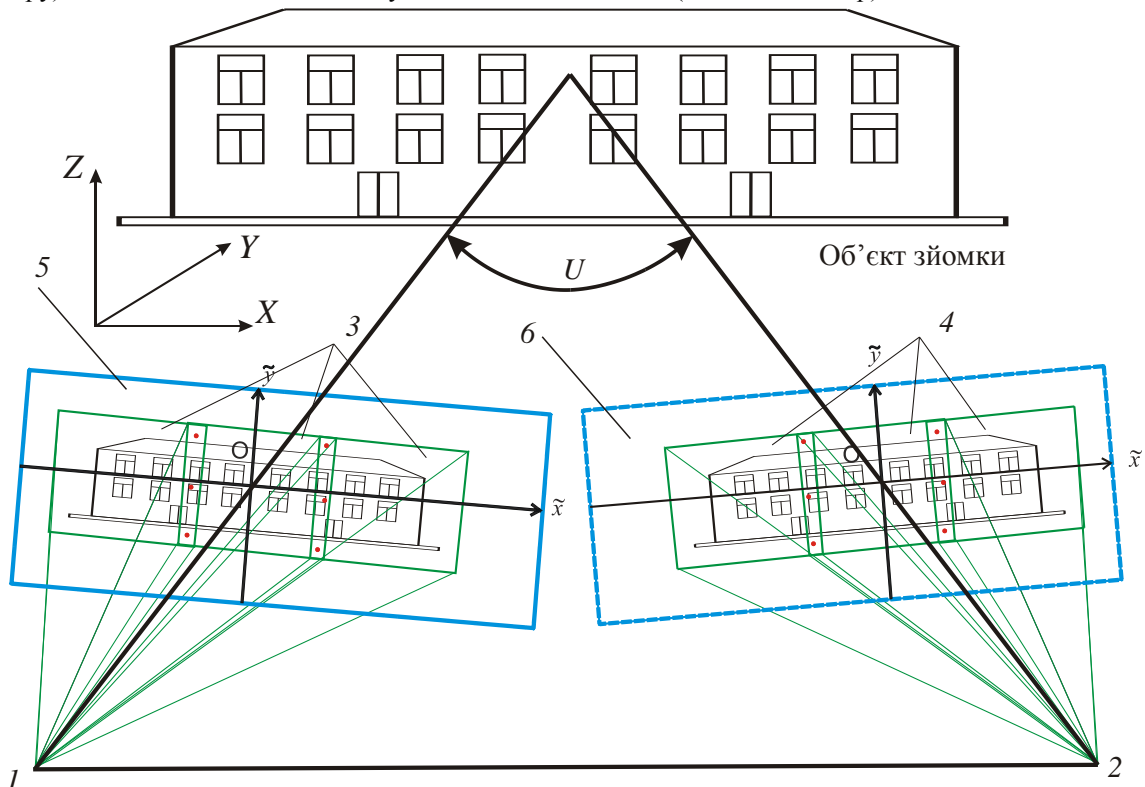


ОЦІНКА ТОЧНОСТІ СТЕРЕОПАРИ З КВАЗІЗНІМКІВ

Основним недоліком цифрових фотокамер є малий фізичний розмір матриці сенсорів і, як наслідок, малий кут поля зображення. Збільшення кута зображення за рахунок зменшення фокусної відстані об'єктива призводить до погіршення геометричних показників знімків і до значного зростання впливу оптичної дисторсії [1,4], а розширення параметрів матриці сенсорів до розмірів кадру плівкових камер значно здорожчує вартість знімального обладнання.

Позитивне вирішення даної задачі можливе з використанням теорії побудови квазізнімків [6,7]. Вперше ця ідея виникла в 1985 році в роботі [3] для знімків отриманих плівковою камерою. Для цифрових зображень ідеї створення єдиних знімків зустрічається в роботі [2]. В цих роботах ані теоретичного обґрунтування, ані оцінки точності виконано не було. Вирішити ці завдання планується в даній роботі. Запатентований нами спосіб побудови квазізнімка дає можливість одержати цілісне зображення на основі декількох суміжних знімків, виконаних з одного пункту простору. Координати точок, розташованих у місцях перекриття, визначаються після злиття кількох знімків у єдине зображення – квазізнімок. Отримане квазізображення несе в собі геометричні похибки, викликані помилками визначення елементів взаємного орієнтування знімків під час об'єднання. У даній статті зроблено спробу простежити вплив такого роду похибок на точність визначення координат за стереопарою квазізнімків і скласти висновок про можливість застосування нашої технології для виробничих цілей.

