

Б. М. Жураківський, Л. М. Наумчак, М. П. Романчук, М. В. Танцюра

АНАЛІЗ ПОХИБКИ УДОСКОНАЛЕНОГО АЛГОРИТМУ ОБЧИСЛЕННЯ КООРДИНАТ ОБ'ЄКТІВ НА МАТЕРІАЛАХ ПОВІТРЯНОЇ РОЗВІДКИ З БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

Обчислення географічних координат об'єктів на матеріалах повітряної розвідки з безпілотних літальних апаратів за умов протидії засобам радіоелектронної боротьби противника є актуальною проблемою, розв'язання якої дозволяє підвищити ефективність застосування цього виду озброєння для виконання військових завдань. Зокрема, якісне оброблення матеріалів повітряної розвідки, отриманих із безпілотних літальних апаратів в умовах відсутності сигналів системи глобального позиціонування GNSS, за рахунок використання вдосконалених алгоритмів і методів сприятиме підвищенню точності та оперативності визначення координат наземних об'єктів. У статті запропоновано алгоритм, що дозволяє на рівнинній місцевості отримувати з високою точністю координати об'єктів на матеріалах повітряної розвідки. Для цього оператор вибирає чотири точки, які видно і на розвідувальних матеріалах, і на еталонних зображеннях, що мають прив'язку до географічних координат, оскільки вони дозволяють обчислити географічні координати довільної точки на матеріалах повітряної розвідки. Точність координат буде вищою для об'єктів, що знаходяться всередині чотирикутника з вершинами у вибраних точках. Позначені ключові точки дозволяють здійснити проєктивне перетворення, що відображає, як піксельні координати об'єкта на фотознімку з безпілотного літального апарата трансформуються в географічні. Для високої точності обчислення координат об'єкта ключові точки необхідно вибирати навколо нього, тобто таким чином, щоб він знаходився всередині чотирикутника з вершинами в них. У результаті проведених симуляцій максимальна помилка всередині чотирикутника з ключових точок становить менше 2 м, а максимальна похибка зовні – близько 17 м. Середня похибка всередині цього чотирикутника була трохи більше 0,5 м, а зовні – близько 1 м. Після проведення симуляцій роботу вдосконаленого алгоритму було перевірено в натурних випробуваннях. Для цього було вибрано декілька ділянок місцевості, визначено координати об'єктів, що на них знаходилися. Їх обліт здійснювався декількома безпілотними літальними апаратами типу крило. Дані, отримані під час натурних випробувань, не дуже відрізняються від отриманих під час симуляцій.

Ключові слова: безпілотний авіаційний комплекс; безпілотний літальний апарат; алгоритм; комп'ютерний зір; радіоелектронна боротьба; проєктивне перетворення; аналіз похибки.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Враховуючи бойовий досвід застосування безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) в умовах збройної агресії рф, можна стверджувати, що чинна методика визначення координат наземних об'єктів в умовах

© Б. М. Жураківський, Л. М. Наумчак, М. П. Романчук, М. В. Танцюра, 2025

подавлення засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ) сигналів GNSS не є ефективною. У сучасній війні між технологічно розвиненими противниками відбувається інтенсивне застосування засобів РЕБ. В умовах радіоелектронного подавлення (РЕП) оператори корисного навантаження змушені вручну визначати координати наземних об'єктів (засічок), зіставляючи орієнтири на сторонніх програмних продуктах, що, у свою чергу, знижує оперативність та має негативний вплив на точність. За таких умов особливої актуальності набуває завдання обчислення географічних координат об'єктів, що знаходяться на матеріалах повітряної розвідки (МПР), які надходять з безпілотного літального апарата (БпЛА) без використання супутникових систем глобального позиціонування. Однією із важливих задач є аналіз похибки обчислених координат БпЛА.

