

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ КВАЗІЗНІМКІВ

Застосування цифрових знімальних фотокамер для цілей наземної топографічної зйомки має помітні переваги в порівнянні з плівковими фотоапаратами:

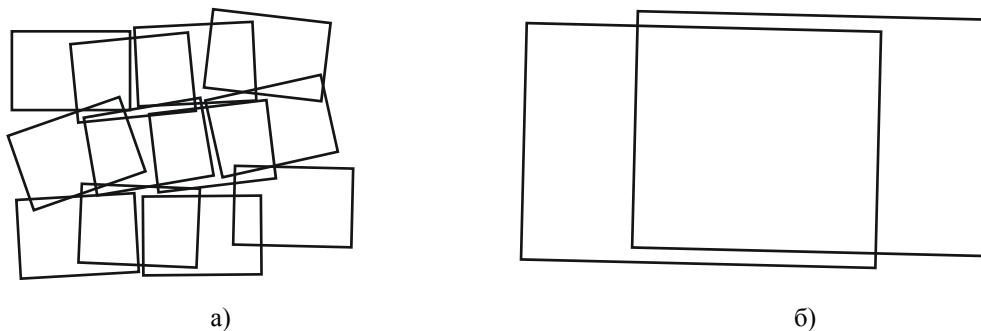
- не потрібно дорогої і примхливої фотоплівки;
- немає трудомісткого й екологічно шкідливого процесу фотохімічної обробки;
- немає необхідності виконувати сканування фотознімків для обробки на ЦФС, а отже, не потрібен дорогий фотограмметричний сканер;
- інформативність цифрових кольорових знімків значно вище, ніж у звичайних, навіть кольорових знімків.

Основним недоліком цифрових фотокамер є малий фізичний розмір матриці сенсорів (CCD матриці) і, отже, малий кут поля зображення (табл. 1). Як видно з таблиці, для представлених професійних і напівпрофесійних камер значення кута поля зображення не перевищує 16°. Збільшення кута поля зображення за рахунок зменшення фокусної відстані об'єктива неефективно, тому що через це різко погіршується роздільна здатність зйомки і значно збільшується вплив дисторсії об'єктиву камери [1-4].

Таблиця 1 – Значення кута поля зображення для різних камер

№ п/п	Найменування фотокамери	Пкс, млн	Макс. фокусна відстань, мм	Кут поля зображення, (°)
1	SONY DSC-R1	10	120	16.5
2	FujiFilm FinePix S9500	9	300	6.7
3	FujiFilm FinePix E900	9	128	15.5
4	Canon PowerShot Pro1	8	200	10
5	Sony DSC-H5 black	7	432	4.6
6	Canon PowerShot S3IS	6	432	4.6
7	FujiFilm FinePix S5600	5	380	5.3
8	Canon PowerShot S2IS	5	432	4.6
9	Olympus E20-P	5	140	14.2