На мал. 1 зображено об'єкт фотографування – фасад будинку. Об'єкт фотографувався з базису 1-2 з кутом засічки U . З кожної точки фотографування було отримане об'єднання знімків: відповідно 3 і 4 (зелений колір). Після цього за допомогою точок розташованих в області перекриття (на мал. червоного кольору) для кожного об'єднання побудовані квазізнімки 5 і 6 (блакитний колір).



Мал. 1. Стереопара з двох квазізнімків

Переваги такої стереопари полягають у збільшенні площі охоплення зйомкою без додавання нових точок фотографування. Відмінність стереопари квазізнімків від класичної стереопари полягає в тому, що помилки обмірюваних координат – це залежні випадкові величини, що характеризуються коваріаційною матрицею M_{δ} [7], обчисленою для кожного квазізнімка. Матриця враховує випадкову складову вимірів, а також помилки, що виникли в ході визначення кутів взаємного орієнтування знімків при об'єднанні зображень.

Якщо за вимірах квазізімками виконувати побудову або вирівнювання стереопари, то врахування коваріаційної матриці трохи ускладнить організацію обчислень, але загалом не змінить основної обчислювальної схеми методу найменших квадратів. Нехай вирівнювання стереопари з квазізімків виконується методом об'єднання, тоді рівняння колінеарності для лівого знімка матимуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} f \frac{\tilde{a}_1(X_i - X_{s_n}) + \tilde{b}_1(Y_i - Y_{s_n}) + \tilde{c}_1(Z_i - Z_{s_n})}{\tilde{a}_3(X_i - X_{s_n}) + \tilde{b}_3(Y_i - Y_{s_n}) + \tilde{c}_3(Z_i - Z_{s_n})} - \tilde{x}_i &= v_i^x; \\ f \frac{\tilde{a}_2(X_i - X_{s_n}) + \tilde{b}_2(Y_i - Y_{s_n}) + \tilde{c}_2(Z_i - Z_{s_n})}{\tilde{a}_3(X_i - X_{s_n}) + \tilde{b}_3(Y_i - Y_{s_n}) + \tilde{c}_3(Z_i - Z_{s_n})} - \tilde{y}_i &= v_i^y, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де X_i, Y_i, Z_i – геодезичні координати точки i моделі; $X_{s_n}, Y_{s_n}, Z_{s_n}$ – геодезичні координати центра зйомки лівого квазізімка; $\tilde{a}_1, \dots, \tilde{c}_3$ – напрямні косинуси осей лівого квазізімка; v_i^x, v_i^y – поправки в координати \tilde{x}_i, \tilde{y}_i точки i на лівому знімку. У лінійному вигляді рівняння (1) можна подати так:

$$D_i^l \delta R_i + G_i^l \Delta_l + L_i^l = v_i^l, \quad (2)$$

де δR_i – поправки в наближені геодезичні координати точки i ; D_i^l – матриця з відповідних їм часткових похідних; Δ_l – поправки в наближені значення елементів зовнішнього орієнтування лівого квазізімка; G_i^l – матриця з відповідних їм часткових похідних; L_i^l, v_i^l – вектори вільних членів і поправок в координати квазізімка.

Рівняння поправок для всіх обмірюваних точок лівого квазізімка в матричній формі виглядатимуть так:

$$\begin{vmatrix} D_1^l & 0 & \dots & 0 \\ 0 & D_2^l & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & D_t^l \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \delta R_1 \\ \delta R_2 \\ \dots \\ \delta R_t \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} G_1^l \\ G_2^l \\ \dots \\ G_t^l \end{vmatrix} \Delta_l + \begin{vmatrix} L_1^l \\ L_2^l \\ \dots \\ L_t^l \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} v_1^l \\ v_2^l \\ \dots \\ v_t^l \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Уводячи вживані вище позначення, рівняння (3) можна записати компактніше:

$$D_l \delta R + G_l \Delta_l + L_l = V_l \quad (4)$$

Рівняння поправок мають матрицю ваг P_l , що визначається з такого співвідношення:

$$P_l = M_{\delta_l}^{-1}, \quad (5)$$

де M_{δ_l} – матриця, в якій на головній діагоналі знаходяться коваріаційні матриці випадкових похибок візування на точку знімка [7].

