

С.І. Березіна, С.В. Логачов, О.І. Солонець

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МЕТОД КООРДИНАТНОЇ ПРИВ'ЯЗКИ ЗНІМКІВ, ОТРИМАНИХ З БПЛА, ЗА ЕЛЕМЕНТАМИ ЗОВНІШНЬОГО ОРІЄНТУВАННЯ

В статті проведено аналіз існуючих методів координатної прив'язки зображень з використанням апроксимуючих функцій та відновлення елементів зовнішнього орієнтування класичними методами за допомогою рядів Тейлора. Встановлено, що ці методи не враховують особливості знімків, отриманих з БПЛА, таких як: наявність великих перспективних спотворень, маленька зона сцени на кадрі, недостатня точність початкових наближень. Досліджено можливість використання симплекс-методу деформуємого багатогранника для вирішення поставленої задачі. При реалізації цього методу для визначення елементів зовнішнього орієнтування камери як незалежні змінні використовувалися кути зовнішнього орієнтування. Просторове положення розраховувалось на підставі кутів та заданих реперних точок.

Ключові слова: координатна прив'язка знімків, елементи зовнішнього орієнтування, апроксимуючі функції, триангуляційна мережа, симплекс-метод деформуємого багатогранника.

Вступ

Постановка проблеми. Для ведення сучасних бойових дій потрібна висока інформативність розвідувальних даних, що забезпечується формуванням цифрових зображень з високою просторовою розрізненістю. Космічна зйомка має ряд переваг, таких як регулярність, наявність архівів за багато років, велике покриття одного знімка, цифрова форма подання, в той же час не забезпечує оперативного відновлення інформації в зоні розвідки. Використання пілотованих літаків-розвідників вимагає наявності підготовлених аеродромів та не виключає втрат особового складу в ході бойових дій. Створення сучасних моделей безпілотних літальних апаратів (БПЛА), здатних забезпечувати оперативними даними з високою просторовою розрізненістю, дозволяє розглядати їх як альтернативне космічному та аерознімання джерело інформації [1–3].

Необхідним етапом при роботі з аерокосмічними знімками є визначення просторових координат об'єктів на зображенні. На даний час досить актуальним залишається питання адаптації існуючих та розробка нових алгоритмів географічної прив'язки знімків, отриманих за допомогою БПЛА.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдання визначення географічних координат окремих точок знімка (реперів) дозволяє відновити координати по всьому полю [4].

Аналіз робіт в даній області показав, що існуючі алгоритми обробки знімків достатньо глибоко пророблені для даних космічної та висотної аерозйомки [4–14] та не враховують особливості отримання даних з БПЛА, таких як [15]:

– невелика висота польоту і, як наслідок, мала зона огляду;

– відсутність гіростабілізуючої платформи для БПЛА класів "міні" та "мікро";

– відсутність синхронізації моменту зйомки і визначення просторового положення та кутів літального апарату;

– низька точність визначення елементів зовнішнього орієнтування знімальної апаратури;

– рух і вібрація знімальної апаратури;

– стохастичні збурення, викликані щільними шарами атмосфери, які призводять до значних перспективних спотворень на зображенні.

Формулювання мети статті. Метою статті є аналіз існуючих методів координатної прив'язки знімків, отриманих за допомогою БПЛА, та розробка нового методу координатної прив'язки знімків за елементами зовнішнього орієнтування.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для здійснення прив'язки аерокосмічних знімків зазвичай використовуються реперні точки місцевості, відображені на знімку з апіорі відомими координатами. При цьому можуть використовуватися як опозначки пунктів державної геодезичної мережі, так і стаціонарні об'єкти (перехрестя доріг, антропогенні об'єкти). Після завдання реперних точок на знімку завдання прив'язки може бути вирішене двома шляхами:

– використанням апроксимуючих функцій;

– відновленням елементів зовнішнього орієнтування знімальної апаратури у момент зйомки з урахуванням рельєфу підстильної поверхні.

1. Координатна прив'язка зображень з використанням апроксимуючих функцій При використанні цього методу необхідна кількість заданих реперних точок залежить від необхідної точності

прив'язки, рельєфу місцевості й умов зйомки [5]. У загальному випадку функції взаємозв'язку точок на місцевості та на знімку виражатимуться таким чином:

$$\begin{cases} L = L_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + \\ + a_5xy + a_6x^3 + a_7y^3 + \dots; \\ B = B_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4y^2 + \\ + b_5xy + b_6x^3 + b_7y^3 + \dots, \end{cases} \quad (1)$$

де L – географічна довгота точки;
 B – географічна широта точки;
 L_0 – зміщення по довготі лівого верхнього кута знімка;
 B_0 – зміщення по широті лівого верхнього кута знімка;
 a_n, b_n – апроксимуючі коефіцієнти; x, y – адреса точки на зображенні відносно лівого верхнього кута.

Для практичної реалізації обмежуються, як правило, поліномами першого порядку (по три члени поліномів (1)) з використанням апроксимуючих площин. При невисоких вимогах до прив'язки знімка, невеликій зоні огляду (не більше за 50x50 км), рівнинній місцевості та відсутності перспективних спотворень для цього виду прив'язки достатня наявність 3-х реперних точок, які розташовані не на одній лінії та максимально рознесені на знімку (рис. 1). Як правило, це знімки надвисокої розрізненості, отримані з космічних апаратів (КА) [6].

