

STANISŁAW JANISZEWSKI

528.735.4:518:528.9(084.3)

**Analityczna aerotriangulacja szeregową
dla numerycznego opracowania mapy obiektu wydłużonego
z wykorzystaniem stereokomparatora Stekometer
i komputera ODRA 1204**

1. Wstęp

Praktyczne stosowanie precyzyjnych metod aerotriangulacji blokowej nie przekreśla celowości wykorzystania w uzasadnionych przypadkach metod aerotriangulacji szeregowej.

Jednym z takich przypadków okazuje się opracowanie obiektu wydłużonego (np. trasy komunikacyjnej, rzeki itp.), który może być sfotografowany w odpowiedniej skali na pojedynczym szeregu zdjęć. Zastosowanie tutaj metody szeregowej do kameralnego zagęszczenia osnowy fotogrametrycznej, a w razie potrzeby również do numerycznego ujęcia treści mapy, przynosi oszczędność pracy komputera, wynikającą z uproszczonej organizacji programów obliczeń i nieiteracyjnego wyznaczenia niewiadomych.

Pewna strata dokładności, która wynika z niejednoczesnego wyznaczenia niewiadomych, może nie być brana pod uwagę ze względu na jej szcążkowy charakter w porównaniu z dominującym wpływem błędów pomiaru fotogrametrycznej osnowy terenowej i jej identyfikacji na zdjęciach. Należy podkreślić, że wspomniana dominacja występuje zawsze przy opracowaniach wielkoskalowych.

Spostrzeżenia powyższe uzasadniają podjęcie opracowania metody i odpowiednich programów obliczeń aerotriangulacji szeregowej, jako uzupełnienia do działającego już systemu programów aerotriangulacji blokowej.

Elementem nowatorskim w stosunku do podobnych procedur, stosowanych w kraju z wykorzystaniem różnych komputerów, jest wprowadzenie tzw. warunku linii prostej, które ma na celu dodatkową kontrolę i zmniejszenie systematycznego wygięcia poprzecznego sieci aerotriangulacyjnej.

Prace nad metodą i programami prowadzone były w roku 1973 w Zakładzie Fotogrametrii IGiK w ramach tematu badawczego, którego celem jest uzyskanie technologii opracowania map tras komunikacyjnych metodami fotogrametrycznymi.

Wynikiem ich są dwa programy obliczeń, które w powiązaniu z kilkoma programami, wykorzystywanymi w aerotriangulacji blokowej do wstępnego opracowania współrzędnych tłowych, tworzą pewien system o nazwie TRASA.

Poniżej podane i omówione zostaną wzory matematyczne zastosowane w programach oraz pewne wnioski z praktycznego zastosowania programów.

2. Wyprowadzenie wzorów i algorytmy

Na podstawie pozytywnych doświadczeń z wieloletniej praktyki analitycznej aerotriangulacji szeregowej na komputerze typu ODRA 1003 zdecydowano przyjąć dwustopniowy sposób rozwiązania:

- rozwinięcie szeregu z wyznaczeniem położenia punktów względem dowolnie przyjętego układu współrzędnych.
- transformacja współrzędnych punktów do państwowego układu współrzędnych.

2.1. Rozwinięcie szeregu

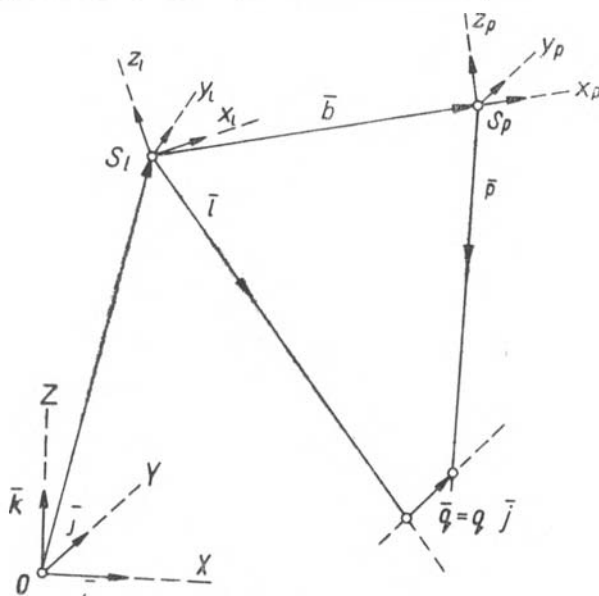
Zakłada się, że z każdym zdjęciem związany jest pewien przestrzenny układ współrzędnych ($S x y z$), nazywany dalej układem zdjęcia, a z całym szeregiem układ współrzędnych ($O X Y Z$), nazywany układem szeregu.

Należy wyjaśnić, że układy poszczególnych zdjęć nie pokrywają się na ogół z układem szeregu, tak jak ten z kolei nie pokrywa się z układem terenowym, przyjętym dla opracowania mapy.

Dla każdego zdjęcia dana jest wiązka wektorów określonych współrzędnymi względem układu zdjęcia i wyznaczających kierunki promieni rzutujących punktów, które biorą udział w aerotriangulacji.

Rozwinięcie szeregu polega na określeniu położenia i orientacji układów poszczególnych zdjęć względem układu szeregu, co umożliwia następnie określenie położenia względem tego układu wektorów kierunkowych promieni rzutujących.