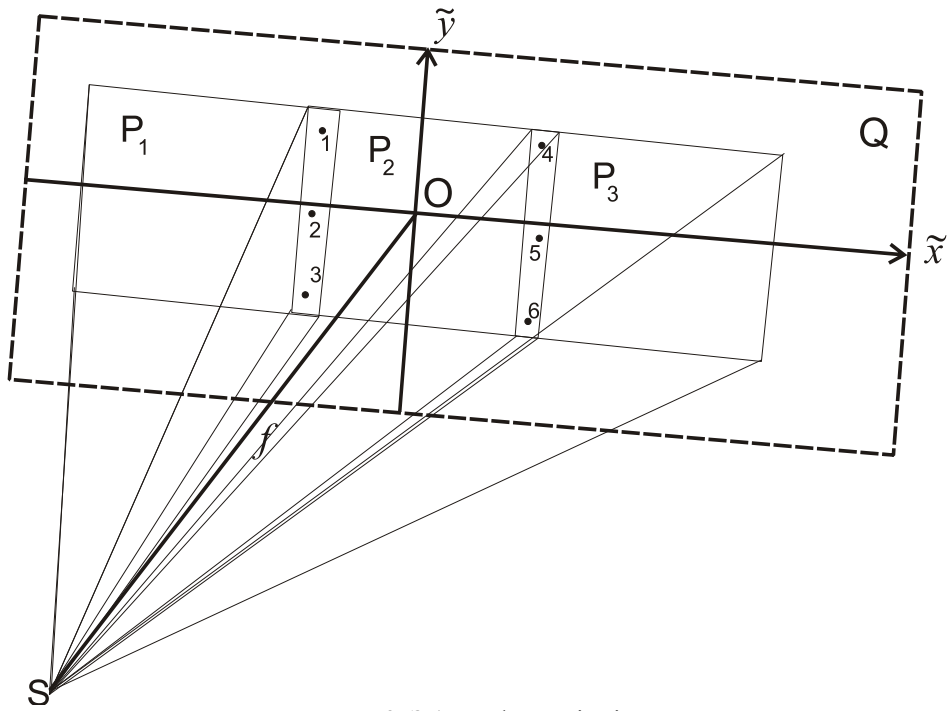
Збільшення параметрів матриці сенсорів до розмірів кадру плівкових камер пов'язано в даний час з технічними труднощами і приведе до високої вартості знімального обладнання. Якби малий кут поля зображення приводив тільки до збільшення числа стереопар, то при продуктивності сучасних цифрових фотограмметричних систем (ЦФС) їхня обробка не представляла б особливих труднощів. Основним негативним фактором є утруднення виконання зйомки таким чином, щоб велике число малих кадрів, виконаних з різних точок простору, забезпечувало правильне перекриття між собою, утворюючи стереопари, що покривають об'єкт зйомки без пропусків і надлишкових перекриттів (мал. 1). У літературі відома пропозиція, як при порівняно невеликій матриці сенсорів забезпечити одержання знімка, що відповідає розмірам кадру традиційної знімальної камери [5].



Мал.1. Зйомка об'єкта матрицями різного формату:

а) малий розмір матриці; б) великий розмір матриці

Однак у роботі [5] передбачається заздалегідь, що матриці сенсорів розташовані в одній площині, тому пропонується розвинути цю ідею для звичайних цифрових камер. Сутність запропонованого методу показана на мал. 2. З описаної нижче ідеї отриманий пріоритет на патент [6].



Мал. 2. Зв'язка фотознімків

Нехай із точки S вузькокутовою камерою виконано три знімки, суміжні знімки мають вузьку область перекриття. Якщо визначити координати точок у зонах перекриття, то, напевно, можна обчислити кутові елементи взаємного орієнтування всіх знімків і по формулах колінарного трансформування спроектувати їх на площину Q. У результаті буде отримано одне зображення, яке можна використовувати як деякий квазізнімок, що має фокусну відстань, еквівалентну вихідним зображенням. Квазізнімки, побудовані для зв'язки вузькокутових знімків, ефективно обробляються на ЦФС. Звичайно, на практиці не вдається забезпечити точний збіг центрів фотографування знімків, однак при достатньому видаленні об'єкта зйомки ця розбіжність не буде мати практичного значення, тому що ця погрішність значно менша роздільної здатності і точності виміру зображення. Забезпечити необхідне перекриття суміжних знімків можна, використовуючи кутові шкали нахилу і повороту, які звичайно є на стандартних фотоштативах.

У загальному випадку квазізнімок може бути довільно розташований щодо знімків зв'язки, але при цьому може виявитися, що його розмір буде дуже великий і незручний для обробки. З геометричних розумінь виходить, що квазізнімок варто розташувати таким чином, щоб розміри проєкцій знімків зв'язки були мінімальні, тобто його головний промінь займав деяке середнє положення серед головних променів вихідних знімків.

Якщо обчислити кути взаємного орієнтування знімків зв'язки і задати положення осей квазізнімка, то проєкція вихідного знімка на площину квазізнімка буде виконуватися по формулах колінарного перетворення:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{x} &= -f \frac{a_1 x + a_2 y + a_3 f}{c_1 x + c_2 y + c_3 f} \\ \tilde{y} &= f \frac{b_1 x + b_2 y + b_3 f}{c_1 x + c_2 y + c_3 f} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де \tilde{x}, \tilde{y} і x, y – координати точки на квазізнімку і вихідному знімку; a_1, a_2, \dots, c_3 – направляючі косинуси знімка; f – фокусна відстань знімків.