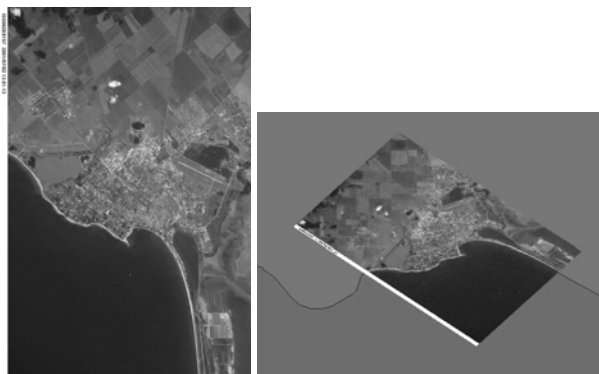


Рис. 1. Використання апроксимуючих функцій першого порядку для прив'язки знімка з КА Ikonos

Для точнішої прив'язки з урахуванням рельєфу місцевості будуються триангуляційні мережі (рис. 2). Реалізація такого підходу залежить від наявності на знімку достатньої кількості реперів для їх створення [7]. Цей метод прив'язки використовується у більшості ГІС-пакетів. Серед них ArcGis, ГІС "Панорама", GlobalMapper та інші [8-10]. Проблемою прив'язки знімків, отриманих з БПЛА, є наявність великих перспективних спотворень, маленька зона сцени на кадрі і, як наслідок, неможливість завдання

достатньої кількості реперних точок на зображенні для досягнення високої точності.

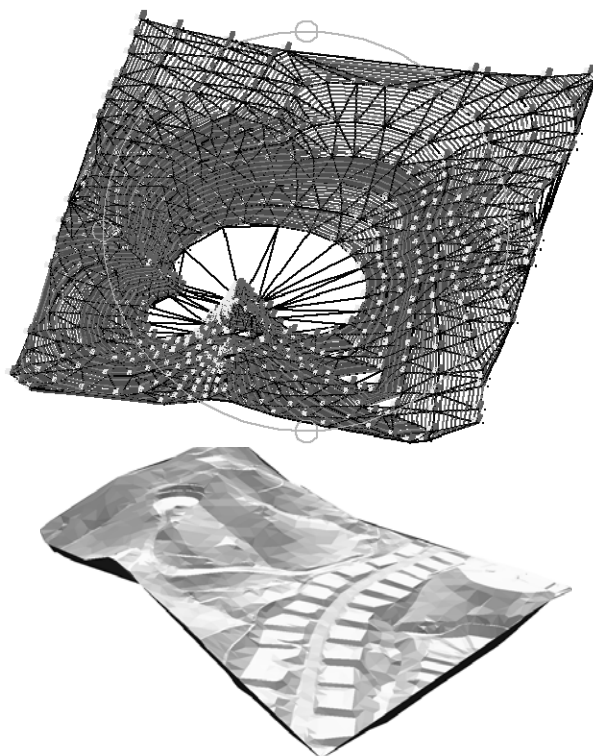


Рис. 2. Побудова триангуляційної мережі для прив'язки знімків

2. Координатна прив'язка зображень з використанням елементів зовнішнього орієнтування.

Багато фотограмметричних завдань вирішуються в системі просторових координат точок аерознімка S_{XYZ} , віднесених до початку в центрі проєкції S , та осями, паралельними відповідним осям фотограмметричної системи координат [11].

Розташування знімка в просторі визначається шістьма його елементами зовнішнього орієнтування, три з яких – координати головної точки $S (X_S, Y_S, Z_S)$ називаються лінійними і три α, β, γ – кутівими (рис. 3).

Формули переходу від просторового розташування точки об'єкту до розташування цієї точки на знімку з урахуванням напрямку осі Z і просторового положення фотоапарата будуть наступні [12]:

$$\begin{cases} x - x_0 = -f \times \\ \times \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}, \\ y - y_0 = -f \times \\ \times \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}, \end{cases}$$

де X_S, Y_S, Z_S – просторове розташування знімальної апаратури; x_0, y_0 – координати центру знімка; a, b, c – направляючі косинуси, які обчислюються за формулами, які приведено в [13].

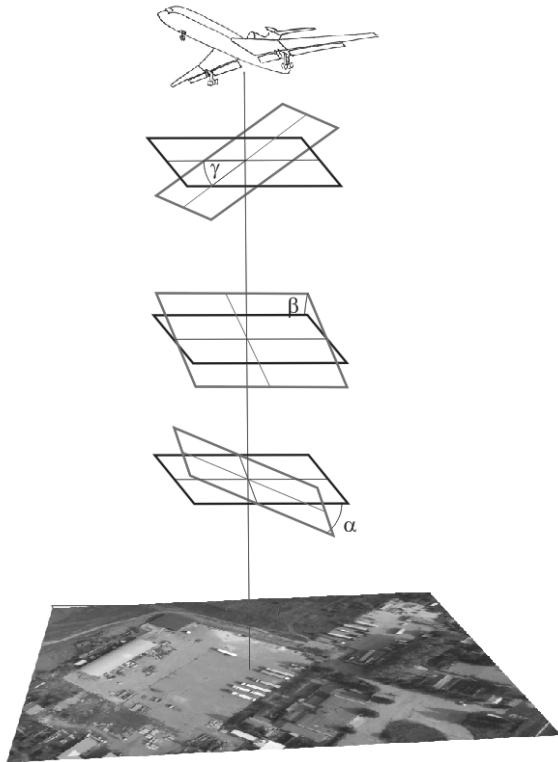


Рис. 3. Орієнтування площини знімка відносно площини об'єкту

Формули зворотного переходу від координат на знімку до прямокутних координат мають вигляд:

$$\begin{cases} X - X_S = (Z - Z_S) \times \\ \quad \times \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}; \\ Y - Y_S = (Z - Z_S) \times \\ \quad \times \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}. \end{cases} \quad (2)$$