Відповідно, перед закордонними та вітчизняними науковцями постає питання вдосконалення програмних алгоритмів оброблення локалізації БпЛА та визначення координат об'єктів на земній поверхні з певною точністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Обчислення координат об'єкта на МПР із БпЛА є актуальною проблемою, яку досліджують у великій кількості наукових робіт. Зокрема, в [1] автори зосередилися на обчисленні координат об'єкта в системі координат камери, що знаходиться на БпЛА. Надалі, знаючи GPS координати та орієнтацію БпЛА, а також позицію об'єкта відносно нього, можна отримати абсолютні координати об'єкта на земній поверхні, що знаходиться в полі зору камери. У роботі [2] використали фотознімки з кількох БпЛА для обчислення координат об'єкта. Для локалізації також можна брати до уваги його точні фізичні розміри, якщо вони відомі [3]. Крім того, у [4] запропоновано реалізувати бортову інтелектуальну інформаційно-розрахункову систему автономної навігації. Перевагами згаданого дослідження є можливість застосування неідентичних засобів знімання, але не передбачено можливості визначення координат та видачі їх операторові цільового навантаження в режимі реального часу. У публікації [5] для обчислення координат об'єкта здійснено його трекінг та використано фотознімки з БпЛА з трьох різних ракурсів. У [6, 7] за допомогою YOLO детектора автоматизовано пошук об'єкта на фотознімку з БпЛА, а також враховано GPS координати дрона і позицію об'єкта на фотознімку для обчислення його координат. Альтернативним способом визначення координат об'єкта є застосування БпЛА, оснащеного стереокамерою [8]. Однак для високої точності отриманих координат сам об'єкт повинен знаходитися близько до неї. Загалом у більшості досліджень для обчислення географічних координат об'єктів на фотознімку з БпЛА використовують системи глобального позиціонування (GPS та аналоги). Наприклад, за допомогою системи глобального позиціонування, компаса та інерційних вимірювальних пристроїв визначають координати та орієнтацію БпЛА. Знаючи кути повороту камери та піксельні координати цілі на фотознімку, можна обчислити рівняння прямої, на якій знаходиться БпЛА та об'єкт, а також перетин цієї прямої з поверхнею землі. Недоліком описаного методу є необхідність використання системи глобального позиціонування, що ненадійно в умовах сучасних бойових дій, зокрема через РЕП противника. Спугінг сигналів GNSS може непомітно вносити похибку в отримані GPS координати БпЛА навіть у разі спроби його детекції за допомогою аналізу даних інерційних вимірювальних пристроїв та даних системи глобального позиціонування

на БпЛА [9]. Ще одним недоліком цього методу є нестійкість похибки обчислених координат об'єктів відносно похибки визначення орієнтації БпЛА в просторі за умови зростання відстані від БпЛА до об'єкта.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є перевірка похибки вдосконаленого алгоритму визначення координат наземних об'єктів в умовах впливу засобів РЕБ противника на БпЛА для підвищення точності та оперативності в разі відсутності сигналів GNSS, але за можливості використання каналу передавання відеоданих.

Виклад основного матеріалу. Оцінимо похибку обчислення координат наземного об'єкта, якщо позицію та орієнтацію БпЛА визначено за допомогою GNSS, компаса та інерційних вимірювальних пристроїв, а координати об'єкта обраховано як перетин із земною поверхнею прямої, що проходить через отримані координати БпЛА в обчисленому напрямку.

Надалі будемо припускати, що за необхідності визначення координат об'єкта на МПР приймаються такі умови:

поверхня землі, що потрапляє на МПР, абсолютно рівна;

об'єкт знаходиться на земній поверхні;

позиція БпЛА була обрахована з нульовою похибкою.

За цих припущень похибку обчислення координат об'єкта визначаємо в такий спосіб:

$$\Delta O = \sqrt{h^2 + d^2} \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha - \beta)}, \quad (1)$$

де h – висота, на якій знаходиться БпЛА;

d – відстань по горизонталі від БпЛА до об'єкта;

α – кут між поверхнею землі та прямою, що проходить через БпЛА й наземний об'єкт;

β – похибка в обчисленні орієнтації до БпЛА, яка призвела до того, що визначена пряма до об'єкта проходить у тій же вертикальній площині, що і пряма до об'єкта й над нею під кутом β градусів.

Тобто похибка буде понад 110 м, якщо $h = d = 1000$ м, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 3^\circ$. Вона лінійно зростатиме в разі збільшення h та/або d .

Приклад визначення похибки обчислення координат об'єкта наведено на рис. 1.