Якщо та сама точка k об'єкта відображена на двох різних вихідних знімках, то відповідні координати її зображення на квазізнімку, отримані з двох знімків, збігаються, тобто виконується наступне рівняння:

$$\left. \begin{aligned} f \frac{a_1^{(i)} x_k^{(i)} + a_2^{(i)} y_k^{(i)} + a_3^{(i)} f}{c_1^{(i)} x_k^{(i)} + c_2^{(i)} y_k^{(i)} + c_3^{(i)} f} - f \frac{a_1^{(j)} x_k^{(j)} + a_2^{(j)} y_k^{(j)} + a_3^{(j)} f}{c_1^{(j)} x_k^{(j)} + c_2^{(j)} y_k^{(j)} + c_3^{(j)} f} &= 0 \\ f \frac{b_1^{(i)} x_k^{(i)} + b_2^{(i)} y_k^{(i)} + b_3^{(i)} f}{c_1^{(i)} x_k^{(i)} + c_2^{(i)} y_k^{(i)} + c_3^{(i)} f} - f \frac{b_1^{(j)} x_k^{(j)} + b_2^{(j)} y_k^{(j)} + b_3^{(j)} f}{c_1^{(j)} x_k^{(j)} + c_2^{(j)} y_k^{(j)} + c_3^{(j)} f} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де $x_k^{(i)}, y_k^{(i)}$ і $x_k^{(j)}, y_k^{(j)}$ – координати точки на i -тому і j -тому знімках відповідно; $a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, \dots, c_3^{(i)}$ і $a_1^{(j)}, a_2^{(j)}, \dots, c_3^{(j)}$ – направляючі косинуси відповідно i -того і j -того знімків, обчислені по їхніх кутах повороту щодо осей квазізнімка.

Рівняння (2), складені для всіх пар відповідних точок у зонах перекриття знімків зв'язки, дозволяють визначити взаємне положення знімків і задати напрямки осей квазізнімка. Оскільки невідомі кути орієнтування невеликі, то для рішення системи (2) припустимо застосування методу лінеаризації навколо наближених значень невідомих. Тоді для точки k на знімках i і j рівняння (2) у лінійній формі буде мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} a_{\alpha_i}^{(k)} \delta_{\alpha_i} + a_{\omega_i}^{(k)} \delta_{\omega_i} + a_{\kappa_i}^{(k)} \delta_{\kappa_i} - a_{\alpha_j}^{(k)} \delta_{\alpha_j} - a_{\omega_j}^{(k)} \delta_{\omega_j} - a_{\kappa_j}^{(k)} \delta_{\kappa_j} + \\ c_{x_{k,i}}^{(k)} v_{x_{k,i}} + c_{y_{k,i}}^{(k)} v_{y_{k,i}} - c_{x_{k,j}}^{(k)} v_{x_{k,j}} - c_{y_{k,j}}^{(k)} v_{y_{k,j}} + l_{x_{i,j}}^{(k)} = 0 \\ b_{\alpha_i}^{(k)} \delta_{\alpha_i} + b_{\omega_i}^{(k)} \delta_{\omega_i} + b_{\kappa_i}^{(k)} \delta_{\kappa_i} - b_{\alpha_j}^{(k)} \delta_{\alpha_j} - b_{\omega_j}^{(k)} \delta_{\omega_j} - b_{\kappa_j}^{(k)} \delta_{\kappa_j} + \\ d_{x_{k,i}}^{(k)} v_{x_{k,i}} + d_{y_{k,i}}^{(k)} v_{y_{k,i}} - d_{x_{k,j}}^{(k)} v_{x_{k,j}} - d_{y_{k,j}}^{(k)} v_{y_{k,j}} + l_{y_{i,j}}^{(k)} = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

які в матричній формі запишемо в наступному вигляді:

$$A_{i,j}^{(k)} \delta_{i,j} + C_{i,j}^{(k)} v_{i,j}^{(k)} + l_{i,j}^{(k)} = 0, \quad (4)$$

де $A_{i,j}^{(k)}$ – матриця з часткових похідних від лівої частини рівняння (2) для точки k по невідомим кутах орієнтування знімків i і j ; $C_{i,j}^{(k)}$ – матриця з часткових похідних від лівої частини рівняння (2) для точки k по її обмірюваних координатах на знімках i і j ; $v_{i,j}^{(k)}$ – вектор-стовпець поправок в обмірювані координати точки k на знімках i і j ; $\delta_{i,j}$ – вектор стовпець поправок у наближені кути орієнтування знімків i і j ; $l_{i,j}^{(k)}$ – вектор-стовпець вільних членів рівнянь (2), обчислених по наближених кутах орієнтування й обмірюваних координат точки k .