Аналогічно записуються рівняння поправок для правого знімка. Тоді загальна система рівнянь поправок матиме вигляд:

$$\begin{vmatrix} D_l \\ D_p \end{vmatrix} \delta R + \begin{vmatrix} G_l & 0 \\ 0 & G_p \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta_l \\ \Delta_p \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} L_l \\ L_p \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} V_l \\ V_p \end{vmatrix}, \quad (6)$$

яка має вагову матрицю

$$P = \begin{vmatrix} M_{\delta_l}^{-1} & 0 \\ 0 & M_{\delta_p}^{-1} \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Вирішуючи систему рівнянь (6) методом найменших квадратів, витримуємо умову

$$\begin{vmatrix} D_l^m P_l D_l + D_p^m P_p D_p & D_l^m P_l G_l & D_p^m P_p G_p \\ G_l^m P_l D_l & G_l^m P_l G_l & 0 \\ G_p^m P_p D_p & 0 & G_p^m P_p G_p \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \delta R \\ \Delta_l \\ \Delta_p \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} D_l^m P_l L_l + D_p^m P_p L_p \\ G_l^m P_l L_l \\ G_p^m P_p L_p \end{vmatrix} = 0. \quad (9)$$

Уводячи у вираз (9) очевидні позначення, можна представити його як

$$w = -N^{-1} \cdot L. \quad (10)$$

З розрахунку, що для кожного знімка визначається шість елементів зовнішнього орієнтування, а для кожної безопорної точки – три просторові координати, загальна кількість невідомих становитиме $6 \cdot 2 + 3 \cdot K$, де K – кількість точок, що визначаються. З умови, що для кожної точки можна скласти чотири рівняння і що на об'єкті зйомки повинно бути як мінімум три опорні точки, кількість рівнянь для рішення (6) складе $4 \cdot n$, де n – кількість точок, обмірюваних на лівому і правому квазізімках.

Математичний апарат формул було випробувано на даних, отриманих в результаті математичного моделювання. Модель будувалася в такий спосіб. З рівнянь колінеарності [8] було отримано об'єднання знімків для двох точок фотографування (3·3=9 знімків у зв'язуванні) з фокусною відстанню 100 мм. При куті

поля зображення одинарного знімка з урахуванням зони перекриття суміжних знімків близько 5 % кут поля зображення квазізнімка становив $\sim 40^\circ$. Кут фотограмметричної засічки на об'єкті дорівнював майже 50° . Далі за методикою об'єднання знімків, виконаних з однієї точки простору, в квазізнімок [6,7] було отримано єдині знімки для кожної точки фотографування. Використовуючи координати на квазізнімках і справжні координати опорних точок, на підставі (1-10) можна встановити точність елементів зовнішнього орієнтування знімків і координат точок, що визначаються. Оскільки обернена матриця нормальних рівнянь (10) є коваріаційною матрицею невідомих, то с.к.п. i - го невідомого може бути обчислена за формулою:

$$m_i = \mu \cdot \sqrt{N_{i,i}^{-1}}, \quad (11)$$

де μ – помилка одиниці ваги визначення координат точки на знімках, як вихідних, так і на квазізнімку. У подальших обчисленнях вона приймалася рівною 5 мкм.

Значення с.к.п. елементів орієнтування квазістереопари, отриманих з формули (11) відображено в табл. 1. Лінійні елементи подаються в мікронах у масштабі знімка.