Припустимо, що до поверхні землі в рівнинній області, над якою знаходиться БпЛА, застосовано прямокутну систему координат у метрах (наприклад, УСК 2000 або WGS-84), а для точок у просторі над земною поверхнею як третю координату використано їх висоту. Для підвищення точності отриманих координат необхідно застосувати калібрування камери, щоб прямі у ході проєкції на матрицю переходили у прямі. Надалі припускаємо, що камера вже відкалібрована. Наявність еталонного зображення з прив'язкою до географічних координат означає, що ми маємо функцію P_s , яка кожній піксельній координаті $s = (s_1, s_2)$ на еталонних зображеннях ставить у відповідність географічні координати конкретної точки на земній поверхні $c = (c_1, c_2)$.

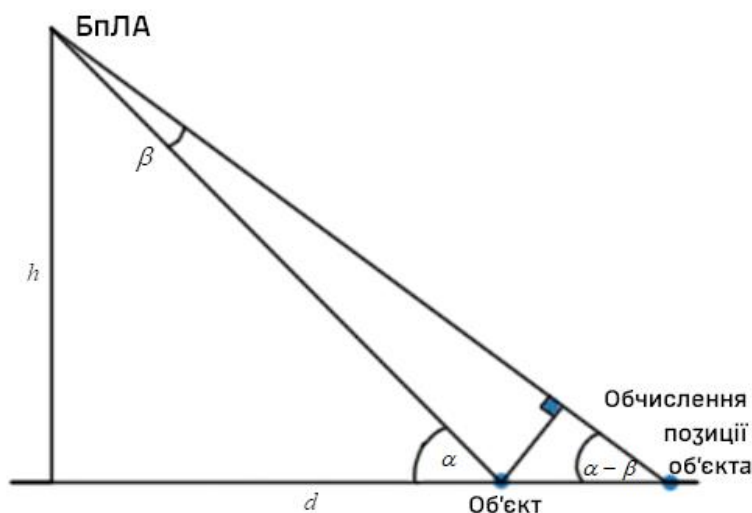


Рис. 1. Приклад визначення похибки обчислення координат об'єкта

Надалі будемо позначати образ проєктивного перетворення точки x (відповідного матриці A) як лінійне перетворення двовимірної проєктивної площини:

$$Ax = \left(\frac{a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}}{a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}}, \frac{a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}}{a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}} \right), \quad (2)$$

де $A = (a_{ij})_{i=1,\dots,3, j=1,\dots,3}$ – матриця 3×3 ;

$x = (x_1, x_2)$ – двовимірні координати.

Проекція точок із поверхні землі на МПР із БПЛА є проєктивним перетворенням з площини на земній поверхні в площину піксельних координат на МПР із БПЛА, тобто є 3×3 матриця $Q = (q_{ij})_{i=1,\dots,3, j=1,\dots,3}$ така, що

$$p = Qc, \quad (3)$$

де $c = (c_1, c_2)$ – географічні координати точки на земній поверхні;

$p = (p_1, p_2)$ – піксельні координати відповідної точки на МПР із БПЛА [2].

Обернена функція до двовимірного проєктивного перетворення також є двовимірним проєктивним перетворенням [2]. Для визначення двовимірного проєктивного перетворення достатньо задати його значення в чотирьох ключових точках загального положення [2]. Для цього оператор може позначити їх відповідність, це видно і на МПР з БПЛА, і на еталонних зображеннях (наприклад, перетини доріг, стовпи, кути будинків, дерева чи кущі, що чимось виділяються), як показано на рис. 2, на якому зверху зображено фотознімок із БПЛА, а знизу – частину супутникового знімка, що має прив'язку до конкретних географічних координат. Використовуючи прив'язку еталонних зображень до географічних координат, можна отримати географічні координати позначених чотирьох точок.