Власне кажучи, рівняння (3) є умовними рівняннями, але більш складної форми, тому що в них, крім поправок у виміри, отримуються поправки в параметри, тобто має місце комбінований метод зрівнювання – корелатний з параметрами. Для того щоб перевести задачу зрівнювання в параметричний метод, представимо рівняння (4) у такій формі:

$$A_{i,j}^{(k)} \delta_{i,j} + l_{i,j}^{(k)} = \check{v}_{i,j}^{(k)}, \quad (5)$$

де $\check{v}_{i,j}^{(k)}$ – вектор-стовпець комплексних поправок, що обчислюються по формулі:

$$\check{v}_{i,j}^{(k)} = C_{i,j}^{(k)} v_{i,j}^{(k)}. \quad (6)$$

Якщо для точки k зібрати разом усі рівняння виду (5), то одержимо наступну систему параметричних рівнянь:

$$A^{(k)} \Delta + l^{(k)} = \check{v}^{(k)}, \quad (7)$$

де Δ – вектор-стовпець поправок у кутові елементи орієнтування знімків; $A^{(k)}$ – матриця часткових похідних, складена з елементів матриць $A_{i,j}^{(k)}$ і доповнена нульовими коефіцієнтами так, щоб число стовпців відповідало розмірності вектора поправок Δ ; $\check{v}^{(k)}$ – вектор-стовпець комплексних поправок, що обчислюються по формулі, аналогічній формулі (6):

$$\check{v}^{(k)} = C^{(k)} v^{(k)}. \quad (8)$$

Зрозуміло, що комплексні поправки залежні одна від одної і при зрівнюванні необхідно використовувати узагальнений метод найменших квадратів, тому обчислимо M_k коваріаційну матрицю комплексних поправок $\check{v}^{(k)}$ по формулі:

$$M_k = C_k M_{x,y} C_k^T, \quad (9)$$

де $M_{x,y}$ – коваріаційна матриця вимірюваних координат точок безпосередньо на вихідних знімках.

Нормальні рівняння для рівнянь (7) відповідно до узагальненого принципу найменших квадратів будуть мати вигляд:

$$A^{(k)T} M_k^{-1} A^{(k)} \Delta - A^{(k)T} M_k^{-1} l^{(k)} = 0 \quad (10)$$

і, використовуючи очевидні позначення, одержимо:

$$N_k \Delta + L_k = 0. \quad (11)$$

Підсумовуючи рівняння (11), складені для всіх обмірюваних у зонах перекриття точок, одержимо загальні нормальні рівняння поправок у невідомі параметри:

$$N \Delta + L = 0 \quad (12)$$

Матриця коефіцієнтів системи рівнянь (12) має ранг менше, ніж число невідомих, тому рішення неоднозначне. Необхідно з усіх можливих рішень вибрати одне, досить стійке й однозначне. Таким рішенням може служити вектор $\bar{\Delta}$, що задовольняє рівнянню (12) і має мінімальний модуль, а саме

$$\bar{\Delta}^T \bar{\Delta} = \min. \quad (13)$$

Необхідне рішення можна одержати методом регуляризації рівняння (12) по Тихонову [7] з наступного співвідношення:

$$\bar{\Delta} = -(N + \epsilon E)^{-1} L, \quad (14)$$

де ϵ – регуляризуючий множник; E – одинична матриця.

Якби вихідна система рівнянь (2) була лінійною, то формула (13) була б шуканим рішенням, але вектор $\bar{\Delta}$ мінімізує тільки поправки до елементів орієнтування знімки щодо осей квазізнімка, а не самі кути повороту. Тому необхідно до рівнянь (2) сформулювати додатково умови оптимального розташування осей квазізнімка щодо вихідних зніmkів. Одним з варіантів додаткової умови може служити співвідношення:

$$\left[\alpha^2 + \omega^2 + \kappa^2 \right] = \min, \quad (15)$$

де α, ω, κ – кути орієнтування зніmkів зв'язки щодо осей квазізнімка. Для задоволення цієї умови необхідно на кожній ітерації після виправлення кутів на поправки, обчислені по формулі (14), визначати нові початкові значення, наприклад, для кутів α_i по формулі:

$$\alpha_i = \alpha'_i - \frac{[\alpha']}{n}, \quad (16)$$

де α'_i – кут, обчислений по виправленій матриці направляючих косинусів знімка i ; n – число зніmkів у зв'язці. Аналогічним способом обчислюються інші кути. Ітерації швидко сходяться й однозначно визначають положення квазізнімка в зв'язці.