Homologiczne promienie rzutu wychodzące ze środków rzutów sąsiednich zdjęć, zorientowane względem układu szeregu w taki sposób, jak w momencie ekspozycji zdjęć, pozwolą na wyznaczenie w przestrzeni położenia punktów, którym odpowiadają. Podkreślenia wymaga przy tym fakt, że promienie homologiczne na ogół nie przecinają się mimo poprawnego zorientowania ich wektorów kierunkowych. Przyczyną zjawiska jest to, że współrzędne wektorów ustalane są na drodze skończenie dokładnych pomiarów obrazu fotograficznego, który jest również tylko przybliżeniem odwzorowania powierzchni terenu w rzucie środkowym.



Rys. 1

Na rysunku 1 pokazano parę promieni homologicznych, wektory kierunkowe tych promieni l i p , wektor wodzący s_l środka rzutu S_l , wektor bazy fotografowania b oraz wektor paralaksy poprzecznej $q = q \cdot j$, który tworzy się między promieniami rzutu wychodzącymi na skutek ich nieprzecinania się.

Współrzędne x, y wektorów l, p względem układów zdjęć

$$(S_l \ x_l \ y_l \ z_l) \quad \text{i} \quad (S_p \ x_p \ y_p \ z_p)$$

określone są na drodze pomiarów i wstępnych przeliczeń, natomiast współrzędne z są stałe dla wszystkich wektorów w wiązkach i równe $-ck$, tj. ujemnej wartości odległości obrazu w kamerze.

Jeżeli dla wektorów \mathbf{l} , \mathbf{p} stosować będziemy oznaczenia \mathbf{l}_z , \mathbf{p}_z w przypadku, gdy są one określone współrzędnymi względem układów zdjęć, przy czym

$$\mathbf{l}_z = \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ -ck \end{bmatrix}$$

$$\text{oraz } \mathbf{p}_z = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -ck \end{bmatrix}$$

natomiast zachowamy oznaczenia \mathbf{l} i \mathbf{p} w przypadku, gdy wektory są określone względem układu szeregu, przy czym

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix}$$

$$\text{oraz } \mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$$

to zachodzą związki:

$$\begin{aligned} \mathbf{l} &= R_l \cdot \mathbf{l}_z \\ \mathbf{p} &= R_p \cdot \mathbf{p}_z \end{aligned} \quad (1)$$

Wielkości R_l i R_p są ortogonalnymi macierzami, określającymi wzajemną orientację układów zdjęcia i szeregu. W toku dalszych wyprowadzeń stosuje się ogólną postać macierzy R w parametryzacji tzw. algebraicznej [1] szczególnie dogodnej w obliczeniach komputerowych. Elementy tej macierzy są funkcjami trzech parametrów a , b , c i obliczane są wg wzorów:

$$g = \frac{1}{(1+a^2+b^2+c^2)}$$

$$\begin{aligned} r_{1,1} &= (1+a^2-b^2-c^2) \cdot g \\ r_{1,2} &= (2ab-2c) \cdot g \\ r_{1,3} &= (2ac+2b) \cdot g \\ r_{2,1} &= (2ab+2c) \cdot g \\ r_{2,2} &= (1-a^2+b^2-c^2) \cdot g \\ r_{2,3} &= (2bc-2a) \cdot g \\ r_{3,1} &= (2ac-2b) \cdot g \\ r_{3,2} &= (2bc+2a) \cdot g \\ r_{3,3} &= (1-a^2-b^2+c^2) \cdot g \end{aligned} \quad (2)$$

Wektory s_l , \mathbf{b} , \mathbf{j} , \mathbf{q} określone są względem układu szeregu współrzędnymi oznaczonymi następująco:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_l &= \begin{bmatrix} s_{lx} \\ s_{ly} \\ s_{lz} \end{bmatrix} \\ \mathbf{b} &= \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \\ \mathbf{j} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{q} &= \begin{bmatrix} 0 \\ q \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3}$$

Jak wynika z wcześniej podanej definicji rozwinięcia szeregu głównymi niewiadomymi tego procesu są wektory \mathbf{s} i macierze R poszczególnych zdjęć, gdyż położenia punktów w przestrzeni szeregu będą funkcjami wielkości \mathbf{s} i R .

Niewiadome wyznacza się dla kolejnego zdjęcia w szeregu poprzez jego odpowiednie dostrojenie do zdjęcia wcześniej zlokalizowanego i zorientowanego względem układu szeregu. Dla zdjęcia pierwszego w tak rozwijanym szeregu wielkości s_l i R_l znane są z założenia a mianowicie:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_l &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ R_l = E &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Dostrajanie odbywa się w dwóch etapach:

- orientacja względna, której zadaniem jest wyznaczenie macierzy R_p oraz wektora \mathbf{b} przy założeniu, że jego współrzędna $b_x = 1$,
- skalowanie bazy, które ma na celu zmianę długości wyznaczonego wektora \mathbf{b} z zachowaniem jego kierunku, tak aby wyrażony był w skali obowiązującej w rozwijanym szeregu i wynikającej z długości bazy założonej dla pierwszej pary dostrojonych zdjęć.

