

spherical targets is possible for shorter distances (up to 150-200 m). Obviously, that using TLS with better resolution, the distance for minimal points set will increase pro rata.

Key words: *terrestrial laser scanning, scanners calibration, spherical targets, cylindrical targets, plane-based targets, test calibration objects.*

Надійшла до редакції

05.04.2018

УДК 517

О.М. Гончерюк, аспірант кафедри інженерної геодезії
Київський національний університет будівництва і архітектури

МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ПОПЕРЕДНЬОГО РОЗРАХУНКУ ТОЧНОСТІ ФОТОГРАММЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ, СТВОРЕНИХ ЗА ДАНИМИ LOW-COST ФОТОГРАММЕТРІЇ

У роботі наведено методику виконання попереднього розрахунку точності фотограмметричних вимірювань з використанням цифрових камер, якими обладнані сучасні смартфони. Розглянуто основні аналітичні залежності цифрової фотограмметрії для прямої фотограмметричної засічки. Виконано аналіз основних джерел похибок цифрових неметричних камер. Розглянуто питання розрахунку точності вимірювань на цифровому знімку з врахуванням похибок дискретизації цифрового зображення, наведення, роздільної здатності та розфокусування. Для розрахунків були використані типові параметри цифрових камер сучасних смартфонів. Використовуючи отримані сумарні похибки, виконано розрахунок точності створення фотограмметричних моделей за формулами прямої фотограмметричної засічки. Наведено вирази для розрахунку впливу похибок кутових елементів знімків та похибок координат центрів фотографування. Виконано попередній розрахунок точності для екстремальних значень кутів розвороту цифрових знімків. Результати розрахунку дозволяють зробити висновки, що за найбільш несприятливих умов камери сучасних смартфонів дають змогу створювати тривимірні моделі з просторовою точністю, не гіршою за 5 см, для відстаней до 20 метрів для конвергентного знімання. Встановлено, що підвищити точність визначення координат можна шляхом підбору вдалої геометрії фотографування та використання кодових марок для орієнтування знімків.

Ключові слова: цифрова фотограмметрія, неметрична камера, low-cost фотограмметрія, попередній розрахунок точності, пряма фотограмметрична засічка.

Вступ. Завданням цифрової фотограмметрії є вирішення завдань геодезії засобами фотограмметрії на базі використання цифрових технологій. На відміну від класичної інженерної (прикладної) фотограмметрії в інженерній цифровій

фотограмметрії засобами отримання інформації є не аналогові фототеодоліти або плівкові камери, а цифрові камери будь-якого класу (від цифрових камер мобільних телефонів до професійних цифрових камер вищого класу) або фототахеометри. З моменту появи цифрових технологій їх застосування у завданнях фотограмметрії значно розширило можливості останньої. З'явилась можливість в режимі реального часу контролювати якість отриманих фотографічних матеріалів, відпала потреба у фотохімічному процесі, а оперативність оброблення даних зросла в рази. Цифрові технології зумовили появу абсолютно нових типів вихідної продукції, таких як цифрові ортофотоплани, цифрові тривимірні моделі об'єктів та тривимірні моделі об'єктів з реальною текстурою. Зайве нагадувати, що всі ці типи продукції без проблем інтегруються безпосередньо до систем автоматизованого проектування та геоінформаційних систем для подальшого оброблення, проектування та створення комплексної інформаційної продукції більш високого рівня.

Прогрес у сфері цифрових технологій сприяв появі окремого напрямку цифрової фотограмметрії, що дістав назву low-cost фотограмметрії. Засоби отримання зображень low-cost фотограмметрії не мають безпосереднього відношення до фотограмметрії, скоріше це спроба адаптувати технології однієї галузі до іншої. Загалом як джерело інформації low-cost фотограмметрія використовує цифрові зображення, отримані зі смартфонів і планшетів для вирішення сучасних завдань фотограмметрії. У такій ситуації питання точності кінцевого продукту залишається відкритим. Особливо актуальним є питання попереднього розрахунку, оскільки технології low-cost фотограмметрії постійно змінюються через удосконалення фотографічних і навігаційних сенсорів у смартфонах і планшетах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Якщо розглядати питання попереднього розрахунку точності загалом, то вперше детальне дослідження точності саме прикладної фотограмметрії було виконане в роботах проф. В.М. Сердюкова [6; 7]. У цих роботах виконано детальний аналіз точності фотограмметричних вимірювань для випадку використання фототеодолітів. Аналогічні дослідження наведено в роботах [4; 5], у яких значну увагу приділено саме точності фотограмметричних робіт при вирішенні інженерних завдань. Водночас вперше проаналізовано можливості неметричних плівкових камер для виконання інженерних завдань. Додатково слід відмітити роботу [8], в якій питання розглянуто на основі системного підходу. Аналіз у всіх згаданих роботах можна віднести до категорії аналізу аналогових даних. Аналітичний підхід до точності з використанням строгих математичних моделей наведено в роботі [9]. Цілком зрозуміло, що характер та закони виникнення і розподілу похибок для цифрових зображень будуть іншими. Достатньо детальний аналіз таких похибок наведено у працях [1-3]. Тож питання адаптування відомих методик попереднього розрахунку точності з огляду на особливості цифрових неметричних зображень є вкрай актуальним.

Мета роботи. Метою роботи є розроблення методики виконання попереднього розрахунку точності фотограмметричних моделей, створених за даними low-cost фотограмметрії.

Виклад основного матеріалу. Перш за все наведемо основні математичні залежності, що будуть у подальшому використані для попереднього розрахунку точності. Для вимірювання координат на знімку використовують або цифрову систему координат, або систему координат знімка. У подальших обчисленнях в будь-якому випадку використовують фотокоординати в системі координат знімка. Зв'язок між цифровою системою координат і системою координат знімка представлено на рис. 1.

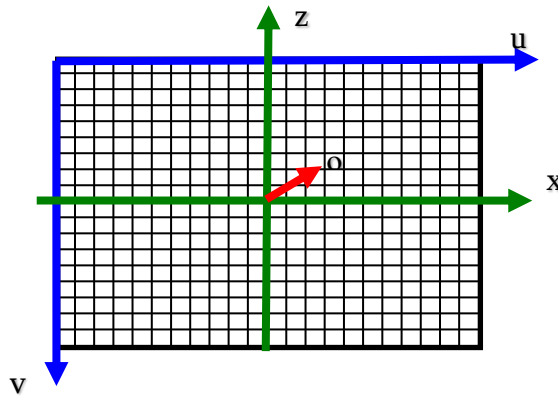


Рис. 1. Зв'язок між системами координат на знімку

Аналітично зв'язок між пікельною системою координат і знімка представляють виразами:

$$x = \left(u - \frac{n_u}{2} \right) \cdot p_x + x_0, \quad z = \left(\frac{n_v}{2} - v \right) \cdot p_z + z_0, \quad (1)$$

де n_u - кількість стовпчиків; n_v - кількість рядків; x_0, z_0 - координати головної точки; x, u, z, v - координати точки в системі координат знімка і пікельній системі відповідно, p_x, p_z - розмір пікселя.