Для визначення остаточних кутів орієнтування необхідно один зі зніmkів визначити як початковий і прийняти відомими його кути орієнтування, що отримані по формулі (16) в останній ітерації, а для інших зніmkів скласти рівняння (2) і вирішити їх методом найменших квадратів по формулах (3) – (14).

Регуляризуючий множник ϵ можна приймати рівним нулю, тому що в цьому випадку ранг матриці рівнянь дорівнює числу невідомих.

Використовуючи обчислені кути орієнтування, по формулах (1) методом непрямого трансформування обчислюється цифрове зображення квазізнімка. Для зон перекриття зніmkів колір зображення приймається по тому пікселу, що ближче знаходиться до головної точки вихідного знімка.

Зрозуміло, що квазізнімок буде мати додаткові геометричні погрішності, що викликаються помилками обчислених кутів орієнтування, тому координати зображення, вимірювані на квазізнімку варто розглядати як корельовані виміри і враховувати їхню кореляцію при точному зрівнюванні стереопари, побудованої по квазізнімкам. Для врахування кореляції вимірів відповідно до властивості транзитивності методу найменших квадратів необхідно мати їх коваріаційну матрицю.

Якщо прийняти, що координати x_i, y_i точки i на квазізнімку обчислюються по формулах, аналогічних формулі (1):

$$\left. \begin{aligned} x_i &= -f \frac{a_1^{(j)} x_i + a_2^{(j)} y_i + a_3^{(j)} f}{c_1^{(j)} x_i + c_2^{(j)} y_i + c_3^{(j)} f} \\ y_i &= f \frac{b_1^{(j)} x_i + b_2^{(j)} y_i + b_3^{(j)} f}{c_1^{(j)} x_i + c_2^{(j)} y_i + c_3^{(j)} f} \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

де $a_1^{(j)}, a_2^{(j)}, \dots, c_3^{(j)}$ – направляючі косинуси знімка j , на якому розміщується прообраз точки i квазізнімка; x_i, y_i – координати прообразу точки i .

Тоді помилки $\delta x_i, \delta y_i$ вимірюваних на квазізнімку координат x_i, y_i довільної точки i обчислюються як диференціал правої частини рівнянь (17):

$$\left. \begin{aligned} \delta x_i &= a_{\alpha_j}^{(i)} \delta \alpha_j + a_{\omega_j}^{(i)} \delta \omega_j + a_{\kappa_j}^{(i)} \delta \kappa_j + \epsilon_x \\ \delta y_i &= b_{\alpha_j}^{(i)} \delta \alpha_j + b_{\omega_j}^{(i)} \delta \omega_j + b_{\kappa_j}^{(i)} \delta \kappa_j + \epsilon_y \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

де ϵ_x, ϵ_y – випадкові помилки візування на точку квазізнімка; $\delta \alpha_j, \delta \omega_j, \delta \kappa_j$ – дійсні помилки кутів орієнтування знімка j . Координати x_i, y_i прообразу точки i обчислюються по формулах, зворотних (17):

$$\left. \begin{aligned} x_i &= -f \frac{a_1^{(j)}x_i + b_1^{(j)}y_i + c_1^{(j)}f}{a_3^{(j)}x_i + b_3^{(j)}y_i + c_3^{(j)}f} \\ y_i &= f \frac{a_2^{(j)}x_i + b_2^{(j)}y_i + c_2^{(j)}f}{a_3^{(j)}x_i + b_3^{(j)}y_i + c_3^{(j)}f} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Часткові похідні $a_{\alpha_j}^{(i)}, a_{\omega_j}^{(i)}, \dots, b_{\kappa_j}^{(i)}$ від рівнянь (17) у формулі (18) обчислюються з використанням координат x_i, y_i .