Wektor \mathbf{s}_p wyznaczony zostanie z wzoru

$$\mathbf{s}_p = \mathbf{s}_l + \mathbf{b}. \tag{4}$$

Orientacja względna

Na podstawie rysunku można napisać:

$$q = \frac{\mathbf{b} \cdot (\mathbf{l} \times \mathbf{p})}{\mathbf{j} \cdot (\mathbf{l} \times \mathbf{p})} = \frac{\mathbf{b} \cdot (\mathbf{l} \times R_p \cdot \mathbf{p}_z)}{\mathbf{j} \cdot (\mathbf{l} \times R_p \cdot \mathbf{p}_z)}. \quad (5)$$

W równaniu tym, określającym wartość paralaksy poprzecznej, jak wynika z poczynionych wcześniej założeń, jedynie współrzędne b_y i b_z wektora \mathbf{b} oraz parametry a , b , c macierzy R_p są wielkościami niewiadomymi. Można je zatem wyznaczyć z układu równań utworzonych dla co najmniej 5 odpowiednio dobranych par wektorów \mathbf{l} , \mathbf{p} po narzuceniu dodatkowego warunku

$$\sum_1^{n \geq 5} (q_i)^2 = \text{minimum}. \quad (6)$$

Ze względu na nieliniową postać związku (5) w praktyce stosuje się jego przybliżenie otrzymane przez rozwinięcie na szereg Taylora z ograniczeniem do wyrazów małych I rzędu.

Po odpowiednich przekształceniach i uporządkowaniu ma on postać:

$$q = q_0 + \frac{(\mathbf{l} \times \mathbf{p}_0)}{\mathbf{j} \cdot (\mathbf{l} \times \mathbf{p}_0)} \cdot d\mathbf{b} + \frac{\mathbf{p}_0}{\mathbf{j} \cdot (\mathbf{l} \times \mathbf{p}_0)} \times (\mathbf{b}_0 \times \mathbf{l}) - q_0 (\mathbf{j} \times \mathbf{l}) \cdot \mathbf{a} \quad (7)$$

W równaniu tym:

\mathbf{p}_0 i q_0 — określone są wzorami $\mathbf{p}_0 = R_{p0} \cdot \mathbf{p}_z$

$$q_0 = \frac{\mathbf{b}_0 \cdot (\mathbf{l} \times \mathbf{p}_0)}{\mathbf{j} \cdot (\mathbf{l} \times \mathbf{p}_0)} \quad (8)$$

\mathbf{b}_0 i R_{p0} — równe są aktualnie znanym przybliżonym wartościom niewiadomych \mathbf{b} i R_p

$d\mathbf{b} = [0, dby, dbz]$ — jest niewiadomym wektorem poprawkowym do wektora \mathbf{b}_0

$\mathbf{a} = [a_1, a_2, a_3]$ — jest niewiadomym wektorem reprezentującym w przybliżeniu poprawkową transformację wiązki \mathbf{p}_0 . Wektor \mathbf{a} wiąże się z macierzą transformacji poprawkowej R' poprzez związek

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= [a'/2, b'/2, c'/2], \\ R' &= R(a', b', c'), \end{aligned} \quad (9)$$

(elementy macierzy R' oblicza się wg (2))

Po wyznaczeniu niewiadomych db i a z układu równań typu (7) zgodnie z warunkiem (6) przybliżone wartości niewiadomych b i R_p poprawiane będą wg wzorów.

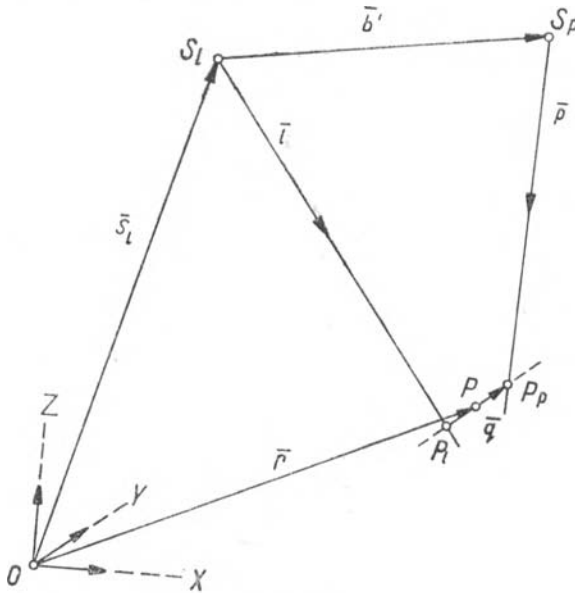
$$\begin{aligned} b_0 &= (b_0) + db, \\ R_{p0} &= R' \cdot (R_{p0}), \end{aligned} \tag{10}$$

gdzie nawiasami oznaczono aktualne przybliżenie wartości niewiadomych.

Kilkakrotne powtórzenie opisanego procesu poprawiania wartości niewiadomych powoduje, że poprawki db i a obliczone w kolejnym cyklu okażą się zaniedbywalne w porównaniu z dokładnością współrzędnych tło- wych. Stanowi to sygnał do zakończenia iteracji, a ostatnio obliczone wartości b_0 i R_{p0} w/g wzorów (10) mogą być używane w dalszych działaniach dla orientowania wiązki wektorów p_z względem układu szeregu.

Skalowanie bazy i tworzenie modelu przestrzennego

Wobec faktu nieprzecinania się promieni homologicznych mimo ich zorientowania względem układu szeregu, zachodzi konieczność zdefinio- wania pojęcia punktu wyznaczanego przez takie wchrowate promienie. Punktem tym będzie mianowicie punkt P (rys. 2), leżący w połowie wek- tora szcztąkowej paralaksy poprzecznej.