Координати точки Р визначають за формулами прямої фотограмметричної засічки [9]:

$$X_P = X_{S_L} + N r_l^X; \quad Y_P = Y_{S_L} + N r_l^Y; \quad Z_P = Z_{S_L} + N r_l^Z; \quad N = \frac{B_x r_r^Y - B_y r_r^X}{r_l^X r_r^Y - r_l^Y r_r^X}. \quad (2)$$

Визначають координати безпосередньо за координатами центрів фотографування у разі використання цифрових неметричних камер за формулами [9]:

$$X_P = X_{S_L} + N r_l^X; \quad Y_P = Y_{S_L} + N r_l^Y; \quad Z_P = Z_{S_L} + N r_l^Z$$

$$N = \frac{(X_{S_R} - X_{S_L}) r_r^Y - (Y_{S_R} - Y_{S_L}) r_r^X}{r_l^X r_r^Y - r_l^Y r_r^X} \quad (3)$$

У виразах (2) і (3) значення векторів попередньо трансформовані за кутами зовнішнього орієнтування:

$$r_l = A_L r; \quad r_r = A_R r'. \quad (4)$$

Ці вирази містять такі позначення:

$r_l = (x \quad f \quad z)^T$; $r_r = (x' \quad f \quad z')^T$ - виміряні координати точки на лівому і правому знімках; $A = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}$ - матриця напрямних косинусів;

$a_1 = \cos \alpha \cos \kappa - \sin \alpha \sin \omega \sin \kappa$; $a_2 = \sin \alpha \cos \omega$; $a_3 = -\cos \alpha \sin \kappa - \sin \alpha \sin \omega \cos \kappa$;
 $b_1 = -\sin \alpha \cos \kappa - \cos \alpha \sin \omega \sin \kappa$; $b_2 = \cos \alpha \cos \omega$; $b_3 = \sin \alpha \sin \kappa - \cos \alpha \sin \omega \cos \kappa$;
 $c_1 = \cos \omega \sin \kappa$; $c_2 = \sin \omega$; $c_3 = \cos \omega \cos \kappa$ - напрямні косинуси.

Наведені вирази дають змогу обчислити координати точок в будь-якій системі координат за будь-якого методу фотографування. Ці вирази використаємо для отримання виразів для попереднього розрахунку точності.

За цими виразами неможливо визначити окремо вплив кожної складової на повну точність. В такому разі найбільш вдалим є використання формул прямої фотограмметричної засічки і від них перехід до середніх квадратичних похибок.

Точність визначення координат залежить насамперед від точності вимірювання координат точок на знімку. При цьому до точності вимірювання входять похибки дисторсії об'єктива, роздільної здатності, розфокусування, дискретизації та інші. Тому необхідним є моделювання похибок вимірювання координат точок на знімку. Мета моделювання похибок вимірювання цифрового зображення – встановлення можливості використання недорогої цифрової знімальної апаратури. Можливість використання камер сучасних смартфонів і планшетів зумовлена декількома важливими факторами:

- невеликі відстані, на яких виконується знімання (практично не перевищують 30 метрів);
- виконанням калібрування параметрів внутрішнього орієнтування під час виконання робіт завдяки використанню самокалібрування.

Для виконання точного знімання необхідно врахувати всі похибки, що впливають на його точність. Розглянемо основні похибки знімання, викликані недосконалою фотографічною апаратурою.

Перш за все відмітимо, що цифрові зображення місцевості [1], отримані під час знімання, мають особливості, які визначаються дискретно-чарунковою структурою. Як зазначено в роботі [3], координати точкового об'єкта на цифровому зображенні – це рівномірно розміщені в середині чотирьох сусідніх пікселів випадкові величини, що мають СКП відповідно до [1]:

$$m_x = k/\sqrt{3}; \quad m_z = l/\sqrt{3}, \quad (5)$$

де k і l – розміри пікселя.

Очевидно, що СКП визначення координат точкового об'єкта на цифровому знімку, зумовлена впливом дискретизації, залежить тільки від розмірів пікселя. Похибка визначення взаємного місцеположення залежить від розміру пікселя і його форми, напрямку на знімку та величини відстані між точками. За квадратного пікселя точність лінійно залежить тільки від розмірів пікселя і подається такою залежністю:

$$m_{xz} = \frac{2}{3} m. \quad (6)$$

За умови, що після орієнтування знімків вони можуть бути трансформовані до нормального випадку знімання, з'являється можливість високоточного стереоскопічного вимірювання координат точок на знімках. Стереоскопічне візування супроводжується неминучими випадковими та систематичними похибками, які зумовлені вимірювальним пристроєм, знімками, спостерігачем та типом об'єкта. Якість і детальність зображення цифрового дискретного знімка визначається розміром пікселя. В роботі [3] вказано, що точність стереоскопічного візування залежить від таких факторів: похибка стереоскопічного наведення та похибка дискретного пересування марки-курсору.

Вважають, що спостерігач сприймає несуміщення вимірювальної марки з поверхнею стереомоделі, якщо воно перевищує поріг стереосприйняття глибини. Та якщо прийняти, що випадкові похибки стереоскопічного наведення маркою на модель зумовлені гостротою стереозору, підпорядковуються нормальному розподілу, то похибка визначається формулою [3]:

$$m_n = \frac{1}{3} L_d v_s k \frac{pix_c}{pix_d}, \quad (7)$$

де pix_c - розмір пікселя на знімку; pix_d - розмір пікселя монітора; v_s - гострота стереозору в радіанах (30"); L_d - відстань спостереження зображень на моніторі в 2-3 рази більша за відстань найкращого зору; k - коефіцієнт збільшення сприйняття глибини внаслідок спостереження на миготливому моніторі.

Похибку, зумовлену дискретним пересуванням марки-курсору у теоретичних розрахунках приймають рівною половині похибки вимірювання координат точкового об'єкта на знімку:

$$m_o = 0,5 \cdot k(l)/\sqrt{3}. \quad (8)$$

У табл. 1 наведемо основні, на наш погляд, типи цифрових камер сучасних смартфонів.

Таблиця 1

Параметри цифрових камер

Камера	Розмір пікселя, мкм	Фокусна відстань, мм	Матриця	Фізичний розмір матриці, мм	Відносний отвір об'єктива D/f
камера 1	1,12	5	4208x3802	4,71x4,26	1:2,0
камера 2	1,25	4	4208x3802	5,26x4,75	1:1,4
камера 3	1,3	4	4208x3120	5,47x4,06	1:2,2
камера 4	1,4	3	4032x3024	5,64x4,23	1:1,8

Певною мірою наведені характеристики є дещо умовними, але вони дають загальне уявлення про основні параметри цифрових камер та дають змогу виконати розрахунок точності вимірювань.