У матричній формі рівняння (18) можна записати у вигляді:

$$\delta_i = A_i \Delta_j + \varepsilon_i, \quad (20)$$

де δ_i – вектор дійсних помилок координат точки i квазізнімка; A_i – матриця з часткових похідних у рівняннях (18); Δ_j – вектор дійсних помилок кутів орієнтування знімка j ; ε_i – вектор випадкових помилок виміру координат на квазізнімці. Тоді коваріаційна матриця M_{δ_i} вектора δ_i повинна обчислюватися за наступною формулою:

$$M_{\delta_i} = M_{x,y} + A_i Q_j A_i^T, \quad (21)$$

де $M_{x,y}$ – коваріаційна матриця випадкових помилок візування на точку знімка; Q_j – коваріаційна матриця вектора дійсних помилок Δ_j кутів знімка, що є субматрицею, що відповідає знімкові j у зворотній матриці N^{-1} нормальних рівнянь (14).

Формулу (20) зручніше записати в більш загальній формі:

$$\delta_i = \bar{A}_i \Delta + \varepsilon_i, \quad (22)$$

де \bar{A}_i – матриця A_i , доповнена нулями до розмірності вектора Δ , де на j -тім місці розташовується матриця A_i , тобто

$$\bar{A}_i = |0 \ 0 \ \dots \ A_i \ \dots 0|. \quad (23)$$

а формула (21) набуває вигляду:

$$M_{\delta_i} = M_{x,y} + \bar{A}_i N^{-1} \bar{A}_i^T. \quad (24)$$

Якщо на квазізнімку вимірювано t точок, коваріаційна матриця M_{δ} вектора δ помилок їхніх координат обчислюється за наступною формулою:

$$M_{\delta} = M + AN^{-1}A^T, \quad (25)$$

де M – квазідіагональна матриця, у якій на головній діагоналі розташовані матриці $M_{x,y}$; A – матриця складена з субматриць \bar{A}_i виду (23).

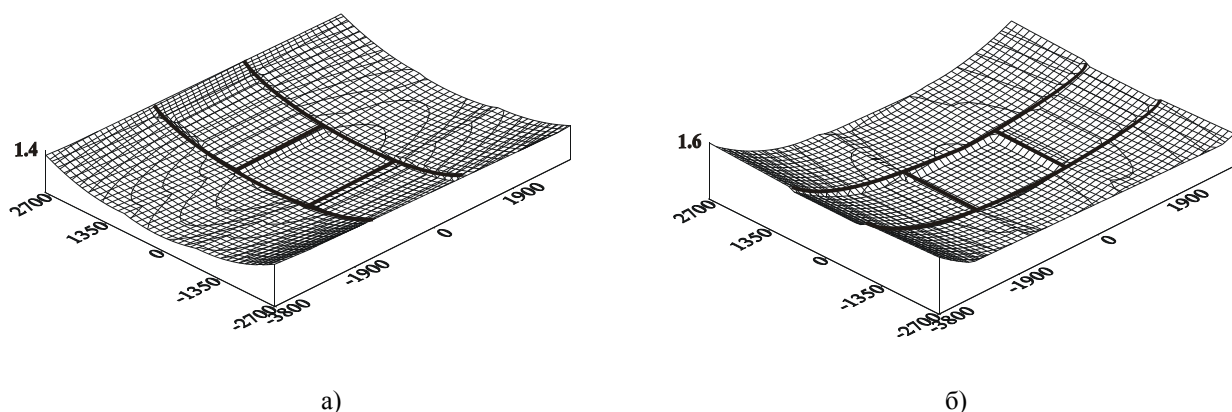
Практичне дослідження представленого математичного апарату виконувалось методом моделювання зйомки тестового полігону. На підставі відомих координат тестового полігону й елементів внутрішнього і зовнішнього орієнтування знімків зв'язки розраховувалися значення координат на них. Отримані макетні знімки розглядалися як результати вимірів реальних знімків з невідомими елементами їх взаємного і зв'язці орієнтування. Моделювалася 5-мегапіксельна камера з кутом поля зображення близько 14° . Зв'язка знімків на точці фотографування обчислювалася для дев'яти знімків (3×3 шт). Смуга перекриття суміжних знімків складала не більш 10%. Було виконано два експерименти, що відрізнялися кількістю точок у смузі перекриття: 1) по 3 точки; 2) по 6 точок.

Значення помилок, спричинених помилками рішення задачі взаємного орієнтування знімків у зв'язці, розраховувалось по формулі (25). Розрахунок виконувався за умови, що точність наведення на точку для сучасних фотограмметричних станцій складає не більш 0.5 пкс. Значення помилок представлені в пікселях по двох осях отриманих квазізнімків мал. 3 і 4.