Rys. 2

Na rysunku 2 przez \mathbf{b}' oznaczono wektor bazy fotografowania w skali, w jakiej zostanie utworzony model przestrzenny. Wektor ten jest kolinearny z wektorem \mathbf{b} wyznaczonym w etapie orientacji względnej. Mamy zatem

$$\mathbf{b}' = \lambda \cdot \mathbf{b} \quad (11)$$

Wektor wodzący punktu P w układzie szeregu jest określony wzorem

$$\mathbf{r} = \mathbf{s}_l + k_l \cdot \mathbf{l} + 0,5 \cdot \mathbf{q} = \mathbf{s}_l + k_l \cdot \mathbf{l} + 0,5 \cdot \mathbf{q} \cdot \mathbf{j}, \quad (12)$$

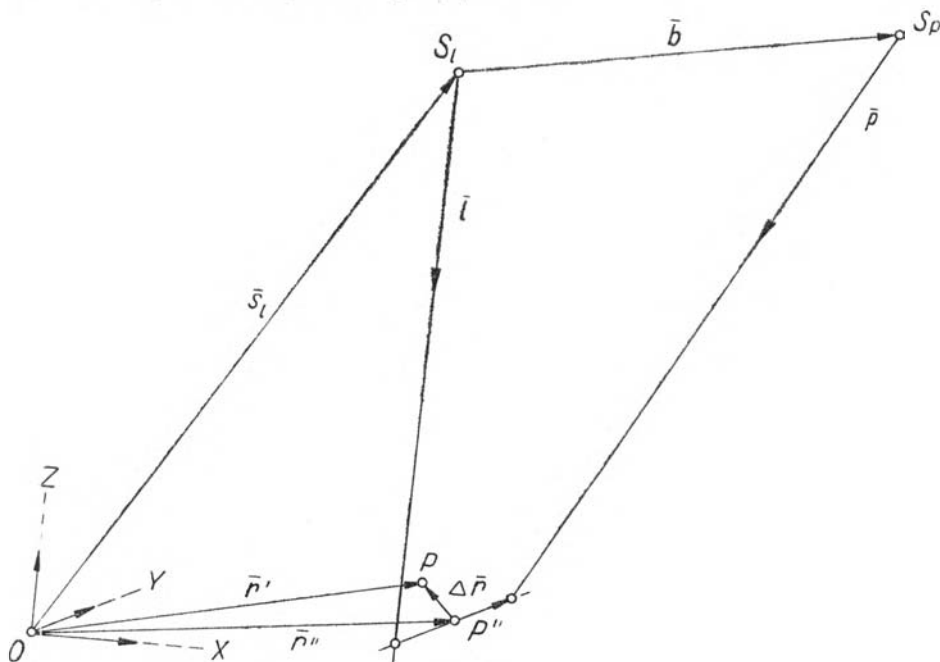
$$\text{gdzie } k_l = \frac{(\mathbf{b}' \times \mathbf{p}) \cdot \mathbf{j}}{(\mathbf{l} \times \mathbf{p}) \cdot \mathbf{j}} = \frac{(\mathbf{b} \times \mathbf{p}) \cdot \mathbf{j}}{(\mathbf{l} \times \mathbf{p}) \cdot \mathbf{j}} \cdot \lambda,$$

q — wartość szczytkowej paralaksy poprzecznej,

$\mathbf{r} = [r_x, r_y, r_z]$ — wektor wodzący punktu P w układzie szeregu,

λ — niewiadomy współczynnik skalowy bazy fotografowania.

Współczynnik λ niezbędny dla obliczenia wektorów \mathbf{r} w skali przyjętej dla całego szeregu, oblicza się na podstawie warunku teoretycznej równości wektora wodzącego \mathbf{r}' punktu P' (rys. 3) określonego w modelu wcześniej wyskalowanym oraz wektora \mathbf{r}'' punktu P'' określonego w modelu aktualnie doprowadzanym do żądanej skali.



Rys. 3

Punkty P' i P'' muszą być przy tym modelowymi odpowiednikami jednego i tego samego punktu terenowego.

W przypadku, gdy w sąsiednich modelach istnieje więcej niż jedna para odpowiadających sobie punktów, warunek ten nie jest możliwy do spełnienia przez wszystkie pary punktów jednocześnie, na skutek przeniesienia się błędów danych początkowych. W tym przypadku należy stosować jego ogólniejszą postać

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}' - \mathbf{r}'' = \mathbf{r}' - \mathbf{s}_i + \mathbf{l} \cdot \lambda \frac{(\mathbf{b} \times \mathbf{p}) \cdot \mathbf{j}}{(\mathbf{l} \times \mathbf{p}) \cdot \mathbf{j}} + 0,5 \cdot p_y \cdot \mathbf{j}, \quad (13)$$

gdzie

$$\begin{aligned} \mathbf{r}' &= [r_x, r_y, r_z], \\ \Delta \mathbf{r} &= [\Delta r_x, \Delta r_y, \Delta r_z]. \end{aligned}$$

Wyznaczenie λ z układu równań typu (13) może nastąpić po założeniu dodatkowego warunku

$$\sum_1^{m \geq 1} (\Delta r_i)^2 = \text{minimum}. \quad (14)$$

Wektorowe równanie (13) odpowiada trzem równaniami współrzędnych, ale ze sposobu rozmieszczenia porównywanych punktów w sąsiednich modelach wynika, że najbardziej korzystnym dla wyznaczenia λ jest równanie trzeciej współrzędnej Δr_z , otrzymane przez skalarne pomnożenie równania (13) przez wersor \mathbf{k} układu szeregu. Równanie to gwarantuje mianowicie symetryczny względem osi szeregu rozkład różnic współrzędnych Z dla odpowiadających sobie punktów w sąsiednich modelach.