Оскільки наближені значення елементів орієнтування знімка відомі, то координати x і y зображення опорних точок на знімку легко обчислюються по цих формулах і позначаються через (x) і (y) . Отже обчислені координати відрізнятимуться від вимірних [14; 16]. Позначаючи виправлення до наближених значень елементів орієнтування через δx , δy , δz , $\delta \alpha$, $\delta \omega$, $\delta \chi$, δf , δx_0 і δy_0 і вважаючи, що маються надмірні виміри, можна скласти рівняння виправлень:

$$\begin{cases} v = (x) + \frac{\partial x}{\partial X_S} \delta X_S + \frac{\partial x}{\partial Y_S} \delta Y_S + \frac{\partial x}{\partial Z_S} \delta Z_S + \frac{\partial x}{\partial \alpha} \delta \alpha + \\ \quad + \frac{\partial x}{\partial \omega} \delta \omega + \frac{\partial x}{\partial \chi} \delta \chi + \frac{\partial x}{\partial f} \delta f + \frac{\partial x}{\partial x_0} \delta x_0 + \frac{\partial x}{\partial y_0} \delta y_0 - x; \\ v' = (y) + \frac{\partial y}{\partial X_S} \delta X_S + \frac{\partial y}{\partial Y_S} \delta Y_S + \frac{\partial y}{\partial Z_S} \delta Z_S + \frac{\partial y}{\partial \alpha} \delta \alpha + \\ \quad + \frac{\partial y}{\partial \omega} \delta \omega + \frac{\partial y}{\partial \chi} \delta \chi + \frac{\partial y}{\partial f} \delta f + \frac{\partial y}{\partial x_0} \delta x_0 + \frac{\partial y}{\partial y_0} \delta y_0 - y. \end{cases}$$

Одна опорна точка дає два рівняння з дев'ятьма невідомими і вагами p і p' вимірних величин x і y . Отже, для вирішення задачі потрібно не менше п'яти опорних точок. Рівняння вирішуються за умови $[pv^2 + p'v'^2] = \min$ методом послідовних наближень. Обчислення продовжуються до тих пір, поки виправлення стануть менше допустимого значення.

На основі уточнених значень елементів орієнтування можуть бути отримані координати відповідної точки місцевості. Проте, використання наведеної вище методики уточнення елементів зовнішнього орієнтування може бути використане при досить точних початкових наближеннях. Погрішність значень кутів зовнішнього орієнтування не повинна перевищувати 30 секунд. Отже, для БПЛА, які схильні сильним стохастичним збуренням, за відсутності синхронізації за часом моменту зйомки і виміру елементів зовнішнього орієнтування, та які не оснащені гіростабілізуючою платформою, необхідно розробити метод пошуку, який буде менш критичним до точності завдання початкових наближень.

3. Пошук елементів зовнішнього орієнтування з використанням симплекс-методу багатогранника, що деформується. Симплексний метод пошуку, запропонований Спедлі, Хекстом та Хімсвортом, ґрунтується на використанні регулярних багатогранників [17]. Регулярний симплекс E^n є рівносторонніми трикутниками для випадку двох змінних, тетраедром – у разі трьох змінних і т. д. (рис. 4).

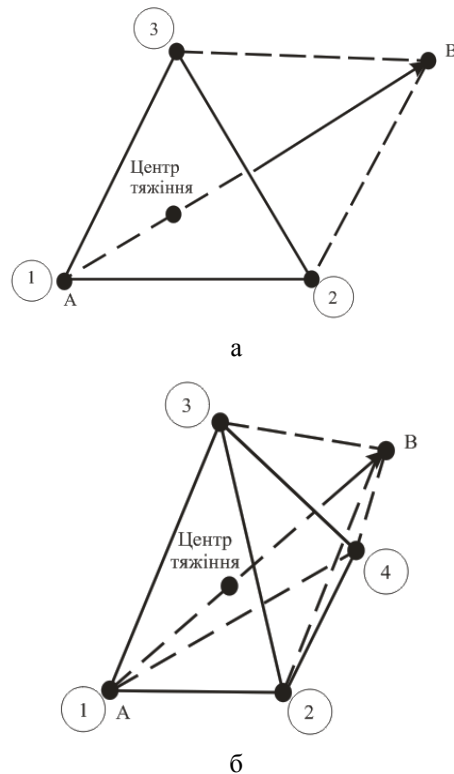


Рис. 4. Регулярні симплекси: а – для випадку двох незалежних змінних; б – для випадку трьох незалежних змінних

При пошуку мінімуму цільової функції $f(x)$ пробні вектори x можуть бути обрані в точках E^n , яка знаходиться у вершинах симплекса. Координати вершин регулярного симплексу визначаються матрицею D , у якій стовпці є вершинами, пронумерованими від 1 до $(n+1)$, а рядки – координати, і набуває значень від 1 до n :

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d_1 & d_2 & \dots & d_2 \\ 0 & d_2 & d_1 & \dots & d_2 \\ 0 & d_2 & d_2 & \dots & d_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & d_2 & d_2 & \dots & d_1 \end{bmatrix},$$

де $d_1 = \frac{t}{n\sqrt{2}}(\sqrt{n+1} + n - 1);$

$$d_2 = \frac{t}{n\sqrt{2}}(\sqrt{n+1} - 1);$$

t – відстань між двома вершинами.

