

Technologia numerycznego opracowania aerotriangulacji AERONET

Zarys treści. W artykule opisane są technologie numerycznego opracowania aerotriangulacji z niezależnych modeli AERONET. W części pierwszej przedstawiono ogólnie metodę wyrównania z podaniem podstawowych wzorów, w części drugiej — technologie AERONET1, AERONET2, AERONET2E i ich zastosowania.

W podsumowaniu podano ocenę dokładności wyników uzyskanych na 2 wybranych obiektach: produkcyjnym i testowym.

1. Wstęp

Od blisko 10 lat stosowana jest w Polsce na szeroką skalę metoda aerotriangulacji analitycznej z niezależnych modeli AEROBLOK. Metoda ta opracowana od strony algorytmicznej przez J. Gaździckiego [5], stała się podstawą powstania kilku technologii aerotriangulacji analitycznej, kolejno ulepszanych i dostosowywanych do dostępnego sprzętu informacyjnego i fotogrametrycznego. Autorka niniejszego artykułu opracowała kolejno technologie: AEROBLOK1, AEROBLOK2, AEROBLOK3, AEROBLOK4, AEROBLOK [10], [9], stosowane produkcyjnie w przedsiębiorstwach geodezyjno-kartograficznych, a zwłaszcza w Państwowym Przedsiębiorstwie Geodezyjno-Kartograficznym. Ostatnio zespół pracowników tego przedsiębiorstwa zmodyfikował technologię AEROBLOK nadając jej nazwę ITERBLOK.

Nowe potrzeby w zakresie produkcji eksportowej, wzrastające wymagania pod względem dokładności oraz dążenie do zmniejszenia gęstości osnowy fotogrametrycznej stały się przyczyną opracowania w latach 1976—1978 metody i technologii AERONET.

Metoda AERONET opracowana została od strony algorytmicznej przez J. Gaździckiego [6] przy wykorzystaniu ogólnych zasad wyrównania niezależnych modeli podanych przez F. Ackermanna [1].

Autorka niniejszego artykułu opracowała metodę wyrównania aerotriangulacji AERONET od strony fotogrametrycznej, a następnie przygotowała i wdrożyła do produkcji następujące technologie:

a) AERONET1 — technologia numerycznego opracowania aerotriangulacji z niezależnych modeli, dostosowana do potrzeb map średnioskalowych i realizowana na komputerze NOVA 840 [7],

b) AERONET2 — technologia numerycznego opracowania aerotriangulacji z niezależnych modeli, dostosowana do opracowań wielkoskalowych i realizowana na komputerze NOVA 840 [8],

c) AERONET2E — technologia numerycznego opracowania aerotriangulacji z niezależnych modeli dostosowana do opracowań wielkoskalowych i realizowana na komputerze ECLIPSE C/300.

Przy opracowaniu technologii AERONET zwrócono szczególną uwagę na problemy gromadzenia, kontroli, przetwarzania i ochrony dużej liczby danych źródłowych i wyników. Do tego celu szeroko wykorzystano koncepcję banków danych.

W artykule wyróżnić należy dwie zasadnicze części. W pierwszej przedstawia się w sposób ogólny metodę wyrównania AERONET, w drugiej — technologie numerycznego opracowania aerotriangulacji i systemy programów.

2. Metoda wyrównania aerotriangulacji AERONET

2.1. Konstrukcja sieci

Metoda AERONET przeznaczona jest do numerycznego opracowania sieci aerotriangulacji zbudowanych z niezależnych modeli. Modele niezależne otrzymuje się z odpowiednich obserwacji negatywów lub diapozytywów zdjęć lotniczych na stereokomparatorach (*stekometr*, *PSK-2*) i autografach (*Wild A10*, *A8*).

W sieciach opracowywanych metodą AERONET wyróżnia się *punkty aerotriangulacyjne*, których współrzędne biorą udział w wyrównaniu, a także tzw. *punkty dodatkowe*, których liczba może osiągać kilkaset na jednym modelu.

Wśród punktów aerotriangulacyjnych wyróżnia się:

- punkty wiążące,
- środki rzutów,
- punkty terenowej osnowy fotogrametrycznej, tj. punkty dla których były wyznaczone w bezpośrednim pomiarze wszystkie lub wybrane współrzędne, a mianowicie:

x, y, z — *F*-punkty,

x, y — *P*-punkty,

z — *Z*-punkty.

W metodzie AERONET nie obowiązują żadne specjalne żądania co do ilości i rozmieszczenia punktów osnowy, należy jednak pamiętać, że od ilości, rozmieszczenia i dokładności wyznaczenia współrzędnych tych punktów zależy w dużym stopniu ostateczna dokładność aerotriangulacji.

2.2. Opis metody

W metodzie AERONET wyrównaniu poddawane są bloki utworzone z *segmentów*.

Segmentem nazywa się zbiór współrzędnych punktów x, y, z wyrażonych w jednym układzie współrzędnych i określający położenie punktów należących do jednego stereogramu lub do kilku odpowiednio przetransformowanych, kolejnych modeli jednego szeregu.

Podstawą procesu jest minimalizacja funkcji:

$$[pvv] = W(\dots a_j, b_j, c_j, r_j, A_j, B_j, C_j \dots x_i, y_i, z_i)$$

gdzie

$a_j, b_j, c_j, r_j, A_j, B_j, C_j$ — parametry transformacji j -tego segmentu ($j = 1, 2, \dots, l$),

x_i, y_i, z_i — wyznaczone współrzędne i -tego punktu aerotriangulacyjnego ($i = 1, 2, \dots, n$),

p, v — ogólnie stosowane oznaczenia wag i poprawek wyrównywanych współrzędnych.