Дослідимо похибки вимірювання координат, зумовлені перш за все особливостями цифрових камер. Всі джерела похибок вимірювання координат на знімку можна розділити на чотири групи: похибки геометричного спотворення

зображення, похибки дискретизації зображення, похибки розфокусування, похибки роздільної здатності.

Похибки вимірювання координат точок для названих камер, викликані впливом дискретизації зображень, а також похибки вимірювання взаємного положення точок представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Похибки вимірювання координат точок, викликані впливом дискретизації зображень

Камера	m_x, m_z , мкм	m_{xz} , мкм
камера 1	0,65	0,75
камера 2	0,72	0,83
камера 3	0,75	0,87
камера 4	0,81	0,93

Похибка стереоскопічного наведення є іншою складовою дискретизації вимірювання й особливо впливає на якість вимірювання відстані до об'єкта. Для обчислення цієї похибки візьмемо вихідні дані: розмір пікселя монітора - 72; гострота стереозору в радіанах - 30"; відстань спостереження зображень на моніторі – 625 мм; коефіцієнт збільшення сприйняття глибини внаслідок спостереження на миготливому моніторі – найчастіше беруть 1,4 (табл. 3).

Таблиця 3

Похибка стереоскопічного наведення

Камера	m_s , мкм
камера 1	0,66
камера 2	0,74
камера 3	0,76
камера 4	0,82

Похибку, зумовлену дискретним пересуванням марки-курсору (табл. 4) отримаємо з табл. 2, прийнявши, що похибка зумовлена дискретним пересуванням марки-курсору, в теоретичних розрахунках беруть рівною половині похибки вимірювання координат точкового об'єкта на знімку.

Таблиця 4

Похибка, зумовлена дискретним пересуванням марки-курсору

Камера	m_m , мкм
камера 1	0,32
камера 2	0,36
камера 3	0,38
камера 4	0,40

Сумарні похибки, викликані вимірюванням по дискретному зображенню, будуть мати такі значення (табл. 5).

Таблиця 5

Сумарні похибки, викликані вимірюванням по дискретному зображенню

Камера	m_d , мкм
камера 1	1,05
камера 2	1,17

Закінчення табл. 5

камера 3	1,21
камера 4	1,31

Для розрахунку похибки роздільної здатності скористаємося наступним виразом:

$$\Delta\gamma = 2 \times 1,22 \times f \times \lambda,$$

де f - знаменник відносного отвору; λ - довжина хвилі світла.

Для обчислення похибок візьмемо базис фотографування $B=3$ м.

Зазначимо, що похибка роздільної здатності стереовизначень обчислюється за формулами:

$$m_Y = \frac{Y^2 \Delta\gamma}{B}, \quad m_{X,Z} = Y \Delta\gamma, \quad m_Y = \frac{m_{X,Z} \times Y}{B}.$$

Графічно похибку роздільної здатності на місцевості представлено на рис. 2 -3.

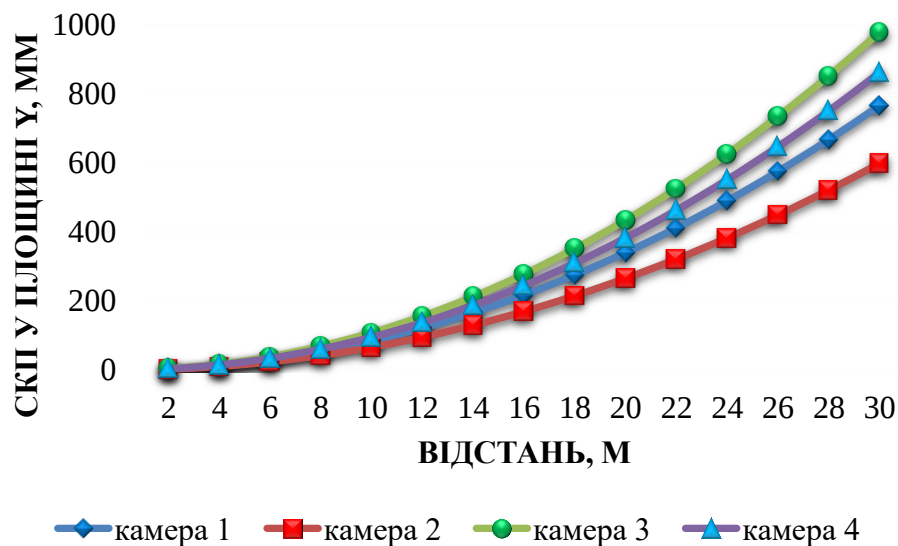


Рис. 2. Графіки похибок роздільної здатності вздовж осі Y

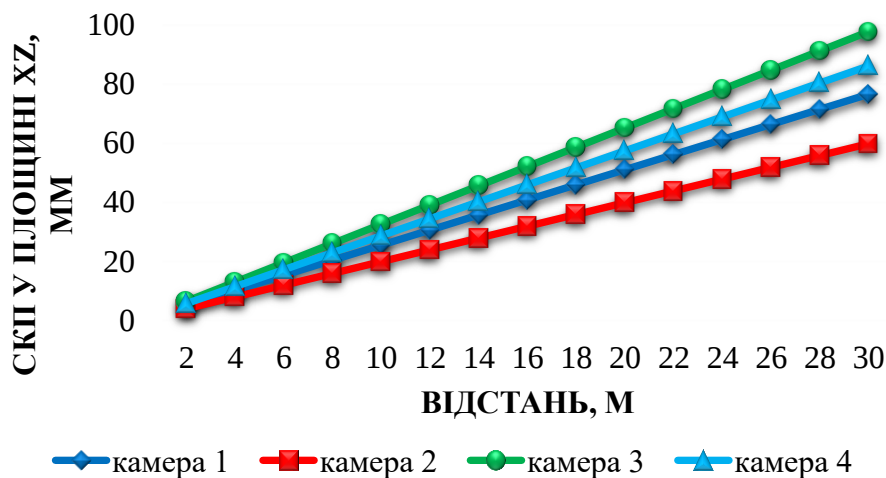


Рис. 3. Графіки похибок роздільної здатності вздовж осей X, Z

Щодо наведених розрахунків і графіків, то слід пам'ятати, що прийнято роздільну здатність ПЗЗ-матриці, а системі ПЗЗ – «матриця-об'єктив». Практично можливим є використання об'єктивів, що не спотворюватимуть роздільну здатність. З другого боку, у разі вимірювання точок більш ніж за двома знімками вплив роздільної здатності послаблюється, а за використання маркованих точок, розмір яких становить приблизно 5х5 пікселів на знімку вплив роздільної здатності послаблюється в декілька разів.

Тобто в практичних розрахунках за умови використання якісного об'єктива величину похибки роздільної здатності можна прийняти рівною величині пікселя ПЗЗ-матриці з коефіцієнтом збільшення приблизно 1,5-2.