Таблиця 1. Значення похибок визначення елементів зовнішнього орієнтування

Величина	Лівий знімок	Правий знімок
m_α	26"	27"
m_ω	18"	22"
m_κ	15"	16"
m_X	9 мкм	11 мкм
m_Y	19 мкм	18 мкм
m_Z	8.5 мкм	8 мкм

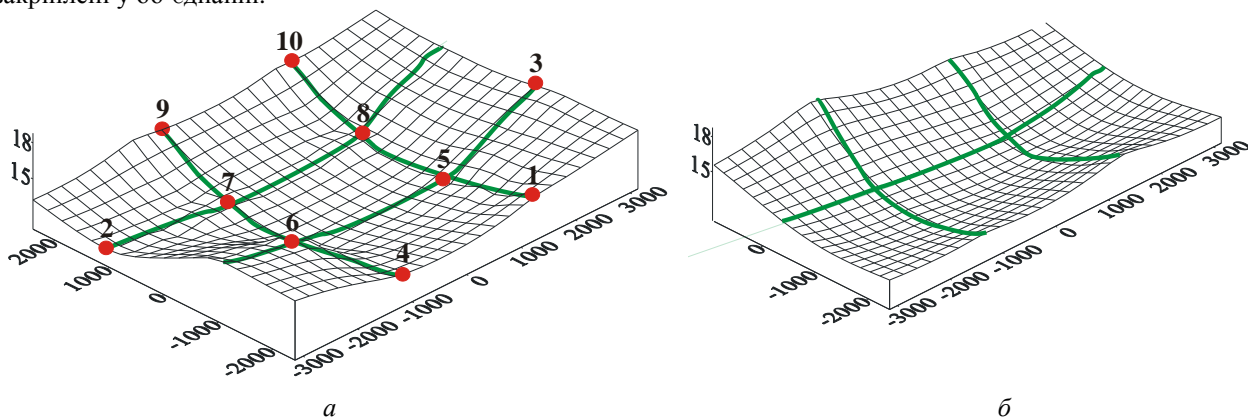
Значення середньоквадратичних похибок визначення координат точок, отриманих у результаті строгих розрахунків, зведено в табл. 2 і поміщено в графі «на основі квазізнімка». Дані представлено в мікронах у масштабі знімка. Для підтвердження правильності обчислень було розраховано значення похибок, отриманих за допомогою чисельного статистичного моделювання вимірів. З дотриманням описаних умов було побудовано сто моделей вимірів – сто стереопар із квазізнімків. До цих моделей було застосовано формули (9), після чого було отримано значення координат точок, що визначаються, які надалі порівнювалися з їх справжніми величинами. Відхилення не перевищувало 14 %, що пояснюється обмеженою кількістю досліджень.

Таблиця 2. Порівняльний аналіз похибок обмірюваних точок

№	Середні квадратичні похибки координат точок об'єкта зйомки (мкм), обчислені					
	на основі квазізнімка			на основі цілоного знімка		
	m_X	m_Z	m_Y	m_X	m_Z	m_Y
1	6,4	5,6	16,5	5,2	4,5	12,9
2	5,4	5,0	12,8	5,0	4,2	10,1
3	6,3	5,8	17,9	6,6	4,7	10,6
4	5,5	4,9	13,4	4,8	4,2	10,7
5	5,7	4,8	12,5	5,0	3,9	9,5
6	5,2	5,2	12,1	4,7	4,5	9,7
7	5,5	4,8	11,9	4,7	3,9	10,1
8	5,0	4,7	12,5	3,9	4,1	9,5
9	5,4	4,6	14,3	4,5	4,0	10,5
10	5,4	4,6	15,9	4,3	3,9	11,6