Рис. 2. Знімок із БпЛА

Нехай $p^{(i)} = (p_1^{(i)}, p_2^{(i)})_{i=1,\dots,4}$ – піксельні координати чотирьох позначених на МПР точок;
 $s^{(i)} = (s_1^{(i)}, s_2^{(i)})_{i=1,\dots,4}$ – піксельні координати відповідних позначених точок на еталонному зображенні; $Q = (q_{ij})_{i=1,\dots,3, j=1,\dots,3}$ – матриця проєктивного перетворення з площини піксельних координат на еталонному зображенні в площину їх географічних координат. Визначимо $c^{(i)} = (c_1^{(i)}, c_2^{(i)})_{i=1,\dots,4}$: $c^{(i)} = Qs^{(i)}_{i=1,\dots,4}$. Тоді за допомогою прямого лінійного перетворення (direct linear transform) можна знайти проєктивне перетворення [2], що переводить точки $p^{(i)}_{i=1,\dots,4}$ у точки $c^{(i)}_{i=1,\dots,4}$, тобто отримаємо таку матрицю $R = (r_{ij})_{i=1,\dots,3, j=1,\dots,3}$, що $Rp^{(i)} = c^{(i)}_{i=1,\dots,4}$.

Для аналізу похибок запропонованого методу обчислення координат об'єкта були проведені симуляції помилок обчислення географічних координат за допомогою проєктивної функції відповідної матриці R . Земна поверхня в області видимості БпЛА була змодельована як площина $z=0$ у тривимірному просторі, а сам апарат знаходився в точці з випадковими координатами в площині $z=1000$, тобто на висоті 1000 м. Нехай маємо такі координати камери:

$$C = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ 1000 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де c_1, c_2 – випадкові величини. Припускаємо, що камера спрямована на початок координат, тобто в центрі її поля зору є точка

$$V = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

а вектор “вгору” має такий вигляд:

$$w = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

тоді вектор спрямованості камери –

$$F = \frac{v - c}{\|v - c\|} = -\frac{c}{\|c\|}, \quad (7)$$

вектор “праворуч” для камери можна обчислити як векторний добуток

$$r = \frac{F \times w}{\|F \times w\|}, \quad (8)$$

вектор “вгору” – також як векторний добуток

$$u = \frac{r \times F}{\|r \times F\|}. \quad (9)$$

Тепер матриця повороту камери становить

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ -u_1 & -u_2 & -u_3 \\ f_1 & f_2 & f_3 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

а вектор трансляції камери

$$t = -RC. \quad (11)$$

Припустимо, що оптичний центр камери знаходиться в центрі зображення. Тоді внутрішню матрицю камери можемо отримати наступним чином:

$$K = \begin{pmatrix} f & 0 & w/2 \\ 0 & f & h/2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

де w – ширина зображення з камери в пікселях;

h – висота зображення в пікселях;

f – фокусна відстань камери.

Для тривимірних координат точки $P = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$ у світових координатах спочатку

переходимо до координат камери:

$$P_c = RP + t. \quad (13)$$

Далі проєкція на зображення виконується за допомогою проєктивного перетворення, що відповідає матриці K , тобто

$$p = KP_c, \quad (14)$$

де p – піксельні координати на зображенні.

Отже, ми отримуємо проєктивне перетворення H як обернене до проєкції між площиною $z = 0$ та піксельними координатами зображення, де кожна точка $w = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ переходить у відповідну їй проєкцію $p = \begin{pmatrix} p^{(1)} \\ p^{(2)} \end{pmatrix}$ в піксельних координатах на зображенні таким чином:

$$p = K \left(R \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix} + t \right), \quad (15)$$

де K – внутрішня матриця камери;

t – вектор трансляції камери.

$$\text{Тобто } \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = Hp.$$

Визначимо випадкові чотири точки $(p_i)_{i=1,\dots,4}$ у піксельних координатах зображення та відповідні їм проєкції в площину географічних координат $w_i = Hp_i, i = 1, \dots, 4$. Піксельні координати $(p_i)_{i=1,\dots,4}$ будемо інтерпретувати як моделювання піксельних координат об'єктів на зображенні, які видно і на фотознімку з БпЛА, і на супутниковому знімку (еталонному зображенні), $w_i = (Hp_i)_{i=1,\dots,4}$ – їх точні географічні координати. Оскільки на практиці позначення відповідних точок на зображенні та їх проєкція в площину географічних координат здійснюється з похибкою, змоделюємо похибку за допомогою випадкового вектора:

$$w_i = w_i + \begin{pmatrix} \delta_{i,x} \\ \delta_{i,y} \end{pmatrix}, \quad (16)$$

де $\delta_{i,x}$ та $\delta_{i,y}$ – незалежні, однаково розподілені, випадкові величини з рівномірним розподілом у відрізку $[-1,1]$.