Для обчислення похибки розфокусування використаємо головне рівняння геометричної оптики $\frac{1}{F} = \frac{1}{L} + \frac{1}{Y}$, з якого знайдемо L :

$$L = Y \times F / Y - F; \delta = L - F; \Delta F = D \times \delta / f;$$

$$m_{X,Z(F)} = \Delta F \times Y / F; \quad m_{Y(F)} = m_{X,Z(F)} \times Y / B. \quad (9)$$

За виразами (9) обчислимо величину похибки розфокусування для різних відстаней Y . Графічно похибку розфокусування на місцевості представлено на рис. 4.

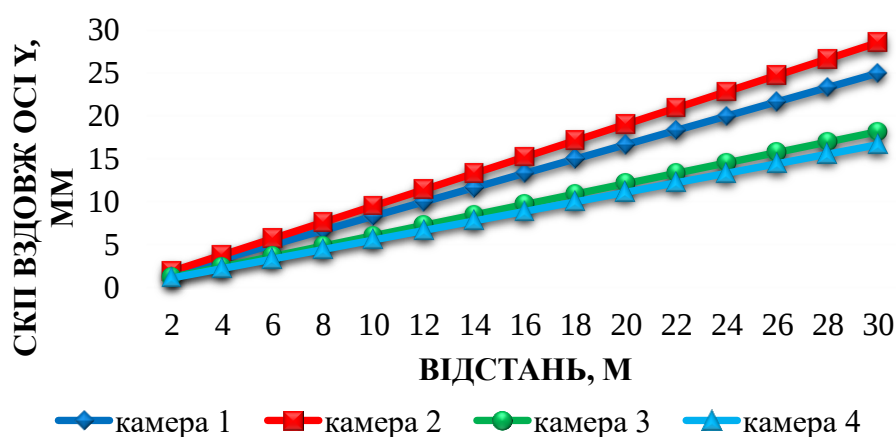


Рис. 4. Графіки похибок розфокусування вздовж осі Y

Слід мати на увазі, що стереоскопічні спостереження підвищують точність розпізнавання точок на знімку, тож фактична похибка, викликана нечіткістю зображення та роздільною здатністю, буде приблизно в два рази меншою. Теоретично для підвищення точності стереовимірювань потрібно використовувати фотокамери з великим фокусом і тим самим зменшувати величину кута поля зору і глибину різкості простору, що для камер у смартфонах фізично реалізувати неможливо.

За отриманими розрахунками обчислимо похибку вимірювання координат та паралаксів на знімку за різних відстаней фотографування для обраних нами камер (табл. 6).

Таблиця 6

Сумарний вплив похибок вимірювань на цифрових знімках

Y, м	2	10	20	30	2	10	20	30
	m_x, m_z , мкм				m_p , мкм			
камера 1	8	5.2	5.0	5.0	11.2	7.3	7.0	7.0
камера 2	7.3	4.6	4.5	4.5	10.2	6.4	6.3	6.3
камера 3	5.6	4.3	4.2	4.2	7.8	6.0	5.9	5.9
камера 4	4.4	3.6	3.6	3.6	6.2	5.0	5.0	5.0

Дані табл. 6 є вихідними для обчислення точності знімання.

Відповідно до виразу (3) визначимо вираз для розрахунку впливу похибок кутових елементів зовнішнього орієнтування та похибок координат точок на знімку [9]. Загальний вираз має такий вигляд:

$$M_m = M_\theta + M_\delta, \quad (10)$$

де M_θ – коваріаційна матриця похибок кутових елементів; M_δ – коваріаційна матриця похибок координат на знімку.

Графічно утворення похибки визначення координат точки фотографічним методом за парою знімків представлено на рис. 5.

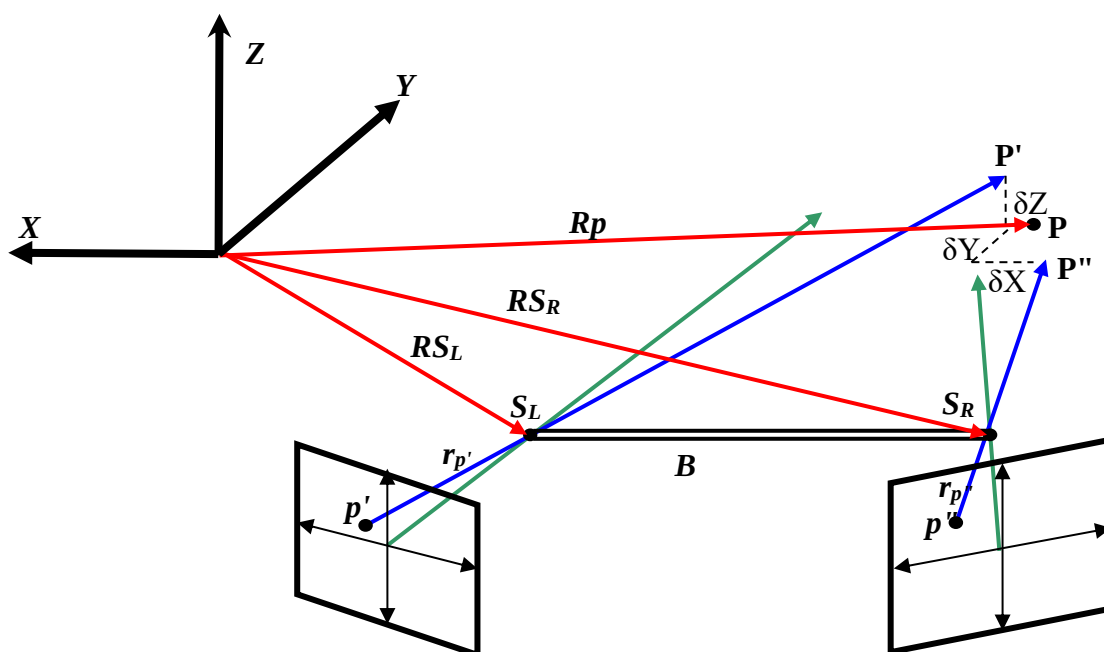


Рис. 5. Похибки прямої фотограмметричної засічки

Відповідно до позначень матрицю M_θ обчислюють так [9]:

$$M_\theta = F_{L,R} M_\alpha F_{L,R}^T, \quad (11)$$

де $F_{L,R}$ – матриця частинних похідних від виразу $A_{L,R}^r$;

$M_\alpha = \text{diag}(m_\alpha^2 \quad m_\omega^2 \quad m_\kappa^2)$ – діагональна матриця похибок кутових елементів.

$$M_\delta = A_{L,R} M_n A_{L,R}^T. \quad (12)$$

Матриця M_n – також діагональна матриця похибок, $M_n = \text{diag}(m_x^2 \quad m_f^2 \quad m_z^2)$. В матриці M_n середні квадратичні похибки є результатом сумарного впливу похибок визначення елементів внутрішнього орієнтування, залишкової дисторсії та дефектів цифрової матриці.

$$\left. \begin{aligned} m_x^2 &= m_{x_0}^2 + m_r^2 + m_t^2 + m_a^2 \\ m_z^2 &= m_{z_0}^2 + m_r^2 + m_t^2 + m_a^2 \\ m_f^2 & \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

де m_{x_0}, m_{z_0} – похибки визначення головної точки; m_r – похибка визначення радіальної дисторсії; m_t – похибка визначення тангенціальної дисторсії; m_a – похибка визначення дефектів цифрової матриці. Якщо калібрування виконується поліноміальними функціями без врахування фізичного змісту спотворень на зображенні, то за похибки вимірювання координат беруть похибки калібрування.