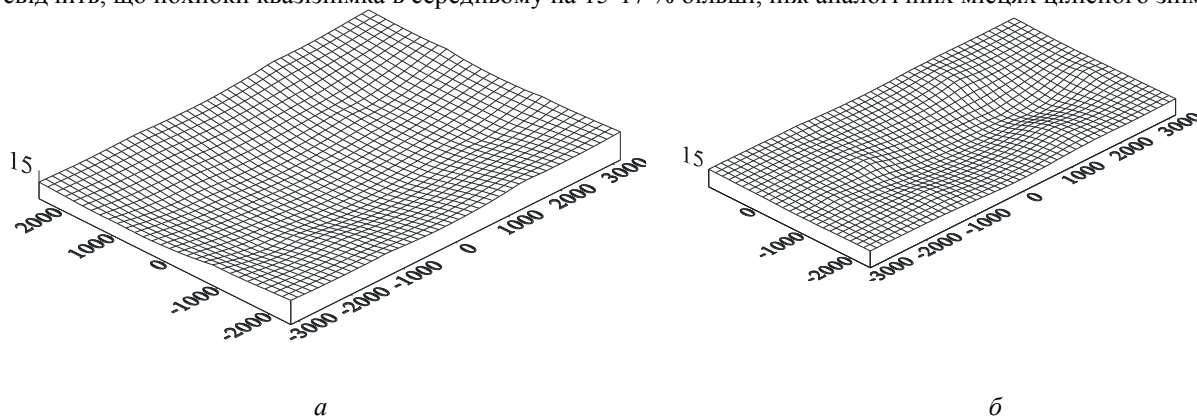
Для наочності представлених у табл. 2 даних на мал. 2 зображено поверхні с.к.п. координат, розрахованих методом найменших квадратів. Поверхні представлені для двох типів об'єднань: 9-ти знімків і 6-ти знімків, і побудовані тільки для похибок відстаней від об'єкта зйомки (по осі Y). Розмір поверхонь по осі X та Z розраховувався на основі розміру одиночного зображення (2560×1920 пкс) з урахуванням області перекриття. Значення похибок, взятих із таблиці під відповідними номерами, показано червоними точками на одній з поверхонь. Зеленими лініями на малюнку показані області рівномірної динаміки розподілу похибок. Представлені поверхні характеризуються похибками визначення елементів взаємного

орієнтування знімків у об'єднанні [7]. За формою і характером розподілу величин вони збігаються з поверхнями похибок на квазізнімку. Отже, кожен пунктирну область на можна розглядати як проекцію похибок окремого знімка із об'єднання. Найменші значення похибок характерні для центрального і прилеглих до нього знімків. Найбільші похибки властиві діагональним знімкам, які менш жорстко закріплені у об'єднанні.



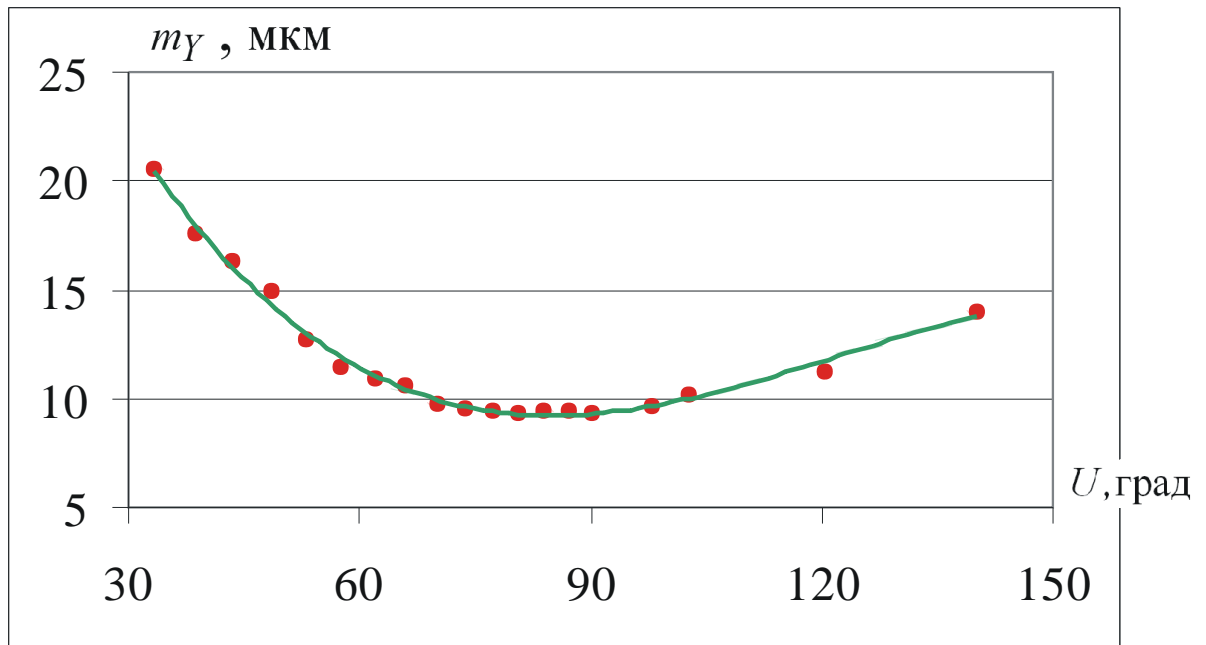
Мал. 2. Поверхні похибок на опорних точках:
a – при 9-ти знімках об'єднання; *б* – при 6-ти знімках об'єднання