Po odpowiednim uporządkowaniu równanie to otrzyma postać:

$$\Delta r_z = \left(-l_z \frac{(\mathbf{b} \times \mathbf{p}) \cdot \mathbf{j}}{(\mathbf{l} \times \mathbf{p}) \cdot \mathbf{j}} \right) \cdot \lambda + r'_z - s_{lz}. \quad (15)$$

Z chwilą wyznaczenia współczynnika λ należy obliczyć wektor \mathbf{b} wg (11), a następnie wektory \mathbf{r} według (12) dla wszystkich punktów wyznaczonych w danym modelu.

2.2. Transformacja szeregu

Wynikiem rozwinięcia szeregu jest sieć punktów o współrzędnych X , Y , Z określonych względem przyjętego układu współrzędnych szeregu. Jak już wspomniano, układ ten najczęściej nie pokrywa się z terenowym

układem współrzędnych przyjętym dla opracowania mapy, wobec czego zachodzi konieczność dokonania transformacji ortogonalnej współrzędnych szeregowych do układu terenowego. Będzie to możliwe, jeżeli znane są współrzędne terenowe X , Y , H dla co najmniej dwóch z pośród punktów sieci oraz co najmniej współrzędna H trzeciego punktu.

Wymagane jest przy tym, aby żaden z wymienionych punktów nie leżał w płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez dwa pozostałe.

W przypadku, gdy punktów tych, nazywanych punktami osnowy terenowej, jest więcej niż określone wyżej minimum, możliwe będzie wyznaczenie współczynników transformacji ortogonalnej ze spełnieniem warunku minimum sumy kwadratów odchyłek współrzędnych przetransformowanych od danych współrzędnych terenowych.

W tym też przypadku, przy odpowiednim rozmieszczeniu punktów osnowy terenowej, możliwe jest zaobserwowanie pewnej systematyki w wielkościach i kierunku odchyłek, zależnej od sytuacyjnego położenia punktów osnowy terenowej w sieci.

Źródłem wspomnianych odchyłek mogą być z jednej strony błędy pomiaru w terenie i identyfikacji na zdjęciach punktów osnowy terenowej, z drugiej zaś błędy współrzędnych tłowych przeniesione w procesie rozwijania szeregu. Natomiast obserwowana w odchyłkach systematyka, jeżeli wykluczyć możliwość systematycznego skażenia osnowy terenowej, może mieć przyczynę jedynie w charakterze błędów współrzędnych tłowych i sposobie przeniesienia się ich na wyniki rozwinięcia szeregu. Na podstawie odchyłek występujących w punktach osnowy terenowej można aproksymować funkcję systematycznego zniekształcenia sieci fotogrametrycznej za pomocą odpowiednio dobranego wielomianu, aby zakładając następnie ciągłość funkcji na obszarze objętym siecią, wyeliminować zniekształcenie z fotogrametrycznych współrzędnych wszystkich punktów sieci.

Powyższy wywód ma charakter poglądowy, gdyż obliczenia realizowane przez komputer mają nieco inną kolejność, a mianowicie:

— dokonywana jest ortogonalna transformacja współrzędnych terenowych punktów osnowy terenowej do układu szeregu,

— obliczane są odchyłki Δ współrzędnych szeregowych od przetransformowanych terenowych,

— na podstawie odchyłek aproksymowana jest funkcja zniekształcenia systematycznego, po czym następuje eliminacja tego zniekształcenia ze współrzędnych szeregowych,

— na zakończenie dokonuje się ortogonalnej transformacji współrzędnych szeregowych do układu terenowego.

Wybór typu wielomianu aproksymującego funkcję zniekształcenia warunkowany jest z jednej strony liczbą i rozmieszczeniem punktów osnowy terenowej, z drugiej zaś strony istnieje potrzeba stosowania wielomianów wyższych stopni w miarę wzrostu długości szeregu w sensie liczby dostrajanych zdjęć.

Optymalnym będzie wielomian, którego użycie pozwoli zredukować wielkość odchyłek do takiego poziomu, aby ich średnia kwadratyczna nie przekraczała wielkości oczekiwanej, wynikającej z przypadkowych błędów pomiarów terenowych i fotogrametrycznych.

Z doświadczeń praktycznych wynika, że w przypadku ograniczenia długości rozwijanych szeregów do około 15 zdjęć, liczbę typów wielomianów, których realizację musi zapewnić program obliczeń, można ograniczyć do następującego zestawu:

$$\begin{aligned} 1) \quad w &= A_0 + A_1 \cdot X + A_2 \cdot Y + A_3 \cdot X \cdot Y, \\ 2) \quad w &= A_0 + A_1 \cdot X + A_2 \cdot Y + A_3 \cdot X \cdot Y + A_4 \cdot X^2, \\ 3) \quad w &= A_0 + A_1 \cdot X + A_2 \cdot Y + A_3 \cdot X \cdot Y + A_4 \cdot X^2 + A_5 \cdot X^3. \end{aligned} \quad (16)$$

Wzory (16) można stosować do aproksymacji zniekształceń każdej z trzech współrzędnych X, Y, Z .

W celu wyznaczenia współczynników A_i wybranego typu wielomianu, tworzy się wg niego układ równań o niewiadomych A_i , podstawiając zamiast X, Y współrzędne punktów osnowy terenowej w układzie szeregu, a zamiast wielkości w deltę (Δ), to jest wartość odchyłki współrzędnej przetransformowanej od współrzędnej w układzie szeregu.