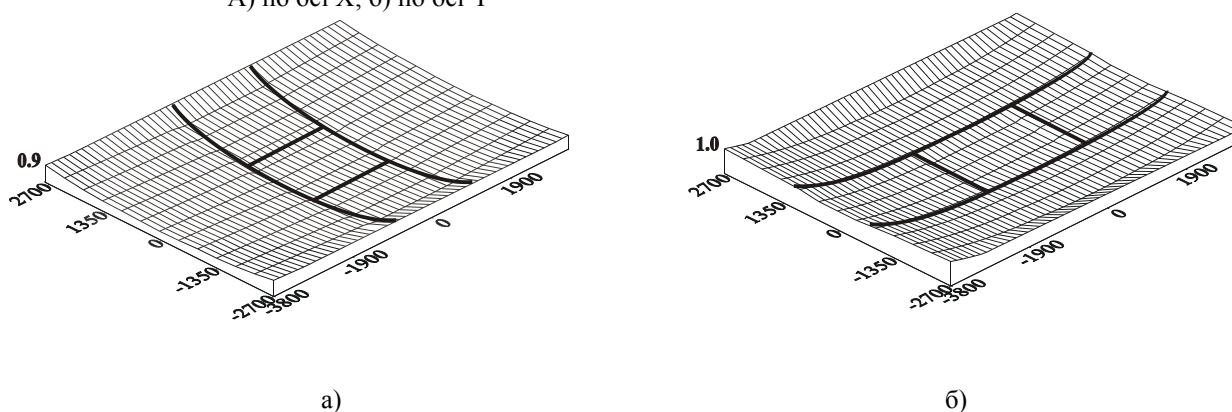
Як видно з малюнків, помилки збільшуються при віддаленні від осей квазізнімка. На всіх знімках є області найменших помилок (показані жирною лінією), що формуються за рахунок того, що ці знімки найбільш надійно «зафіксовані» у зв'язці, тобто вони мають смугу перекриття з трьох сторін, на відміну від кутових знімків. Незалежно від кількості вимірюваних точок для будь-якого квазізнімка формується так зване плоске дно, де значення помилок рівні 0.5 пікселя, тобто точності наведення на поточну точку. Це знімок з найменшою сумою кутів нахилу. Так як що цей знімок не трансформується в процесі обробки (інші знімки приєднуються до нього), то і помилки на ньому не залежать від точності рішення задачі взаємного орієнтування. Для обраної моделі - 3×3 знімки – таким є центральний знімок.

Значення максимальних помилок, викликаних неточністю рішення задачі взаємного орієнтування знімків у зв'язці, зменшується при більшій кількості точок у смугах перекриття. Помилка величиною не

більше одного пікселя говорить про придатність використання таких зображень для одержання по них метричної інформації надалі.



Мал. 3. Значення помилок на квазізнімку (3 точки в смузі перекриття):
А) по осі X; б) по осі Y



Мал. 4. Значення помилок на квазізнімку (6 точок у смузі перекриття):
А) по осі X; б) по осі Y

Математичний апарат при роботі зі стереопарою з квазізнімків і точність геодезичних координат точок об'єкта, що знімається, будуть розглянуті в наступній статті.

Список літератури

1. Гельман Р.Н., Дунц А.Л., Лабораторная калибровка камер с большой дисторсией // Геодезия и картография. -2002. - № 7. С. 23-31.
2. Лунев А.А., Выбор оптимальных параметров калибровки цифровой камеры // Наукові праці Донецького Національного Технічного Університету, Серія: гірничо-геологічна. – Донецьк, 2005.
3. Z. Zhang. A Flexible New Technique for Camera Calibration. Technical Report MSRTR- 98-71, Microsoft Research, December 1998. Available together with the software at <http://research.microsoft.com/~zhang/Calib/>
4. Дубиновский В.Б. Калибровка снимков. М., Недра, 1982, 224с.
5. Wester- Ebbinghaus. Opto-elektrische Festkoerper-Flaechensensoren im photogrammetrisgen Abbildungssystem. // Bildmessung und Luftbildwesen 52 (1984), Heft 6.,S. 297-301.
6. Луньов А.О., Могильний С.Г. Спосіб побудови панорамного фотограмметричного зображення - пріоритет на патент № а 2006 07598 від 07.07.2006.
7. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. Изд. 2-е. – М.: Наука, 1979. – 288 с.