Тоді з урахуванням похибки на практиці ми отримаємо проєктивне перетворення, що відповідає матриці H , а саме $Hp_i = \left(w_i\right)_{i=1,\dots,4}$. Для кожного пікселя p на зображенні знайдемо похибку $e(p) = \|Hp - Hp\|$.

Нехай S_{in} – множина пікселів усередині чотирикутника з вершинами в точках $(p_i)_{i=1,\dots,4}$, а S_{out} – множина точок, розташованих зовні того самого чотирикутника.

Позначимо середню похибку всередині та зовні чотирикутника E_{in} та E_{out} , тоді маємо

$$E_{in} = \frac{1}{|S_{in}|} \sum_{p \in S_{in}} e(p), \quad E_{out} = \frac{1}{|S_{out}|} \sum_{p \in S_{out}} e(p). \quad (17)$$

Аналогічно визначимо максимальні похибки:

$$E_{in}^{\max} = \max_{p \in S_{in}} e(p), \quad E_{out}^{\max} = \max_{p \in S_{out}} e(p), \quad (18)$$

де $E_{in}^{\max}$ – максимальна похибка всередині чотирикутника з вершинами в точках $(p_i)_{i=1,\dots,4}$;

$E_{out}^{\max}$ – максимальна похибка зовні цього ж чотирикутника;

$e(\cdot)$ – функція похибки.

Отже, для кожної з 10 випадково згенерованих $(p_i)_{i=1,\dots,4}$ було проведено по 1000 симуляцій випадкових похибок $\delta_{i,x}$ та $\delta_{i,y}$. Для цього була використана мова програмування Python. Результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати симуляцій

Координати БПЛА (camera_position)	Максимальна похибка всередині чотирикутника з ключових точок	Максимальна похибка зовні чотирикутника з ключових точок	Середня похибка всередині чотирикутника з ключових точок	Середня похибка зовні чотирикутника з ключових точок
(25, -101, 1000)	1,61	3,71	0,55	0,77
(103, 6, 1000)	1,63	3,79	0,55	0,77
(-235, -441, 1000)	1,68	13,40	0,56	0,96
(-101, 486, 1000)	1,74	11,73	0,57	0,94
(-133, -387, 1000)	1,58	8,58	0,56	0,88
(213, -16, 1000)	1,71	4,96	0,57	0,82
(310, 93, 1000)	1,51	6,77	0,56	0,86
(31, -148, 1000)	1,62	4,19	0,56	0,77
(-272, 51, 1000)	1,63	6,09	0,56	0,84
(-454, 229, 1000)	1,60	17,02	0,56	1,01

У результаті симуляцій нормалізовані помилки проєкції пікселів у географічні координати були візуалізовані на рис. 3. Зокрема, сторони чотирикутника з вершинами в точках $(p_i)_{i=1,\dots,4}$ зображено білим. Розмір похибки позначено градацією сірого: від найсвітлішого (найменша похибка), далі за її зростанням – до чорного.