Uwzględniając fakt, że wielomian aproksymuje tylko systematyczne zniekształcenie współrzędnych, należy dodać do odchyłki niewiadomą poprawkę przypadkową V .

Przykładowo układ równań dla aproksymacji zniekształcenia współrzędnej X według wielomianu typu 1), będzie miał postać:

$$\begin{aligned} V_1 &= A_0 + A_1 X_1 + A_2 Y_1 + A_3 X_1 Y_1 - \Delta X_1 \\ V_2 &= A_0 + A_1 X_2 + A_2 Y_2 + A_3 X_2 Y_2 - \Delta X_2 \\ \dots & \\ V_n &= A_0 + A_1 X_n + A_2 Y_n + A_3 X_n Y_n - \Delta X_n. \end{aligned} \quad (17)$$

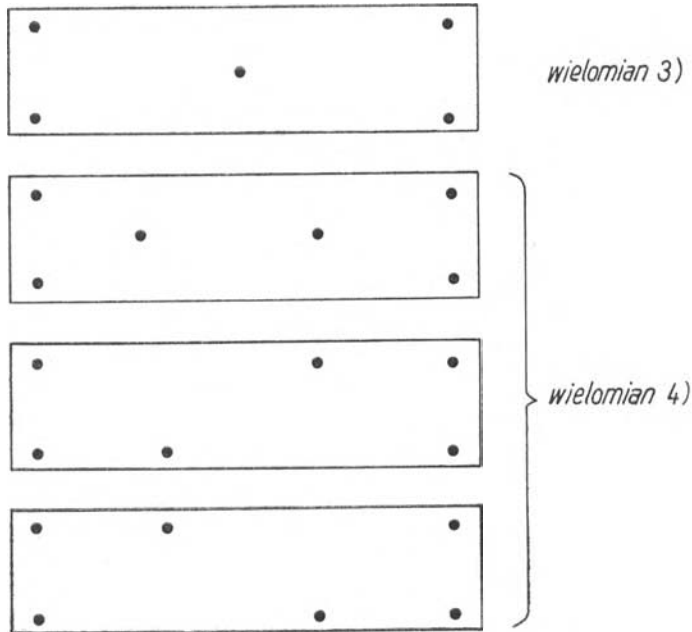
Układ rozwiązuje się zgodnie z warunkiem

$$\sum_1^n (V)^2 = \text{minimum.}$$

Jak łatwo zauważyć, z możliwością zastosowania któregoś z wielomianów wiąże się konieczność posiadania odpowiednio rozmieszczonych punk-

tów osnowy terenowej w liczbie równej co najmniej liczbie wyrazów w wybranym typie wielomianu.

Widać zatem, że w przypadku opracowywania dłuższych odcinków szeregów, gdzie uzasadnionym, a często koniecznym będzie użycie wielomianów typu 2) lub 3), otrzymamy liczbę co najmniej 5 lub 6 punktów rozmieszczonych w przybliżeniu jak na rysunku 4.



Rys. 4

Osnowa terenowa o podanej gęstości pozwoli na jednokrotne zaledwie, a zatem nie kontrolowane od strony fotogrametrycznej wyznaczenie współczynników wielomianu.

Sytuacja taka jest niekorzystna głównie ze względu na niebezpieczeństwo zinterpretowania ewentualnych błędów identyfikacji osnowy terenowej jako systematycznego zniekształcenia sieci, o ile tylko błędy te mieszczą się w dopuszczalnych dla zniekształceń wielkościach. Konsekwencją zaś mylnej interpretacji będzie spowodowanie lub powiększenie zniekształcenia sieci zamiast spodziewanej jego eliminacji.

Podniesienie stopnia pewności, a jednocześnie również dokładności wyznaczenia można uzyskać poprzez zwiększenie liczby danych terenowych. Mogą to być:

1) dodatkowe punkty osnowy terenowej o współrzędnych X, Y, H , rozmieszczone powierzchniowo na obszarze szeregu lub stanowiące zwielokrotnienie punktów w rejonach pokazanych na rysunku 4,

2) dodatkowe punkty osnowy o wyznaczonych w terenie współrzędnych X, Y lub H ,

3) inne elementy geometryczne określone w terenie i wyznaczone w wyniku rozwinięcia szeregu.

Sposób podniesienia pewności wyznaczeń, niejako konwencjonalny, a polegający na zastosowaniu punktów pierwszego rodzaju, jest najskuteczniejszy, wiąże się jednak ze stosunkowo największym wzrostem prac terenowych.

Dla umożliwienia bardziej ekonomicznego dostosowania liczby danych terenowych do charakteru zniekształceń systematycznych (z obserwacji praktycznych wynika, że sieć deformuje się najczęściej w kierunkach poprzecznych do osi szeregu) w programach przewidziano możliwość wykorzystania punktów drugiego rodzaju, tzw. fotopunktów sytuacyjnych i wysokościowych. Dodatkowo dla wzmocnienia wyznaczenia wielomianu współrzędnej Y (w układzie szeregu) stworzono możliwość wykorzystania ciągu punktów leżących we wspólnej płaszczyźnie pionowej zorientowanej w przybliżeniu wzdłuż osi szeregu.

Wykorzystanie ich polega na dołączeniu do układu równań typu (17) dodatkowych równań określających odchyłki poprzeczne tych punktów od nieokreślonej chwilowo teoretycznej linii prostej.