Звернімося до виразів (2). Відповідно до цих виразів нам треба врахувати похибки визначення координат на лівому і правому знімках, похибки визначення базису фотографування та похибки визначення координат центрів фотографування.

$$M = M_{S_L} + M_{r_l} + M_{r_r} + M_B, \quad (14)$$

де M_{S_L} – коваріаційна матриця похибок визначення координат лівого центра фотографування; M_{r_l} – коваріаційна матриця похибок визначення координат точки на лівому знімку; M_{r_r} – коваріаційна матриця похибок визначення координат точки на правому знімку; M_B – коваріаційна матриця похибок визначення базису фотографування.

Запис у вигляді рівності (14) – найбільш придатний для фототеодолітного знімання та знімання з використанням фототахеометрів, коли вимірюють базис фотографування та його складові по координатних осях. Для випадку фотографування звичайною цифровою неметричною камерою смартфона, коли обчислення ведуть безпосередньо через координати центра фотографування, вираз для обчислення похибок є таким:

$$M = M_{S_L} + M_{S_R} + M_{r_l} + M_{r_r}, \quad (15)$$

де M_{S_R} – коваріаційна матриця похибок визначення координат правого центра фотографування.

Тепер послідовно визначимо кожну матрицю похибок, при цьому ми вважаємо, що знімки приведено до нормального випадку і вплив кутових елементів враховано в матриці M_m .

Коваріаційна матриця похибок визначення координат точки на лівому знімку.

Взявши частинні похідні від виразів (2) та використавши правило перетворення коваріацій, отримаємо:

$$M_{r_l} = C_l M_m C_l^T, \quad (16)$$

де C_l – матриця частинних похідних.

$$C_l = \begin{pmatrix} \frac{B_X r_r^Y - B_Y r_r^X}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} - \frac{r_l^X r_r^Y (B_X r_r^Y - B_Y r_r^X)}{(r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y)^2} & \frac{r_l^X r_r^X (B_X r_r^Y - B_Y r_r^X)}{(r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y)^2} & 0 \\ \frac{r_l^Y r_r^Y (B_X r_r^Y - B_Y r_r^X)}{(r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y)^2} & \frac{B_X r_r^Y - B_Y r_r^X}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} + \frac{r_r^X r_l^Y (B_X r_r^Y - B_Y r_r^X)}{(r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y)^2} & 0 \\ \frac{r_l^Z r_r^Y (B_X r_r^Y - B_Y r_r^X)}{(r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y)^2} & \frac{r_l^Z r_r^X (B_X r_r^Y - B_Y r_r^X)}{(r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y)^2} & \frac{B_X r_r^Y - B_Y r_r^X}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} \end{pmatrix}$$

Коваріаційна матриця похибок визначення координат точки на правому знімку.

Взявши частинні похідні від виразів (2) та використавши правило перетворення коваріацій отримаємо:

$$M_{r_r} = C_r M_m C_r^T, \quad (17)$$

де C_r – матриця частинних похідних.

$$C_r = \begin{pmatrix} -\frac{B_Y r_l^X}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & \frac{B_X r_l^X}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & 0 \\ -\frac{B_Y r_l^Y}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & \frac{B_X r_l^Y}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & 0 \\ -\frac{B_Y r_l^Z}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & \frac{B_X r_l^Z}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & 0 \end{pmatrix}.$$

Коваріаційна матриця похибок визначення базису фотографування

Взявши частинні похідні від виразів (2) та використавши правило перетворення коваріацій, отримаємо:

$$M_B = C_B M_b C_B^T, \quad (18)$$

де C_B – матриця частинних похідних; $M_b = \text{diag}(m_{B_X}^2 \quad m_{B_Y}^2 \quad m_{B_Z}^2)$ – діагональна матриця похибок визначення базису.

$$C_B = \begin{pmatrix} \frac{r_l^X r_r^Y}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & -\frac{r_r^X r_l^X}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & 0 \\ \frac{r_l^Y r_r^Y}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & -\frac{r_r^X r_l^Y}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & 0 \\ \frac{r_l^Z r_r^Y}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & -\frac{r_r^X r_l^Z}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & 0 \end{pmatrix}.$$

Коваріаційна матриця похибок визначення координат лівого центру фотографування

У загальному випадку, коли прилади встановлюють на точки створеної попередньо геодезичної мережі, коваріаційна матриця M_{S_L} має повний вигляд. У розгляданому випадку для розрахунку точності використовують звичайно діагональну матрицю у вигляді рівності:

$$M_{S_L} = \text{diag}\left(m_{S_L^X}^2 \quad m_{S_L^Y}^2 \quad m_{S_L^Z}^2\right).$$

Для другого варіанта, коли безпосередньо визначають координати центрів фотографування, вирази для обчислення середніх квадратичних похибок будуть такі. Цілком зрозуміло, що вирази для M_{r_l} , M_{r_r} і M_{S_L} будуть мати вигляд аналогічний для першого випадку, зважаючи на те, що проекції базису слід підставити різниці координат лівого і правого центрів фотографування.

Коваріаційна матриця похибок визначення координат лівого центру фотографування

Взявши частинні похідні від виразів (3) та використавши правило перетворення коваріацій, отримаємо:

$$M_{S_L} = C_{S_L} M_S C_{S_L}^T. \quad (19)$$

$$C_{S_L} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{r_l^X r_r^Y}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & \frac{r_r^X r_l^X}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & 0 \\ -\frac{r_l^Y r_r^Y}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & 1 + \frac{r_r^X r_l^Y}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & 0 \\ -\frac{r_l^Z r_r^Y}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & \frac{r_r^X r_l^Z}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & 1 \end{pmatrix}.$$

Коваріаційна матриця похибок визначення координат правого центру фотографування

Взявши частинні похідні від виразів (4) та використавши правило перетворення коваріацій, отримаємо:

$$M_{S_R} = C_{S_R} M_S C_{S_R}^T. \quad (20)$$

$$C_{S_R} = \begin{pmatrix} \frac{r_l^X r_r^Y}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & -\frac{r_r^X r_l^X}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & 0 \\ \frac{r_l^Y r_r^Y}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & -\frac{r_r^X r_l^Y}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & 0 \\ \frac{r_l^Z r_r^Y}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & -\frac{r_r^X r_l^Z}{r_l^X r_r^Y - r_r^X r_l^Y} & 0 \end{pmatrix}.$$

За отриманими виразами (15-17), (19-20) виконаємо розрахунок очікуваної точності визначення координат. Результати представимо у графічній формі на рис. 6 – 9.