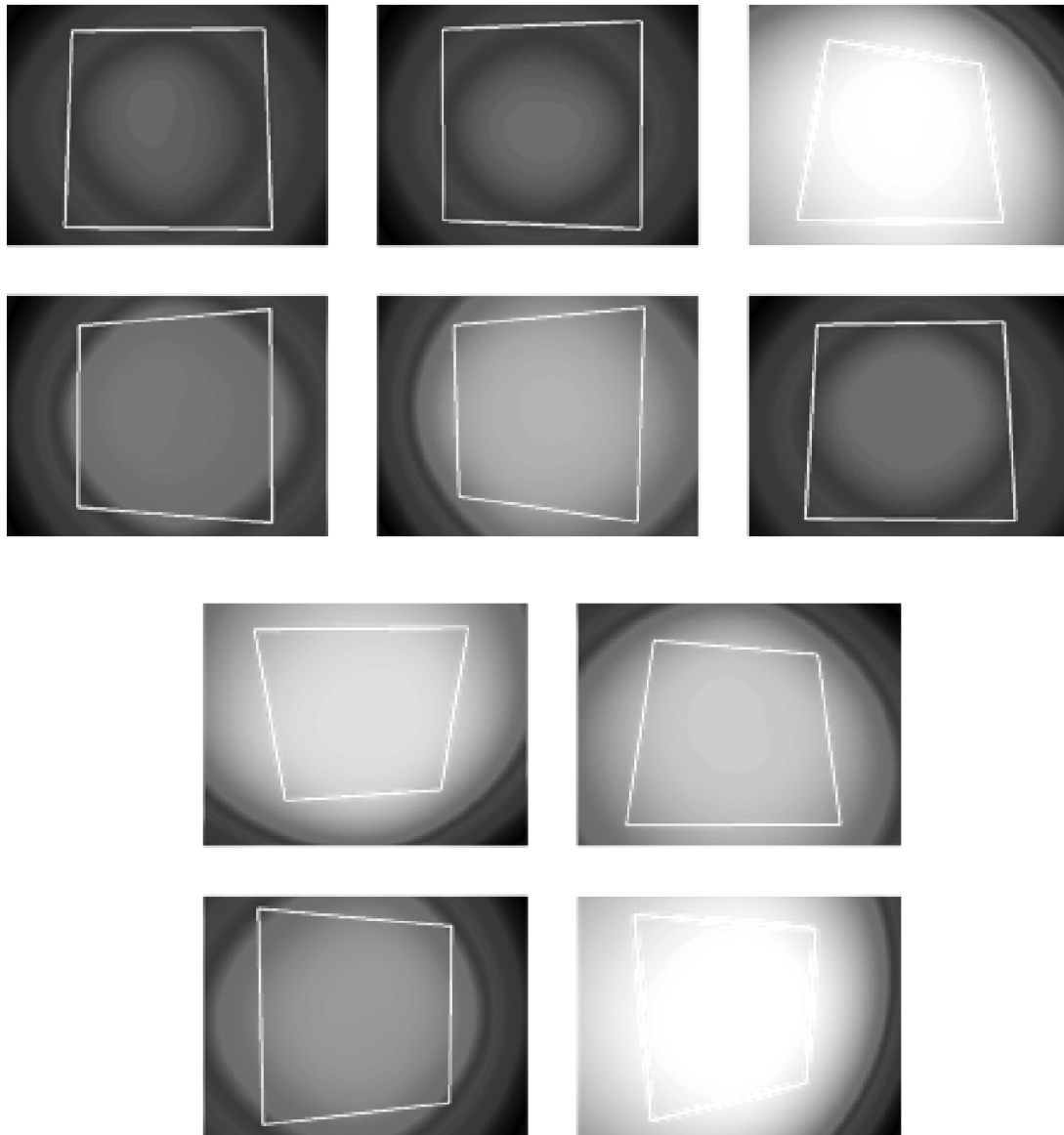


Рис. 3. Розподіл нормалізованих похибок проєкції пікселів

У результаті проведених 10 серій по 1000 симуляцій максимальна помилка всередині чотирикутника з ключових точок становила менше 2 м, а максимальна похибка зовні – близько 17 м. Середня похибка всередині чотирикутника з ключових точок була трохи більше 0,5 м, а зовні – близько 1 м. Найменші середні похибки розташовані всередині опуклої оболонки ключових точок. Зовні опуклої оболонки ключових точок похибка зростає в разі збільшення відстані до опуклої оболонки.

Після проведення симуляцій роботу вдосконаленого алгоритму було перевірено в натурних випробуваннях. Для цього було вибрано декілька ділянок місцевості

й визначено координати об'єктів, розташованих на них. Обліт цих ділянок здійснювався декількома БпЛА типу крило. Із наземної станції в режимі, наближеному до реального часу, отримувався відеопотік та оброблявся на тестовому комп'ютері, де було встановлено програмне забезпечення, що працювало на основі вдосконаленого алгоритму. Так, під час обльотів було здійснено близько 800 контрольних замірів. Максимальна похибка всередині чотирикутника становила близько 4 м, великий вплив на неї мали такі чинники: хмарність, конвекційні потоки повітря, – що спотворювали зображення на відеопотоці. За межами чотирикутника в ближній зоні похибка становила близько 8 м. Також на значній відстані за межами чотирикутника, коли вдосконалений алгоритм ще обробляв зображення, максимальна похибка була близько 28 м. Результати натурних випробувань не дуже відрізняються (корелюються) від даних, отриманих під час симуляцій.