Цільова функція може бути розрахована в кожній з вершин симплексу з вершини, де цільова функція максимальна (точка А на рис. 4), для цього проводиться проектуюча пряма через центр тяжіння симплексу. Потім точка А виключається й будується новий симплекс, що називається відбитим, з точок які залишилися, і однієї нової точки В, розташованої по проектуючій прямій на розрахованій відстані від центру тяжіння. Продовження цієї процедури, в якій кожного разу викреслюється вершина, де цільова функція максимальна, а також використання правил зменшення розміру симплексу і відвертання циклічного руху в околиці екстремуму, дозволяють здійснити пошук, що не використовує похідні і в якому величина кроку на будь-якому етапі k фіксована, а напрямок пошуку можна змінювати. На рис. 5 наведено послідовний симплекс, побудований у двовимірному просторі з "гарною" цільовою функцією.

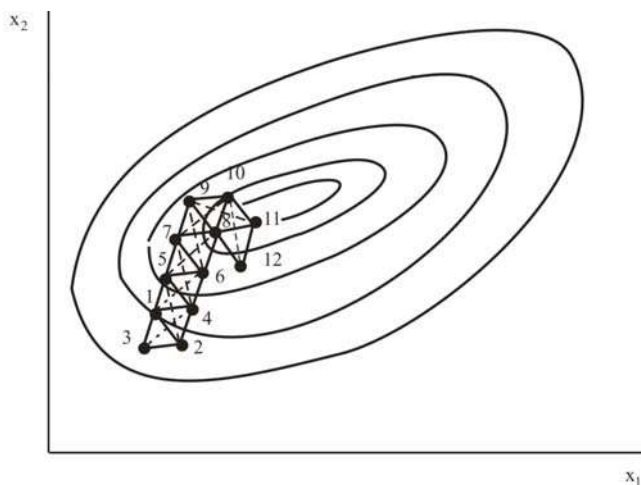


Рис. 5. Послідовні симплекси, які побудовані у двовимірному просторі з "гарною" цільовою функцією

До недоліків цього методу слід віднести відсутність прискорення пошуку і труднощі на викривлених "ярах" і "хребтах" [18].

У методі Нелдера і Міда мінімізується функція n незалежних змінних з використанням $n+1$ вершин деформуємого багатогранника в симплексі E^n . Кожна вершина може бути ідентифікована вектором x . Вершина (точка) в E^n , в якій значення $f(x)$ максимальне, проектується через центроїд вершин, що залишилися.

Поліпшені значення цільової функції знаходяться послідовною заміною точки з максимальним значенням $f(x)$ на більш "добрі" точки, поки не буде знайдено мінімум $f(x)$.

Детальніше цей метод може бути описаний таким чином.

Нехай $x_i^{(k)} = [x_{i1}^{(k)}, \dots, x_{ij}^{(k)}, \dots, x_{in}^{(k)}]^T,$

$i = 1, \dots, n+1$, є i -ою вершиною в E^n на k -му етапі пошуку, $k = 0, 1, \dots, n$, та нехай значення цільової функції в $x_i^{(k)}$ дорівнює $f(x_i^{(k)})$.

Крім того, треба відмітити ті вектори x багатогранника, які дають максимальне і мінімальне значення $f(x)$:

$$f(x_h^{(k)}) = \max \{ f(x_1^{(k)}), \dots, f(x_{n+1}^{(k)}) \},$$

де $x_h^{(k)} = x_i^{(k)},$

та $f(x_l^{(k)}) = \min \{ f(x_1^{(k)}), \dots, f(x_{n+1}^{(k)}) \},$

де $x_l^{(k)} = x_i^{(k)}.$

Оскільки багатогранник в E^n складається з $(n+1)$ вершин x_1, \dots, x_{n+1} , нехай x_{n+2} буде центром тяжіння всіх вершин, виключаючи x_h . Тоді координати цього центру визначаються формулою:

$$x_{n+2,j}^{(k)} = \frac{1}{n} \left[\left(\sum_{i=1}^{n+1} x_{ij}^{(k)} \right) - x_{hj}^{(k)} \right], \quad j = 1, \dots, n, \quad (3)$$

де індекс j означає координатний напрямок.

Початковий багатогранник зазвичай вибирається у вигляді регулярного симплексу з точкою 1 в якості початку координат. Процедура пошуку вершини в E^n , в якій $f(x)$ має найкраще значення, складається з наступних операцій.

1. Віддзеркалення – проектування $x_h^{(k)}$ через центр тяжіння відповідно до співвідношення:

$$x_{n+3}^{(k)} = x_{n+2}^{(k)} + \alpha (x_{n+2}^{(k)} - x_h^{(k)}),$$

де $\alpha > 0$ є коефіцієнтом віддзеркалення; $x_{n+2}^{(k)}$ – центр тяжіння, що обчислюється за формулою (3);

$x_h^{(k)}$ – вершина, в якій функція $f(x)$ приймає найбільше з $n+1$ її значень на k -му етапі.