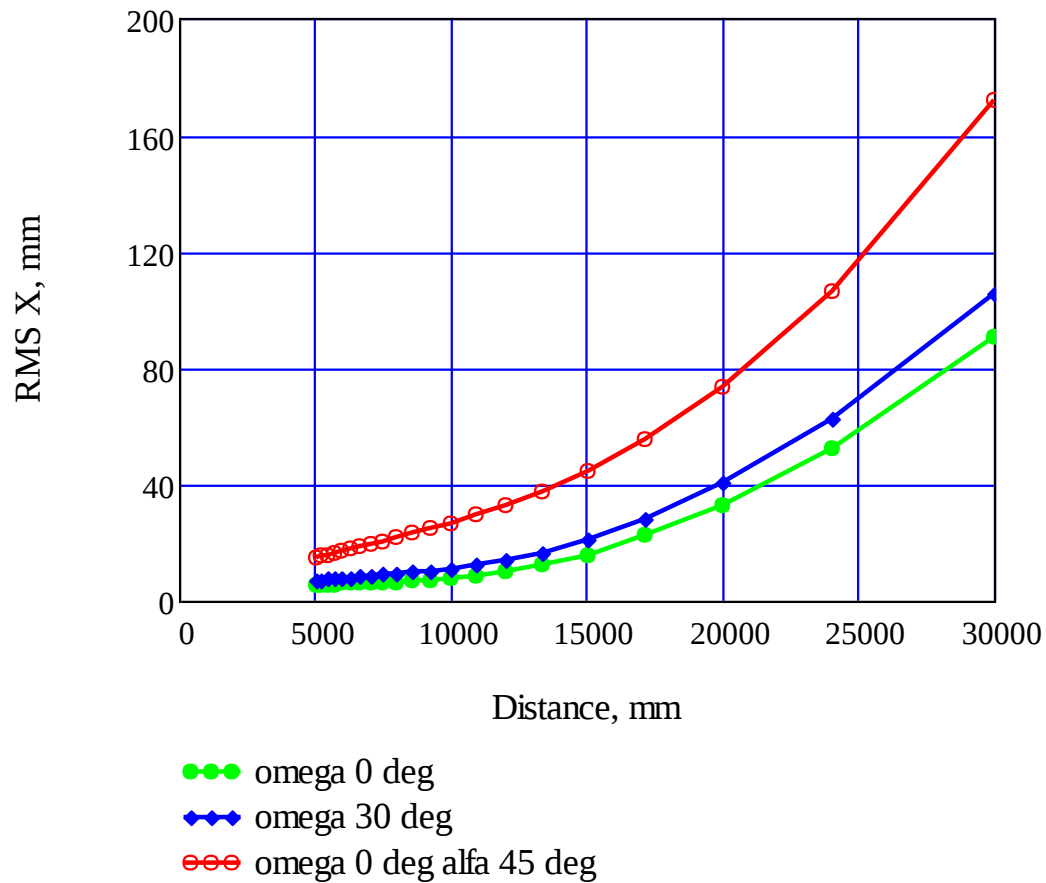


Рис. 6. Графіки похибок вздовж координатної осі X

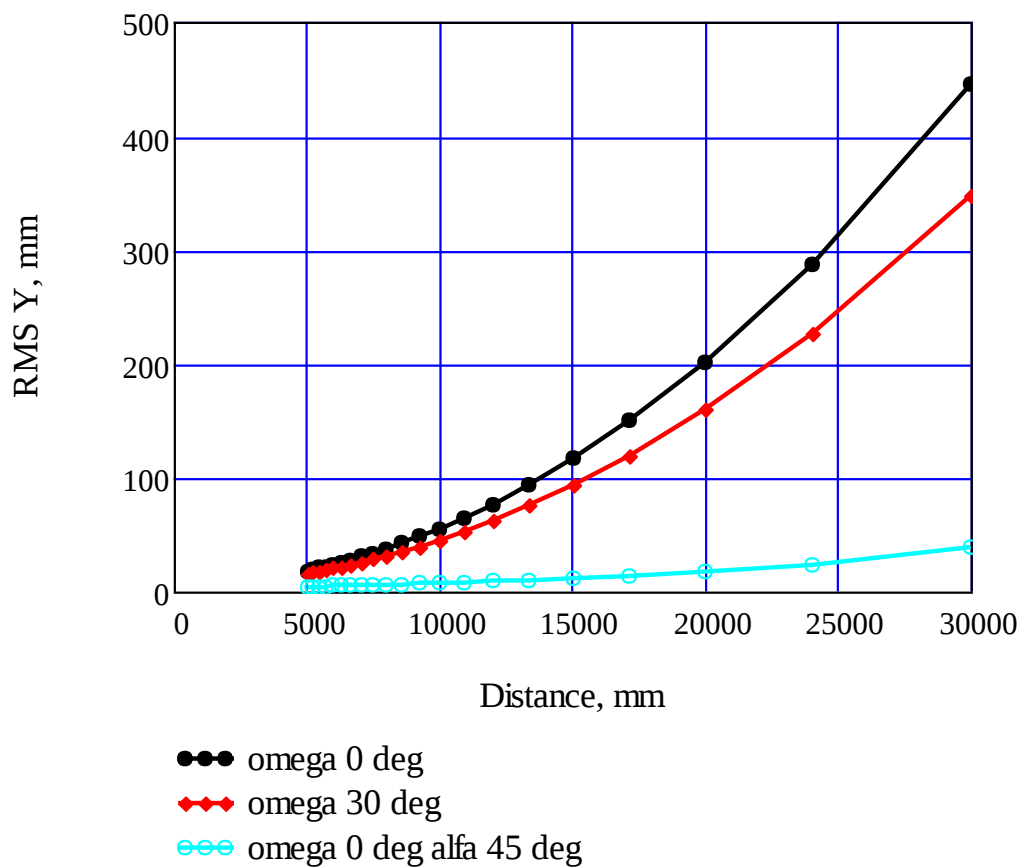


Рис. 7. Графіки похибок вздовж координатної осі Y

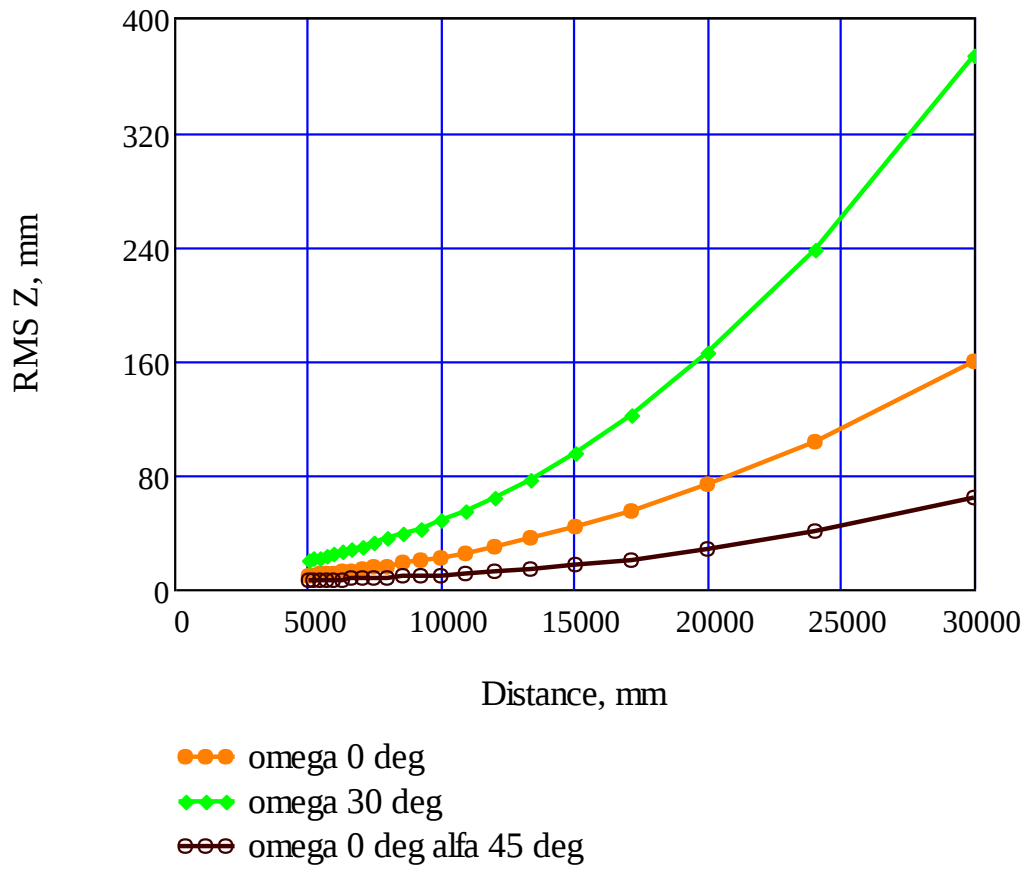


Рис. 8. Графіки похибок вздовж координатної осі Z

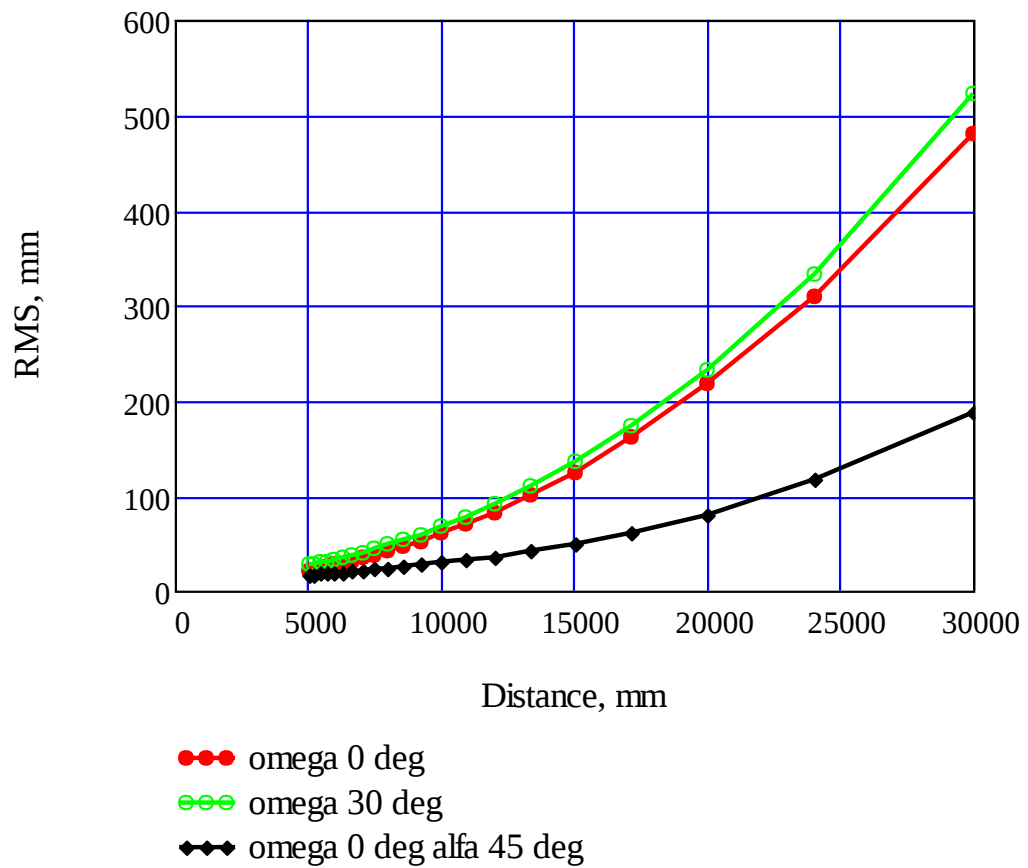


Рис. 9. Графіки похибок просторового визначення місцеположення

Розрахунки виконано для ідеального випадку фотографування, рівнонахиленого та конвергентного випадків. З аналізу графіків можна зробити загальний висновок, що попри невисоку якість цифрових камер, вони дають змогу визначати положення точок у просторі з точністю 10 см на відстані до 25 м. Такої точності цілком достатньо для створення тривимірних моделей в ГІС. Найкращу точність демонструє конвергентний випадок знімання, що відповідає умовам фотографування з використанням смартфонів.