Висновки. Перевірено похибку вдосконаленого алгоритму обчислення координат точок на матеріалах повітряної розвідки з БпЛА, що перебуває над рівнинною місцевістю. Для обчислення координат оператор позначає чотири точки на МПР із БпЛА та відповідні точки на еталонному зображенні, що має прив'язку до географічних координат. Позначені ключові точки дозволяють обчислити проєктивне перетворення, що відображає піксельні координати точки на МПР із БпЛА в географічні координати цієї точки. Для високої точності обчислення координат об'єкта ключові точки необхідно вибирати навколо нього, тобто таким чином, щоб він знаходився всередині чотирикутника з вершинами в ключових точках.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Michael G. Ground Object Geo-Location Using UAV Video Camera // IEEE/AIAA 25th Digital Avionics Systems Conference. IEEE. 2006. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/DASC.2006.313770>
2. Autonomous Target Detection and Localization Using Cooperative Unmanned Aerial Vehicles / Yoon Y. et al. // Optimization and Cooperative Control Strategies: Proceedings of the 8th International Conference on Cooperative Control and Optimization. Springer Berlin Heidelberg, 2009. P. 195–205. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88063-9_12
3. Rick Zh., Liu H. Vision-Based Relative Altitude Estimation of Small Unmanned Aerial Vehicles in Target Localization // Proceedings of the 2011 American Control Conference. IEEE. 2011. P. 4622–4627. <http://dx.doi.org/10.1109/ACC.2011.5991109>
4. Метод виділення точок прив'язки на аерофотознімках, отриманих безпілотними літальними апаратами, для їх використання під час автономної навігації / Л. Б. Каневський, В. А. Пашинський, О. С. Колісник, Н. А. Бедрій // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2021. Вип. 20. С. 4–17. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2021.20.01>
5. Kim I., Kin Choong Y. Object Location Estimation from a Single Flying Camera // Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM). 9th International Conference. IARIA. 2015. P. 82–88.
6. Snehil S., Bhushan S., Sivayazi K. Detection and Location Estimation of Object in Unmanned Aerial Vehicle Using Single Camera and GPS // 2020 First International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T). IEEE. 2020. P. 73–78. <http://dx.doi.org/10.1109/ICPC2T48082.2020.9071439>

7. Camera-Based Local and Global Target Detection, Tracking, and Localization Techniques for UAVs / Daramouskas I. & et al. // *Machines*. Vol. 11, № 2. 2023. <https://doi.org/10.3390/machines11020315>
8. Young-Hoon J., Ko K., Lee W. An Indoor Location-Based Positioning System Using Stereo Vision with the Drone Camera // *Mobile Information Systems*. 2018. P. 5160543. <http://dx.doi.org/10.1155/2018/5160543>
9. Yangjun G., Li G. A GNSS Instrumentation Covert Directional Spoofing Algorithm for UAV Equipped with Tightly-Coupled GNSS/IM // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023. P. 1–13. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2023.3240197>
10. Zhengyou Zh. Camera Calibration. *Computer Vision: a Reference Guide* // Springer International Publishing. 2021. P. 130–131. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63416-2_164

Стаття надійшла до редакції 01.05.2025.