2. Розтягування. Якщо

$$f\left(x_{n+3}^{(k)}\right) \leq f\left(x_i^{(k)}\right),$$

то вектор $\left(x_{n+3}^{(k)} - x_{n+2}^{(k)}\right)$ розтягується відповідно до співвідношення:

$$x_{n+4}^{(k)} = x_{n+2}^{(k)} + \gamma \left(x_{n+3}^{(k)} - x_{n+2}^{(k)}\right),$$

де $\gamma > 1$ є коефіцієнтом розтягування.

Коли

$$f\left(x_{n+4}^{(k)}\right) < f\left(x_1^{(k)}\right),$$

то $x_h^{(k)}$ замінюється на $x_{n+4}^{(k)}$ та процедура триває знову з операції 1 при $k = k+1$. Інакше $x_h^{(k)}$ замінюється на $x_{n+3}^{(k)}$ й також здійснюється перехід до операції 1 при $k = k+1$.

3. Стискування. Якщо

$$f\left(x_{n+3}^{(k)}\right) > f\left(x_i^{(k)}\right)$$

для всіх $i \neq h$, то вектор $\left(x_h^{(k)} - x_{n+2}^{(k)}\right)$ стискається відповідно до формули:

$$x_{n+5}^{(k)} = x_{n+2}^{(k)} + \beta \left(x_h^{(k)} - x_{n+2}^{(k)}\right),$$

де $0 < \beta < 1$ є коефіцієнтом стискування.

Потім $x_h^{(k)}$ замінюється на $x_{n+5}^{(k)}$ й здійснюється повернення до операції 1 для продовження пошуку на $(k+1)$ -му кроці.

4. Редукція. Коли

$$f\left(x_{n+3}^{(k)}\right) > f\left(x_h^{(k)}\right),$$

всі вектори $\left(x_i^{(k)} - x_1^{(k)}\right)$, $i = 1, \dots, n+1$ зменшуються в 2 рази з відліком від $x_1^{(k)}$ відповідно до формули:

$$x_i^{(k)} = x_1^{(k)} + 0,5 \left(x_i^{(k)} - x_1^{(k)}\right), \quad i = 1, \dots, n+1.$$

Потім здійснюється повернення до операції 1 для продовження пошуку на $(k+1)$ -му кроці. Критерій закінчення пошуку, використаний Нелдером і Мідом, полягав в перевірці умови:

$$\sqrt{\left\{ \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} \left[f\left(x_i^{(k)}\right) - f\left(x_{n+2}^{(k)}\right) \right]^2 \right\}} \leq \varepsilon,$$

де ε – довільне мале число; $f\left(x_{n+2}^{(k)}\right)$ – значення цільової функції в центрі тяжіння $x_{n+2}^{(k)}$.

Деформуємий багатогранник в протилежність жорсткому симплексу адаптується до топографії цільової функції, витягуючись уздовж довгих похилих площин, змінюючи напрям в зігнутих западинах і стискаючись в околиці мінімуму. Коефіцієнт віддзеркалення α використовується для проектування вершини з найбільшим значенням $f(x)$ через центр тяжіння деформуємого багатогранника. Коефіцієнт γ вводиться для розтягування вектору пошуку у разі, якщо віддзеркалення дає вершину зі значенням $f(x)$, меншим, ніж найменше значення $f(x)$, яке отримано до віддзеркалення. Коефіцієнт стискування β використовується для зменшення вектору пошуку, якщо операція віддзеркалення не привела до вершини зі значенням $f(x)$, меншим, ніж друге за величиною (після найбільшого) значення $f(x)$, отриманого до віддзеркалення. Таким чином, за допомогою операцій розтягування або стискування розміри і форма деформуємого багатогранника масштабуються так, щоб вони задовольняли топології вирішуваної задачі.

При використанні вищеописаного методу для визначення просторових координат об'єкту як незалежних змінних використовувалися кути зовнішнього орієнтування. Просторові координати розраховувалися (2) з використанням опорних точок. При вирішенні поставленої задачі виникає питання про значення коефіцієнтів віддзеркалення α , розтягування γ та стискування β . Після того як деформуємий багатогранник відповідним чином промасштабовано, його розміри повинні підтримуватися незмінними, поки зміни в топології завдання не зажадають застосування багатогранника іншої форми. Це можливо реалізувати тільки при $\alpha = 1$. Крім того, Нелдер і Мід показали, що при рішенні задачі з $\alpha = 1$ потрібна менша кількість обчислень функції, чим при $\alpha < 1$. З іншого боку, α не має бути багато більше одиниці, оскільки багатогранник, що деформується, легше адаптується до топології завдання при менших значеннях α , особливо коли необхідно змінювати напрям пошуку, зіткнувшись із зігнутою западиною, та в області локального мінімуму розміри багатогранника повинні зменшуватися, і велике α в цих умовах уповільнить збіжність. Таким чином, значення $\alpha = 1$ обирається як компроміс.

В роботі [17] зазначено, що розміри і орієнтація початкового багатогранника в деякій мірі впливали на час рішення, а значення α , β та γ робили значно більший вплив на можливість вирішення задачі. Допустиме значення похибки відхилення від дійсного положення реперних точок приймалось не більш

0,5 м. Результати визначення елементів зовнішнього орієнтування розглянутим методом наведені на рис. 6. На осі абсцис позначена погрішність визначення кутів зовнішнього орієнтування в градусах, на осі ординат – кількість циклів для досягнення вимог

щодо точності визначення просторових координат.

