат векторного добутку векторів  $\vec{r}_{12}$  і  $\vec{r}_{13}$ , поділений на їх довжину:

$$\vec{k}' = \frac{\vec{r}_{12} \times \vec{r}_{13}}{|\vec{r}_{12} \times \vec{r}_{13}|} = c_{31}\vec{i} + c_{32}\vec{j} + c_{33}\vec{k}, \quad (6)$$

де відповідні складові розраховуються за очевидними формулами:

$$\begin{aligned} \vec{r}_{12} \times \vec{r}_{13} &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & h_2 - h_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & h_3 - h_1 \end{vmatrix} = \\ &= ((y_2 - y_1)(h_3 - h_1) - (h_2 - h_1)(y_3 - y_1))\vec{i} + \\ &+ ((h_2 - h_1)(x_3 - x_1) - (x_2 - x_1)(h_3 - h_1))\vec{j} + \\ &+ ((x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_1))\vec{k}; \\ |\vec{r}_{12} \times \vec{r}_{13}| &= \sqrt{((y_2 - y_1)(h_3 - h_1) - (h_2 - h_1)(y_3 - y_1))^2 + \\ &+ ((h_2 - h_1)(x_3 - x_1) - (x_2 - x_1)(h_3 - h_1))^2 + \\ &+ ((x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_1))^2}; \\ c_{31} &= \frac{(y_2 - y_1)(h_3 - h_1) - (h_2 - h_1)(y_3 - y_1)}{|\vec{r}_{12} \times \vec{r}_{13}|} \\ c_{32} &= \frac{(h_2 - h_1)(x_3 - x_1) - (x_2 - x_1)(h_3 - h_1)}{|\vec{r}_{12} \times \vec{r}_{13}|} \\ c_{33} &= \frac{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_1)}{|\vec{r}_{12} \times \vec{r}_{13}|} \end{aligned}$$

Одиничний вектор  $\vec{j}'$  є результатом векторного добутку одиничних векторів  $\vec{k}'$  та  $\vec{i}'$ :

$$\begin{aligned} \vec{j}' = \vec{k}' \cdot \vec{i}' &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \\ c_{11} & c_{12} & c_{13} \end{vmatrix} = (c_{13}c_{32} - c_{12}c_{33})\vec{i} + \\ &+ (c_{11}c_{33} - c_{13}c_{31})\vec{j} + (c_{12}c_{31} - c_{11}c_{32})\vec{k}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{або у вигляді } \vec{j}' = c_{21}\vec{i} + c_{22}\vec{j} + c_{23}\vec{k},$$

$$\text{де } c_{21} = c_{13}c_{32} - c_{12}c_{33},$$

$$c_{22} = c_{11}c_{33} - c_{13}c_{31},$$

$$c_{23} = c_{12}c_{31} - c_{11}c_{32}.$$

Таким чином остаточні розрахункові формули для обчислення координат цілі в системі координат СК-42 набудуть вигляду:

$$\begin{cases} x_{Ц} = x_1 + x'_{Ц}c_{11} + y'_{Ц}c_{21} + h'_{Ц}c_{31} \\ y_{Ц} = y_1 + x'_{Ц}c_{12} + y'_{Ц}c_{22} + h'_{Ц}c_{32} \\ h_{Ц} = h_1 + x'_{Ц}c_{13} + y'_{Ц}c_{23} + h'_{Ц}c_{33} \end{cases} \quad (8)$$

## Висновки

Визначення координат цілі запропонованим методом буде залежати лише від точності визначення поточних координат БПЛА в точках здійснення знімку та точності виміру відповідних значень дальності до цілі.

Для визначення координат цілі відсутня потреба великих об'ємів пам'яті та потужних обчислювальних ресурсів.

## Список літератури

1. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям. – М.: Наука, 1985. – 328 с.
2. Сырямкин В.И., Шидловский В.С. Корреляционно-экстремальные радионавигационные системы. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. – 316 с.
3. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / Под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Себрякова. – М.: Физматлит, 2003. – 280 с.
4. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / Под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Себрякова. – М.: Физматлит, 2009. – 556 с.
5. Митрахович М.М. Беспилотные авиационные комплексы. Методика сравнительной оценки боевых возможностей / М.М. Митрахович, В.И. Силков, А.В. Самков, Х.В. Бурштынская. – К.: ЦНИИВВТ ВС Украины, 2012. – 288 с.

6. Завалов О.А. *Современные винтокрылые беспилотные летательные аппараты* / О.А. Завалов, А.Д. Маслов. – М.: Московский авиационный институт (МАИ), 2008. – 196 с.

7. Мирончук Ю.А., Оверчук С.П. *Методика підготовки і планування повітряної розвідки на оперативно-тактичну глибину з використанням БПЛА*. – Л.: НАСВ, 2019. – Військово-технічний збірник №21. – С. 44–52.

#### **Определение координат наземных целей с использованием малогабаритных БПЛА на основе усовершенствованного псевдодальномерного метода**

О.В. Майстренко, Н.В. Бурдейный, С.И. Стегура, С.В. Стеців

*В статье обоснована целесообразность использования усовершенствованного псевдодальномерного метода для определения координат наземных целей с применением малогабаритных беспилотных летательных аппаратов, который используется для определения координат объекта на местности в режиме реального времени без привлечения мощной вычислительной техники.*

*Проведен анализ существующих методов определения координат наземных объектов с помощью беспилотных летательных аппаратов и предложен алгоритм их определения на основе усовершенствованного псевдодальномерного метода с использованием малогабаритных беспилотных летательных аппаратов.*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, псевдодальномерный метод, координаты цели.

#### **Determination of coordinates of terrestrial targets with the use of small UAVs on the basis of an improved pseudolongdimensional method**

O. Maistrenko, M. Burdeinyi, S. Stehura, S. Stetsiv

*In this article the feasibility of using an improved pseudolongdimensional method to determine the coordinates of terrestrial targets using small-scale unmanned aerial vehicles (UAVs), which is used to identify the coordinates of an object on the ground in real-time without involving of powerful computable technique, is justified.*

*The analysis of existing methods for determining the coordinates of terrestrial objects using unmanned aerial vehicles is carried out and an algorithm for determining them based on an improved pseudolongdimensional method using small-scale unmanned aerial vehicles is proposed.*

*The determining the coordinates of terrestrial objects using existing unmanned aerial vehicles is carried out by comparing the image, which was obtained from a located on the unmanned aerial vehicles video camera, with an electronic territory map, on which the observation takes place. The coordinates of the point on the terrain are determined after reaching of maximum coincidence of specified images. The accuracy and timing the coordinates of the point depends on the quality of the image, the number of images, the angle and other factors.*

*An algorithm for determining the coordinates of terrestrial targets using small-scale unmanned aerial vehicles based on an improved pseudolongdimensional method was proposed based on the analysis of the unmanned aerial vehicles work to identify the coordinates of the point on the terrain. The pseudolongdimensional method is used in modern satellite navigation receivers, which is solved by using methods of "least squares", "successive approximations" and etc.*

*The analysis of the accuracy estimation shows that the errors of the coordinate's determination of the target by the proposed method will depend only on the accuracy of determining the current coordinates of small-scale the unmanned aerial vehicles at the points, where the picture was taken, and the accuracy of the measuring of the corresponding values of the range to the target. To determine the coordinates of a target there is no need for large amounts of memory and powerful computing resources.*

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, pseudolongdimensional method, coordinates of targets.