Висновок. У результаті виконаного дослідження вдосконалено методику попереднього розрахунку точності в наземній цифровій фотограмметрії, яка є комплексною і враховує всі джерела похибок, притаманні цифровим камерам, якими обладнано сучасні смартфони. Розглянуто питання розрахунку точності вимірювань на цифровому знімку із врахуванням похибок дискретизації цифрового зображення, наведення, роздільної здатності та розфокусування. Використовуючи отримані сумарні похибки, виконано розрахунок точності створення фотограмметричних моделей за формулами прямої фотограмметричної засічки. Результати розрахунку дозволяють зробити висновки, що за найбільш несприятливих умов камери сучасних смартфонів дають змогу створювати тривимірні моделі з просторовою точністю, не гіршою за 5 см для відстаней до 20 метрів для конвергентного знімання. За результатами аналізу та розрахунку можна рекомендувати можливі заходи для підвищення точності, зокрема шляхом підбору вдалої геометрії фотографування, використання кодових марок для орієнтування знімків та багатократного відображення ідентичних точок на різних знімках і в різних зонах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Воронин Е.Г.* О влиянии дискретизации на точность измерений по цифровому снимку [Текст] / Е.Г. Воронин // Геодезия и картография. – 1999. - №11. - С. 31-35.
2. *Гельман Р.Н.* Лабораторная калибровка цифровых камер с большой дисторсией [Текст] / Р.Н. Гельман, А.Л. Дунц // Геодезия и картография. – 2002. – №7. – С. 23-31.
3. *Книжников Ю.Ф.* Зависимость точности стереоскопических измерений от размера пиксела цифровых камер [Текст] / Ю.Ф. Книжников // Геодезия и картография. – 2003. - №4. - С. 32-41.
4. *Метелкин А.И.* Основы архитектурно-строительной фотограмметрии / А.И. Метелкин. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1981 – 168 с.
5. *Метелкин А.И.* Фотограмметрия в строительстве и архитектуре / А.И. Метелкин. – М.: Стройиздат, 1981. – 288 с.
6. *Сердюков В.М.* Фотограмметрия в промышленном и гражданском строительстве / В.М. Сердюков. – М.: Недра, 1977. – 245 с.
7. *Сердюков В.М.* Фотограмметрия в инженерно-строительном деле / В.М. Сердюков. – М.: Недра, 1970. – 136 с.
8. *Соколова Н.А.* Технология крупномасштабных аэрофотографических съемок / Н.А. Соколова // М.: Недра, 1973. - 184 с.

9. *Фотограмметрия*. С.Г. Могильный, И.Л. Беликов, Л.И. Ахонина и др., К.: Высшая шк., 1985. – 278 с.

REFERENCES

1. Voronin E.G. (1999). О влиянии дискретизации на точность измерений по цифровому снимку [About the influence of sampling on the accuracy of measurements from a digital imagery]. *Geodezija i kartografija - Geodesy and Cartography*, 11, 31-35 [in Russian].
2. Gelman, R.N., Dunc, A.L. (2002). Laboratornaja kalibrovka cifrovych kamer s bolshoj distorsiej [Laboratory calibration of digital cameras with a large distortion]. *Geodezija i kartografija - Geodesy and Cartography*, 7, 23-31 [in Russian].
3. Knizhnikov J.F. (2003). Zavisimost tochnosti stereoskopicheskikh izmerenij ot razmera piksela cifrovych kamer [Dependence of the accuracy of stereoscopic measurements on the pixel size of digital cameras]. *Geodezija i kartografija - Geodesy and Cartography*, 4, 32-41 [in Russian].
4. Metelkin A.I. (1981). *Osnovy arhitekturno-stroitelnoj fotogrammetrii* [Fundamentals of architectural and construction photogrammetry]. Voronezh: VGU [in Russian].
5. Metelkin A.I. (1981). *Fotogrammetrija v stroitelstve i arhitekture* [Photogrammetry in construction and architecture]. Moscow: Strojizdat [in Russian].
6. Serdjukov V.M. (1977). *Fotogrammetrija v promyshlennom i grazhdanskom stroitel'stve* [Photogrammetry in industrial and civil construction]. Moscow: Nedra [in Russian].
7. Serdjukov V.M. (1970). *Fotogrammetrija v inzhenerno-stroitel'nom dele* [Photogrammetry in engineering and construction]. Moscow: Nedra [in Russian].
8. Sokolova N.A. (1973). *Tehnologija krupnomasshtabnyh ajerotopograficheskikh semok* [Technology of large-scale aerotopographic surveys]. Moscow: Nedra [in Russian].
9. Mogilnij S.G., Belikov I.L., Ahonina L.I., Brezhnev D.V., Bordjukov M.P. (1985). *Fotogrammetrija* [Photogrammetry]. Kyiv: Vishha shkola [in Russian].

О.Н. Гончерюк

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАСЧЕТА ТОЧНОСТИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, СОЗДАНЫХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ LOW-COST ФОТОГРАММЕТРИИ

В работе приведена методика выполнения предварительного расчета точности фотограмметрических измерений с использованием цифровых камер, которыми оборудованы современные смартфоны. Рассмотрены основные аналитические зависимости цифровой фотограмметрии для прямой фотограмметрической засечки. Выполнен анализ основных источников погрешностей цифровых неметрических камер. Рассмотрены вопросы расчета точности измерений на цифровом снимке с учетом погрешностей дискретизации цифрового изображения, наведения, разрешения и расфокусировки. Для расчетов были использованы типичные параметры цифровых камер современных смартфонов. Используя полученные суммарные погрешности, были выполнены

расчеты точности создания фотограмметрических моделей по формулам прямой фотограмметрической засечки. Приведены выражения для расчета влияния погрешностей угловых элементов снимков и погрешностей координат центров фотографирования. Выполнен предварительный расчет точности для экстремальных значений углов разворота цифровых снимков. По результатам расчета можно сделать выводы, что при наиболее неблагоприятных условиях камеры современных смартфонов позволяют создавать трехмерные модели с пространственной точностью не хуже 5 см для расстояний до 20 метров при конвергентной съемке. Установлено, что повысить точность определения координат можно путем подбора удачной геометрии фотографирования и использованием кодовых марок для ориентирования снимков.

Ключевые слова: цифровая фотограмметрия, неметрическая камера, low-cost фотограмметрия, предварительный расчет точности, прямая фотограмметрическая засечка.

O. Honcheruk

**METHOD OF PERFORMING THE PRELIMINARY ACCURACY
CALCULATION OF PHOTOGRAMMETRIC MODELS CREATED ON THE
BASIS OF LOW-COST PHOTOGRAMMETRY DATA**

In this work, a method is given for performing a preliminary accuracy calculation of photogrammetric measurements using digital cameras equipped with modern smartphones. The main analytical dependencies of digital photogrammetry for direct photogrammetric intersection were considered. The main sources of errors in digital non-metric cameras were analyzed. The problems of calculation of the accuracy of measurements in a digital imagery were considered taking into account the errors of digitization of digital imagery, pointing, resolution and defocusing. Typical parameters of digital cameras of modern smartphones were used for calculations. Using the resulting total errors, the calculations of the accuracy of the photogrammetric models by the formulas of the direct photogrammetric intersection were made. Expressions are given for calculating the influence of the errors of the angular elements of the photographs and the errors in the coordinates of the photography centers. A preliminary accuracy calculation for the extreme values of the rotation angles of digital imageries is performed. The results of the calculation allow to draw conclusions that under the most unfavorable conditions, modern smartphone cameras allow creating 3D models with spatial accuracy not worse than 5 cm for distances up to 20 meters for convergent mode. It is established that it is possible to improve the accuracy of the determination of coordinates by selecting a successful geometry of photography and using coded marks for imageries orientation.

Keywords: digital photogrammetry, non-metric camera, low-cost photogrammetry, preliminary accuracy calculation, direct photogrammetric resection.