Як слідує з рис. 6, при прийнятих значеннях коефіцієнтів істинні значення елементів зовнішнього орієнтування були отримані не більше, ніж за 27 циклів.

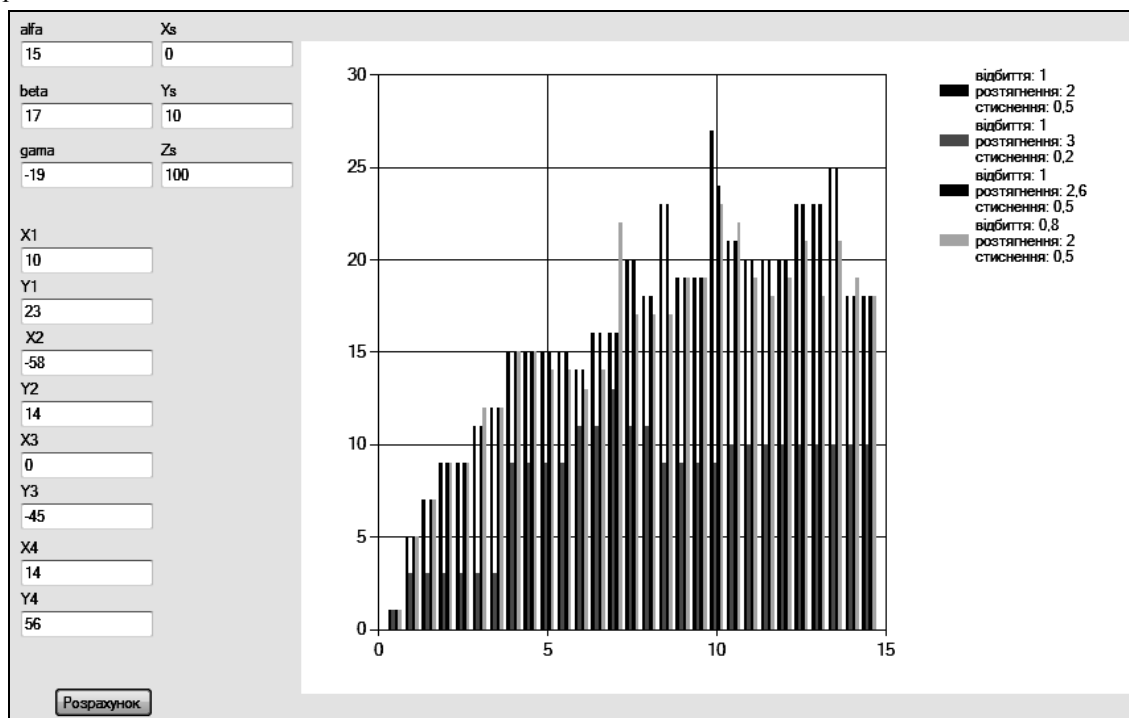


Рис. 6. Використання симплекс-методу деформуємого багатогранника для визначення елементів зовнішнього орієнтування знімальної апаратури

Висновки

Проблемою прив'язки знімків, отриманих з БПЛА, при використанні апроксимуючих функцій є наявність великих перспективних спотворень, маленька зона сцени на кадрі і, як наслідок, неможливість завдання достатньої кількості реперних точок на зображенні для досягнення високої точності.

Недостатня точність визначення елементів зовнішнього орієнтування і несинхронізованість з мо-

ментом зйомки, схильність до значних стохастичних збурень призводить до поганих початкових наближень при вирішенні задачі фотограмметричної обробки знімків, отриманих з БПЛА, класичними методами.

Розглянутий в роботі метод, який використовує симплекс-метод деформуємого багатогранника, дозволяє відновлювати істинні значення елементів зовнішнього орієнтування, які надалі використовуються для отримання географічних координат точок на знімку.

Список літератури

1. Чепурний В.А. Аналіз тенденцій розвитку та застосування розвідувальних безпілотних літальних апаратів в сучасних мережецентричних та гібридних війнах / В.А. Чепурний, М.В. Бардаков, Г.В. Худов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – № 4 (21). – С. 24-28.
2. Пашук Ю.М. Тактичні безпілотні авіаційні комплекси: можливості та обмеження у застосуванні / Ю.М. Пашук, Ю.П. Сальник // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – № 1 (18). – С. 23-28.
3. Животовський Р.М. Аналіз способів застосування безпілотних авіаційних комплексів / Р.М. Животовський, Ю.О. Горобець // Системи озброєння і військова техніка. – 2016. – № 4 (48). – С. 16-21.
4. Бугаевский Л.М. Теория одиночных космических снимков / Л.М. Бугаевский, А.М. Портнов. – М.: Недра, 1984. – 280 с.
5. Гонин Г.Б. Космическая фотосъемка для изучения природных ресурсов / Г.Б. Гонин. – Л.: Недра, 1980. – 319 с.
6. Довгий С.О. Сучасні інформаційні технології екологічного моніторингу Чорного моря / С.О. Довгий, Г.Я. Красовський, В.В. Радчук та ін.; під ред. С.О. Довгого. – К.: Інформаційні технології, 2010. – 260 с.
7. Кирсанов А.П. Метод навигации по полю точечных ориентиров / А.П. Кирсанов, А.В. Соловьев // Изв. РАН. Техн. кибернетика. – 1993. – № 4. – С. 148-156.
8. Использование коэффициентов рационального многочлена (RPCs) для ортотрансформирования спутниковых изображений IKONOS/QuickBird [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.ntsomz.ru/dzz_info/articles_dzz/ikonos_quickbird.