REFERENCES

1. Michael, G. (2006). Ground Object Geo-Location Using UAV Video Camera. In *IEEE/AIAA 25th Digital Avionics Systems Conference. IEEE*. (pp. 1–7). <https://doi.org/10.1109/DASC.2006.313770>
2. Yoon, Y. et al. (2009). Autonomous Target Detection and Localization Using Cooperative Unmanned Aerial Vehicles. In *Optimization and Cooperative Control Strategies: Proceedings of the 8th International Conference on Cooperative Control and Optimization*. Springer Berlin Heidelberg. (pp. 195–205). https://doi.org/10.1007/978-3-540-88063-9_12
3. Rick, Zh., & Liu, H. (2011). Vision-Based Relative Altitude Estimation of Small Unmanned Aerial Vehicles in Target Localization. In *Proceedings of the 2011 American Control Conference. IEEE*. (pp. 4622–4627). <http://dx.doi.org/10.1109/ACC.2011.5991109>
4. Kanevskyi, L. B., Pashynskyi, V. A., Kolisnyk, O. S., Bedrii, N. A. (2021). Metod vydilennia tochok pryv'iazky na aerofotoznmkakh, otrymanykh bezpilotnymy litalnymy aparatamy, dlia yikh vykorystannia pid chas avtonomnoi navihatsii [Method of Allocation of Mounting Points on Aerophotographs Obtained by Unmanned Aerial Vehicles for Use During Autonomous Navigation]. *Problemy stvorennia, vyprovuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems. Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 20, 4–17. Zhytomyr: ZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2021.20.01> [in Ukrainian].
5. Kim, I., & Kin Choong, Y. (2015). Object Location Estimation from a Single Flying Camera. In *Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM). 9th International Conference. IARIA*. (pp. 82–88).
6. Snehil, S., Bhushan, S., & Sivayazi, K. (2020). Detection and Location Estimation of Object in Unmanned Aerial Vehicle Using Single Camera and GPS. In *First International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T). IEEE*. (pp. 73–78). <http://dx.doi.org/10.1109/ICPC2T48082.2020.9071439>

7. Daramouskas, I. et al. (2023). Camera-Based Local and Global Target Detection, Tracking, and Localization Techniques for UAVs. *Machines*, 11, 2. <https://doi.org/10.3390/machines11020315>
8. Young-Hoon, J., Ko, K., & Lee, W. (2018). An Indoor Location-Based Positioning System Using Stereo Vision with the Drone Camera. *Mobile Information Systems*, 5160543. <http://dx.doi.org/10.1155/2018/5160543>
9. Yangjun, G., & Li, G. (2023). A GNSS Instrumentation Covert Directional Spoofing Algorithm for UAV Equipped with Tightly-Coupled GNSS/IM. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1–13. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2023.3240197>
10. Zhengyou, Zh. (2021). Camera Calibration. *Computer Vision: a Reference Guide*. Springer International Publishing, 130–131. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63416-2_164

B. M. Zhurakivskyi, L. M. Naumchak, M. P. Romanchuk, M. V. Tantsiura

ERROR ANALYSIS OF AN IMPROVED ALGORITHM FOR CALCULATING THE COORDINATES OF OBJECTS BASED ON AERIAL RECONNAISSANCE DATA FROM AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

The calculation of geographical coordinates of objects based on aerial reconnaissance data from unmanned aerial vehicles in the face of enemy electronic warfare is an urgent task, the solution of which can increase the efficiency of the use of unmanned aerial vehicles for military missions. In particular, high-quality processing of aerial reconnaissance data obtained from unmanned aerial vehicles in the absence of signals from the GNSS global positioning system through the use of advanced algorithms and methods will help to improve the accuracy and efficiency of determining the coordinates of ground objects. The article proposes an improved algorithm that allows obtaining the coordinates of objects on flat terrain with high accuracy using aerial reconnaissance materials. To do this, the operator selects four points that are visible both on reconnaissance materials and on reference images that are georeferenced. The selected points allow to calculate the geographical coordinates of any point on the aerial reconnaissance materials. The accuracy of the coordinates will be higher for objects located inside a quadrangle with vertices at the selected points. The marked key points allow for a projective transformation that displays how the pixel coordinates of an object in an UAV image are transformed into its geographic coordinates. To ensure high accuracy of coordinate calculation, key points should be selected around the object, i.e., in such a way that it is located inside a quadrangle with vertices at the key points. As a result of the simulations, the maximum error inside the quadrangle of key points is less than 2 m, and the maximum error outside is about 17 m. The average error inside the quadrangle of key points was slightly more than 0.5 m, and outside - about 1 m. After the simulations, the improved algorithm was tested in field tests. For this purpose, several terrain areas were selected, and the coordinates of the objects located on them were determined. Several wing-type UAVs flew over these areas. The data obtained during the field tests do not differ much from those obtained during the simulations.

Keywords: *unmanned aerial vehicle complex; unmanned aerial vehicle; algorithm; computer vision; electronic warfare; projective transformation; error analysis.*