Для повного аналізу впливу похибок визначення елементів взаємного орієнтування у об'єднанні знімків на точність отримання координат за квазістереопарою було виконано такі дії. Моделювалася стереопара зі знімків такого ж формату, що й з'єднані квазізнімки. Результати відображено поверхнями на мал. 3, а числові значення зведено у табл. 2 (графу «на основі цілісного знімка»). Порівняння результатів свідчить, що похибки квазізнімка в середньому на 15-17% більші, ніж аналогічних місцях цілісного знімка



Мал. 3. Поверхні похибок на опорних точках для цілісного знімка:
a – аналог з 9-ти знімків; *б* – аналог із 6-ти знімків

Одним з важливих параметрів при фотографуванні стереопарою є кут U фотограмметричної засічки на об'єкті, що знімається (див мал. 1). Ця величина не залежить від кутів нахилу знімків, а характеризується лише величиною базису фотографування і відстанню до об'єкта. Кутом U визначається геометрія виконуваної зйомки і точність визначення елементів взаємного орієнтування. У нашому дослідженні значення кута фотограмметричної засічки змінювалося шляхом зміни розміру базису фотографування квазістереопари при постійній відстані до об'єкта, що знімається. Аналіз було виконано на діапазоні $[34^\circ, 140^\circ]$. Як характеристична величина при куті засічки використовувалася максимальна с.к.п. координати в масштабі знімка по осі Y . Бралася стала кількість точок на всіх стереопарах. З графіка на мал. 4 видно, що в діапазоні $[50^\circ, 120^\circ]$ крива утворює «плоске дно», тобто в даному діапазоні похибки мінімальні. При таких кутах засічки і фокусній відстані 100 мм можна одержувати точність близько 1/10000 відстані. Цієї точності досить для виконання маркшейдерських зйомок на відкритих гірських виробках при відстанях не більше 1 км, що не суперечить вимогам інструкції [5].



Мал. 4. Вплив кута U на точність визначення координат за квазістереопарою

Запропонована технологія побудови й обробки квазізнімків дозволяє наблизити за параметрами фотографування і точністю цифрові зображення до метричних аналогових знімків. Точність одержання координат за квазістереопарою дозволяє використовувати цифрову камеру в наземній фотограмметричній зйомці.

Література

1. Гельман Р.Н., Дуңц А.Л. Лабораторная калибровка камер с большой дисторсией // Геодез. и картогр. – 2002. – № 7. – С. 23-31.
2. Гельман Р.Н., Никитин М.Ю. Панорамный способ обработки наземных стереоснимков // Геодез. и картогр. – 2005. – № 12. – С. 13-17.
3. Добрынин Н.Ф. Аналитический метод обработки серии снимков, полученных с одного базиса фотографирования. – Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1975, № 4, с. 68-74.
4. Дубиновский В.Б. Калибровка снимков. – М.: Недра, 1982. 224 с.
5. Инструкция по производству маркшейдерских работ – М.:Недра, –1987. – 240 с.
6. Луньов А. О., Могильний С .Г. Патент 19565, Україна. Спосіб побудови панорамного фотограмметричного зображення/ заяв. 07.07.2006 р., опубл. 15.12.2006 р., бюл. № 12.
7. Могильний С.Г., Луньов А.О. Теоретичні основи побудови цифрових квазізнімків // Вісник геодезії та картографії. – 2007. – №1. – С. 25-28.
8. Фотограмметрия/ С.Г. Могильный, И.Л. Беликов, Л.И. Ахонина и др. – Киев; Донецк: Вища шк., 1985. – 278 с.