9. Ортокоррекция космических снимков с использованием RPC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/ortho-rpc.html>.
10. Создание ортоисправленных изображений со спутника IKONOS на основе ЦМР со спутника SPOT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ntsomz.ru/dzz_info/articles_dzz/ortoedited_img.
11. Шавук В.С. Теоретическое обоснование цифровой фотограмметрической системы обработки космических снимков высокого разрешения: дис. ... канд. тех. наук: 25.00.34; защищена 26.11.09; утв. 26.11.09 / Шавук Виталий Степанович. – М., 2009. – 125 с.
12. Лебедев Д.В. Навигация и управление ориентацией малых космических аппаратов / Д.В. Лебедев. – К.: Наукова думка, 2006. – 298 с.
13. Безменов В.М. Фотограмметрия. Построение и уравнивание аналитической фототриангуляции: уч.-метод. пособие. / В.М. Безменов. – Казань: КГУ, 2009. – 86 с.
14. Обиралов А.И. Фотограмметрия / А.И. Обиралов, А.Н. Лимонов, Л.А. Гаврилова. – М.: Колосс, 2002. – 240 с.
15. Гриб Д.А. Проблеми питання використання даних БПЛА при веденні розвідки / Д.А. Гриб, Д.В. Карлов, С.І. Березина, А.М. Остапова // Новітні технології – для захисту повітряного простору: зб. тез доповідей Тринадцятої наукової конференції Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. 12–13 квітня 2017 р. – Харків, 2017. – 383 с.
16. Турчак Л.И. Основы численных методов / Л.И. Турчак. – М.: Наука, 1987. – 318 с.
17. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1975. – 536 с.
18. Nelder J.A. A simplex method for function minimization / J.A. Nelder, R. Mead // *Computer Journal*. – 1965. – № 7. – P. 308-313.

References

1. Cherpurnyi, V.A., Bardakov, M.V. and Khudov, G.V. (2015), "Analiz tendentsiy rozvytku ta zastosuvannya rozvidual'nykh bezpilotnykh lital'nykh aparativ v suchasnykh merezhetsentrychnykh ta hibrydnykh viynakh" [Analysis of trends and applications intelligence UAVs in the modern net-centric and hybrid warfare], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 4(21), pp. 24-28.
2. Pashchuk, Yu.M. and Salnyk, Yu.P. (2015), "Takychni bezpilotni aviatsiyni kompleksi: mozhlyvosti ta obmezheniya u zastosuvanni" [Tactical unmanned aircraft systems: usage capabilities and limitations], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 1(18), pp. 23-28.
3. Zhyvotovskiy, R.M. and Gorobets, U.O. (2016), "Analiz sposobiv zastosuvannya bezpilotnykh aviatsiynykh kompleksiv" [Analysis of application unmanned aircraft systems], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 4 (48), pp. 16-21.
4. Bugayevskiy, L.M. and Portnov, A.M. (1984), "Teoriya odinochnykh kosmicheskikh snimkov" [Theory of single space images], Nedra, Moscow, 280 p.
5. Gonin, G.B. (1980), "Kosmicheskaya fotos'yemka dlya izucheniya prirodnykh resursov" [Space photography for studying natural resources], Nedra, Leningrad, 319 p.
6. Dovhyy, S.O., Krasovsky, G.Ya., Radchuk, V.V. et al. / Ed. Dovhyy, S.O. (2010), "Suchasni informatsiyni tekhnolohiyi ekolohichnoho monitorynha Chornoho morya" [Modern Information Technologies for Ecological Monitoring of the Black Sea], Information Technologies, Kyiv, 260 p.
7. Kirsanov, A.P. and Solovyov, A.V. (1993), "Metod navigatsii po polyu tochechnykh oriyentirov" [Method of navigation over the point landmarks field], *Proc. RAS. Techn. cybernetics*, No. 4, pp. 148-156.
8. "Ispol'zovaniye koeffitsiyentov ratsional'nogo mnogochlena (RPCs) dlya ortotransformirovaniya sputnikovykh izobrazheniy IKONOS/QuickBird" [Using rational polynomial coefficients (RPCs) for orthorectification of satellite images IKONOS/QuickBird], available at: www.ntsomz.ru/dzz_info/articles_dzz/ikonos_quickbird (accessed 27 November 2017).
9. "Ortokorreksiya kosmicheskikh snimkov s ispol'zovaniem RPC" [Orthorectification of space images using RPC], available at: <http://gis-lab.info/qa/ortho-rpc.html> (accessed 27 November 2017).
10. "Sozdaniye ortoispravlenykh izobrazheniy so sputnika IKONOS na osnove TSMR so sputnika SPOT" [IKONOS Orthotransformed Images Generating using DTM from SPOT Spacecraft], available at: www.ntsomz.ru/dzz_info/articles_dzz/ortoedited_img (accessed 27 November 2017).
11. Shavuk, V.S. (2009), "Teoreticheskoye obosnovaniye tsifrovoy fotogrammetricheskoy sistemy obrabotki kosmicheskikh snimkov vysokogo razresheniya: dissertatsiya" [Theoretical justification of the digital photogrammetric system for processing high-resolution space images: dissertation], Moscow, 125 p.
12. Lebedev, D.V. (2006), "Navigatsiya i upravleniye oriyentatsiyey malykh kosmicheskikh apparatov" [Navigating and controlling the orientation of small space vehicles], Naukova dumka, Kyiv, 298 p.
13. Bezmenov, V.M. (2009), "Fotogrammetriya. Postroyeniye i uravnvaniye analiticheskoy fototriangulyatsii: Uch.-metod. posobiye" [Photogrammetry. Construction and equalization of analytical phototriangulation], KSU, Kazan, 86 p.
14. Obiralov, A.I., Limonov, A.N. and Gavrilova, L.A. (2002), "Fotogrammetriya" [Photogrammetry], Koloss, Moscow, 240 p.
15. Hryb, D.A., Karlov, D.V., Berезина, S.I. and Ostapova, A.M. (2017), "Problemni pytannya vykorystannya danykh BPLA pry vedenni rozvidky" [Problematic Issues of Use of UAV Data in the Intelligence], *13th Scientific Conference of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University: New technologies – for air space protection*, April 13-14, 2017, Kharkiv, 383p.
16. Turchak, L.I. (1987), "Osnovy chislennykh metodov" [Fundamentals of numerical methods], Nauka, Moscow, 318 p.
17. Himmelblow, D. (1975), "Prikladnoye nelineynoye programmirovaniye" [Applied nonlinear programming], Mir, Moscow, 536 p.
18. Nelder, J.A. and Mead, R (1965), [A simplex method for function minimization], *Computer Journal*, No. 7. – P. 308-313.