Przykładowo dla wielomianu typu 3) (wzory 16) równanie to będzie miało postać:

$$V_i = A_0 + A_1 \cdot X_i + A_2 \cdot Y_i + A_3 \cdot X_i \cdot Y_i + A_4 \cdot X_i^2 - A_5 - A_6 \cdot X_i, \quad (18)$$

gdzie V_i — poprzeczna odchyłka punktu wytyczonego w terenie od prostej określonej analitycznie,

$A_0 \dots A_4$ — współczynniki wielomianu systematycznego zniekształcenia sieci w kierunku osi Y ,

A_5, A_6 — współczynniki równania prostej,

X_i, Y_i — współrzędne punktów w układzie szeregu.

Dla pełnego wyjaśnienia istoty nowego elementu osnowy terenowej, jakim są punkty wytyczone wzdłuż osi szeregu, należy dodać, że:

— dla punktów tych nie wyznacza się współrzędnych w drodze pomiaru terenowego;

— istotne jest tylko to, aby leżały one wzdłuż wspólnej prostej, a ściślej mówiąc w płaszczyźnie pionowej w przybliżeniu równoległej do osi szeregu, oraz aby miały określone współrzędne względem układu szeregu;

— w szczególnym przypadku można wykorzystać dostatecznie prostoliniowe odcinki torów kolejowych lub tramwajowych, dzięki czemu odpadnie konieczność tyczenia i sygnalizowania punktów.

3. Programy obliczeń, zastosowanie i wnioski

Programy obliczeń dla maszyny ODRA 1204 z pamięcią bębnową, realizujące opisane algorytmy, opracowano w języku ALGOL 1204, nadając im symbole:

AERO-S4 program rozwinięcia szeregu,

AERO-T4 program transformacji szeregu.

Pozwalają one opracowywać odcinki szeregów złożone z 20 zdjęć po około 1000 punktów na każdym zdjęciu. Pomiaru na zdjęciach wykonywane są przy użyciu stereokomparatora STEKOMETR według opisu [2]. Ich wyniki zarejestrowane na taśmie perforowanej poddaje się wstępnemu opracowaniu i korekcji za pomocą programów KOR-SD, w przypadku gdy pomiar wykonano na diapozytywach, lub KOR-SN, gdy mierzono na negatywach. System programów KOR opisany jest w [3]. Taśma z wynikami wstępnego opracowania stanowi dane dla programu AERO-S4. Program ten, spełniając główną funkcję opisaną w poprzednich rozdziałach, posiada następujące dodatkowe możliwości, istotne z punktu widzenia potrzeb użytkownika i wygody obsługi:

— możliwość uwzględnienia wagowania równań w procesie orientacji względnej w zależności od wag nadanych obserwacjom punktów na stereogramie,

— po dostrojeniu (zorientowaniu) kolejnego zdjęcia, w przypadku przekroczenia przez którąś z paralaks szczytkowych zadanej wartości granicznej, komputer podaje przez monitor wykaz paralaks z możliwością eliminacji dowolnego równania i powtórzenia obliczeń,

— po wyskalowaniu bazy fotografowania, w przypadku wystąpienia niedopuszczalnych różnic we współrzędnych Z punktów przejściowych wyznaczanych w sąsiednich modelach, program wyprowadza wykaz wszystkich różnic z możliwością eliminacji dowolnego punktu przejściowego i powtórzenia skalowania.

Wyniki rozwinięcia szeregu, to jest współrzędne punktów względem układu szeregu, po uśrednieniu współrzędnych dwukrotnie wyznaczonych przesyłane są do pamięci bębnowej.

Dalsze opracowanie kontynuowane jest według programu AERO-T4. Po wczytaniu współrzędnych osnowy terenowej w układzie państwowym

oraz adresów danych (wyników programu AERO-S4) na bębnych, komputer wykonuje ortogonalną transformację współrzędnych terenowych do układu szeregu, po czym wyprowadza na monitor wykaz odchyłek współrzędnych przetransformowanych od współrzędnych w układzie szeregu. Operator ma przy tym dwie możliwości:

- wyeliminowanie punktów wykazujących zbyt duże rozbieżności i powtórzenie obliczeń,
- przejście do następnego etapu obliczeń.

W przypadku wybrania drugiej możliwości, komputer aproksymuje funkcję zniekształcenia systematycznego sieci wg wybranego wielomianu. Wyprowadzany jest wykaz odchyłek szcztątkowych z możliwością eliminacji punktów obarczonych zbyt dużymi odchyłkami, co do których zachodzi obawa, że mogły skazić aproksymację.

Program AERO-T4 posiada również możliwość uwzględniania lub pomijania wag nadawanych danym terenowym poszczególnych punktów osnowy terenowej, w tym również punktów leżących na prostej.

Eksperymentalne i produkcyjne zastosowania programów w Zakładzie Fotogrametrii IGiK oraz w Warszawskim Okręgowym Przedsiębiorstwie Mierniczym potwierdziły poprawność realizacji ich funkcji podstawowych oraz wskazały kierunki dalszej ich optymalizacji.

Uzyskiwane dokładności wyznaczenia położenia punktów osnowy fotogrametrycznej, określane błędami średnimi m_p w skali zdjęć, mieszczą się w granicach od 0,015 milimetrów do 0,03 milimetrów i są równorzędne dokładnościom uzyskiwanym z identycznych danych za pomocą programów aerotriangulacji blokowej.

Dzięki wykorzystaniu specyfiki sieci szeregowej oraz nieiteracyjnemu rozwiązywaniu układów równań skraca się czas wykonania obliczeń o około 30÷100%.