Надійшла до редколегії 14.02.2018
Схвалена до друку 20.03.2018

Відомості про авторів:

Березина Світлана Іванівна

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
старший науковий співробітник Харківського
національного університету Повітряних Сил
ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3081-3331>
e-mail: berezina-svetlan@ukr.net

Логачов Сергій Володимирович

кандидат технічних наук
науковий співробітник Харківського
національного університету Повітряних Сил
ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5609-5158>
e-mail: serglogachov@ukr.net

Солонець Олексій Іванович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник Харківського
національного університету Повітряних Сил
ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6223-5022>
e-mail: alex_solonez@ukr.net

Information about the author(s):

Svitlana Berezina

Candidate of Technical Sciences
Senior Research
Senior Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Forces University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3081-3331>
e-mail: berezina-svetlan@ukr.net

Sergiy Logachov

Candidate of Technical Sciences
Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Forces University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5609-5158>
e-mail: serglogachov@ukr.net

Oleksiy Solonets

Candidate of Technical Sciences
Senior Research
Leading Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Forces University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6223-5022>
e-mail: alex_solonez@ukr.net

**МЕТОД КООРДИНАТНОЙ ПРИВЯЗКИ СНИМКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С БПЛА,
ПО ЭЛЕМЕНТАМ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ**

С.И. Березина, С.В. Логачев, А.И. Солонец

В статье проведен анализ существующих методов координатной привязки изображений с использованием аппроксимирующих функций и восстановления элементов внешнего ориентирования классическими методами с помощью рядов Тейлора. Установлено, что эти методы не учитывают особенности снимков, полученных с БПЛА, таких как: наличие больших перспективных искажений, маленькая зона сцены на кадре, недостаточная точность начальных приближений. Исследована возможность использования симплекс-метода деформируемого многогранника для решения поставленной задачи. При реализации этого метода для определения элементов внешнего ориентирования камеры в качестве независимых переменных использовались углы внешнего ориентирования. Пространственное положение рассматривалось на основе углов и заданных реперных точек.

Ключевые слова: координатная привязка снимков, элементы внешнего ориентирования, аппроксимирующие функции, триангуляционная сеть, симплекс-метод деформируемого многогранника.

**METHOD OF COORDINATE REFERENCING OF THE IMAGES RECEIVED FROM UAV,
BY ELEMENTS OF EXTERNAL ORIENTATION**

S. Berezina, S. Logachov, O. Solonets

Working with aerospace images it is a necessary stage to define spatial coordinates of the objects in the image. Analysis of the works in that field has shown that the currently available image processing algorithms are quite thoroughly worked through for spatial and high-altitude aerial imaging data, but those algorithms do not take into account specificity of the data, acquired by unmanned aerial vehicles (UAV), namely low flight altitude and as a consequence small surveillance area; absence of gyroscope reference platform for 'mini' and 'micro' UAVs; lack of synchronization between the moment of imaging and derivation of the aircraft's spatial position and angles; poor accuracy of determination of imaging instruments external orientation elements; imaging instruments movement and vibration; stochastic excitations caused by endoatmosphere that result in considerable distortion of perspective in the image. That is the reason why the problem of adapting the existing algorithms and developing new algorithms for geographical referencing of the images received by UAVs becomes critical.

The problem of referencing images received by UAVs with the usage of approximating functions is the presence of serious perspective distortions, small scene area in the frame, that results in impossibility to specify due number of defining points in the image for achieving high precision.

At solving the task of photogrammetric processing by classical methods it is impossible to correct external orientation elements with the usage of Taylor series because of insufficient accuracy of initial approximations.

The method considered in the paper uses simplex method of deformed polygon and allows restoring true values of external orientation elements that are further used for deriving geographical coordinates of a point in the image.

Keywords: images coordinate referencing, external orientation elements, approximating functions, triangulation network, simplex method of deformed polygon.