Na eksperymentalnym obiekcie sprawdzono poprawność i skuteczność działania warunku prostej dla zwiększenia pewności aproksymacji systematycznego zniekształcenia sieci w kierunku osi Y układu szeregu.

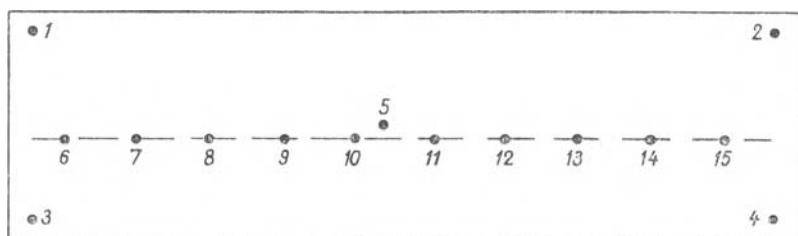
Szereg składał się z 11 zdjęć w skali około 1 : 1300. W wyniku rozwinięcia szeregu wyznaczono między innymi współrzędne 5 punktów osnowy o znanych współrzędnych terenowych oraz 10 punktów leżących na prostej wzdłuż osi szeregu.

Funkcję zniekształcenia systematycznego sieci w kierunku osi aproksymowano wielomianem typu $A_0 + A_1X + A_2Y + A_3XY + A_4X^2$.

Ustalono eksperymentalnie, że wpływ warunku prostej na wyznaczenie wielomianu uwidocznia się po nadaniu punktom prostej wag o wartości około 100 wobec 1 nadawanej pozostałym punktom.

Stwierdzono następująco, że:

- gruby błąd punktu leżącego na prostej jest łatwo wykrywalny,
- gruby błąd współrzędnej Y punktu 5 (rys. 5) w układzie szeregu lub błędy współrzędnych X, Y w układzie terenowym, zmieniające położenie punktu 5 w kierunku poprzecznym do osi szeregu, są również możliwe do zidentyfikowania,
- błędów w punktach 1, 2, 3, 4 nie można wykryć w oparciu jedynie o warunek prostej.



Rys. 5

Dodatkowym efektem eksperymentu jest stwierdzenie, że do wyznaczenia wielomianu aproksymującego zniekształcenie współrzędnej Y punktów w układzie szeregu wystarczą punkty 1, 2, 3, 4 i punkty prostej.

Podkreślenia godny wydaje się również fakt, że oparcie aproksymacji funkcji poprzecznej deformacji sieci na warunku prostej gwarantuje lepsze niż w przypadku klasycznej osnowy zachowanie prostoliniowości w obrazie kartograficznym długich prostoliniowych elementów sytuacji terenowej.

L I T E R A T U R A

- [1] *Schut G.H.*: An introduction to analytical strip triangulation with a fortran program NRC-CANADA (AP-PR34) December 1966.
- [2] *Janiszewski S.*: Technologia wykonania obserwacji kameralnych w procesie numeryczno-analitycznego opracowania bloków zdjęć lotniczych. Maszynopis.
- [3] *Mizerski W.*: Opis systemu programów wstępnej kontroli i korekcji pomierzonych współrzędnych tłowych. Maszynopis.

Recenzował: dr inż. Jan Konieczny

Rękopis złożono w Redakcji w styczniu 1975 r.

СТАНИСЛАВ ЯНИШЕВСКИ

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МАРШРУТНАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ
ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ ДЛЯ НУМЕРИЧЕСКОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ
КАРТЫ УДЛИНЕННОГО ОБЪЕКТА С ПРИМЕНЕНИЕМ
СТЕРЕОКОМПАРАТОРА СТЕКОМЕТЕР И ЕВМ ОДРА 1204

Резюме

Практическое применение блочной пространственной фототриангуляции не исключает целесообразности применения в некоторых случаях маршрутной пространственной фототриангуляции. Целесообразность применения решения маршрутной пространственной фототриангуляции, например, для удлинённых территорий, является следствием экономических и организационных вопросов.

В труде описаны два алгоритма и соответствующие вычислительные программы для ЕВМ ОДРА 1204, позволяющие развить пространственную фототриангуляцию для отдельных маршрутов, а затем преобразовать координаты к системе координат на местности.

Новым элементом алгоритма преобразования по сравнению с применявшимся до сих пор является возможность учёта так называемого условия прямой линии при определении систематической деформации сети в направлении оси Y фотограмметрической системы. Это условие позволяет отделить эффекты систематической деформации сети от возможных грубых ошибок в полевых данных.

STANISŁAW JANISZEWSKI

ANALYTIC STRIP AEROTRIANGULATION FOR NUMERICAL
MAPPING OF EXTENDED OBJECT WITH THE USE OF
STEREOCOMPARATOR STEKOMETER AND ODRA 1204 COMPUTER

Abstract

Practical use of block aerotriangulation does not eliminate the use of strip aerotriangulation in some cases. Application of the system in case of extended areas for instance is justified with economical and organization reasons.

Two algorithms and computation procedures for ODRA 1204 computer that allow the expansion of aerotriangulation in case of single strips and then to transform to the terrain system of coordinates will be discussed in this paper.

The new factor of algorithm transformation, when compared to the ones used till now, is the possibility of including so called condition of a straight line in determination of systematic deformation of the net in the direction of Y axis of the photogrammetric coordinate system. This condition allows to detect the effects of net systematic deformation and differentiate them from eventual gross in terrain data.