Uwzględniając doświadczenia zagraniczne [1] w metodzie AERONET proces przestrzennego wyrównania xyz został rozdzielony na dwa niezależne wyrównania, a mianowicie:

— płaskie wyrównanie x, y wykonywane przy założeniu, że segmenty są spoziomowane,

— wyrównanie wysokościowe z wykonywane przy założeniu, że znane są współrzędne płaskie x, y wszystkich punktów aerotriangulacyjnych w bloku.

Powyższe założenia i podział sprawiły, że wyrównanie stało się procesem iteracyjnym. Doświadczenia praktyczne wskazują, że dla pełnego wyrównania bloku należy wykonać od 3 do 5 iteracji, z których każda składa się z wyrównania x, y i wyrównania z .

Podział wyrównania na etapy x, y i z , a także przyjęcie jako jednostki wyrównywanej segmentu, doprowadziło do tego, że metoda AERONET posiada wielorakie zastosowania, m.in. pozwala w zależności od potrzeb, danych źródłowych i dalszego przeznaczenia wyników, na:

- wyrównanie płaskie lub przestrzenne aerotriangulacji,
- wyrównywanie bloków z pełną dokładnością przy zastosowaniu modelu jako wyrównywanego segmentu,
- wykonywanie różnego rodzaju wyrównań przybliżonych,
- wykonanie kontroli współrzędnych terenowej osnowy fotogrametrycznej i eliminacji błędów w tej osnowie.

*Utworzenie zredukowanych równań normalnych dla wyrównania
płaskiego x, y*

Układ zredukowanych równań normalnych ma postać

$$\mathbf{U} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{L} = 0,$$

$\mathbf{U}$ — kolumna czwórek parametrów transformacyjnych p, q, x_0, y_0
dla n segmentów w bloku

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_j \\ \vdots \\ \mathbf{U}_k \\ \vdots \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U}_j = \begin{bmatrix} p_j \\ q_j \\ x_{0j} \\ y_{0j} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U}_k = \begin{bmatrix} p_k \\ q_k \\ x_{0k} \\ y_{0k} \end{bmatrix}$$

j, k — numery segmentów znajdujących się w uporządkowanym zbiorze segmentów,

$\mathbf{B}$ — symetryczny krakowian utworzony z n^2 tablic, z których każda ma cztery kolumny i cztery wiersze

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \mathbf{B}_{jj} & \dots & \mathbf{B}_{kj} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \mathbf{B}_{jk} & \dots & \mathbf{B}_{kk} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

$\mathbf{B}_{jj}$ — tablica przekątna wpisana bez elementów poniżej głównej przekątnej

$$\mathbf{B}_{jj} = \begin{bmatrix} B_{jj,1} & 0 & B_{jj,3} & B_{jj,4} \\ & B_{jj,1} & -B_{jj,4} & B_{jj,3} \\ & & B_{jj,2} & 0 \\ & & & B_{jj,2} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{B}_{jk}$ — tablica pozaprzekątna

$$\mathbf{B}_{kj} = \begin{bmatrix} B_{kj,1} & B_{kj,2} & B_{kj,4} & B_{kj,5} \\ -B_{kj,2} & B_{kj,1} & B_{kj,5} & B_{kj,4} \\ B_{kj,6} & B_{kj,7} & B_{kj,3} & 0 \\ -B_{kj,7} & B_{kj,6} & 0 & B_{kj,3} \end{bmatrix}$$

przy czym $B_{jk} = \tau \cdot B_{kj}$

$\mathbf{L}$ — kolumna wyrazów wolnych

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \dots \\ \mathbf{L}_j \\ \dots \\ \mathbf{L}_k \\ \dots \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_j = \begin{bmatrix} L_{j1} \\ L_{j2} \\ L_{j3} \\ L_{j4} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_k = \begin{bmatrix} L_{k1} \\ L_{k2} \\ L_{k3} \\ L_{k4} \end{bmatrix}$$

Transformacja płaska współrzędnych w segmentach

Transformację płaską współrzędnych wszystkich punktów segmentu wykonuje się wg poniższych wzorów:

$$x'_{ij} = -x_{ij} \cdot p_j + y_{ij} \cdot q_j + x_{0j}$$

$$y'_{ij} = -y_{ij} \cdot p_j - x_{ij} \cdot q_j + y_{0j}$$

$$z'_{ij} = z_{ij} \sqrt{p_j^2 + q_j^2}$$

Utworzenie zredukowanych równań normalnych dla wyrównania wysokościowego

Układ zredukowanych równań normalnych ma postać:

$$\mathbf{W} \cdot \mathbf{C} + \mathbf{L}' = \mathbf{0},$$

gdzie

$\mathbf{W}$ — kolumna trójek parametrów transformacyjnych a , b , z_0 dla n segmentów w bloku

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \dots \\ \mathbf{W}_j \\ \dots \\ \mathbf{W}_k \\ \dots \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W}_j = \begin{bmatrix} a_j \\ b_j \\ z_{0j} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W}_k = \begin{bmatrix} a_k \\ b_k \\ z_{0k} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{C}$ — symetryczny krakowian utworzony z n^2 tablic, z których każda ma 3 kolumny i 3 wiersze:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \mathbf{C}_{jj} & \dots & \mathbf{C}_{kj} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \mathbf{C}_{jk} & \dots & \mathbf{C}_{kk} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

$\mathbf{C}_{jj}$ — tablica przekątna wpisana bez elementów poniżej głównej przekątnej

$$\mathbf{C}_{jj} = \begin{bmatrix} C_{jj,1} & C_{jj,2} & C_{jj,3} \\ & C_{jj,4} & C_{jj,5} \\ & & C_{jj,6} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{C}_{kj}$ — tablica pozaprzekątna

$$\mathbf{C}_{kj} = \begin{bmatrix} C_{kj,1} & C_{kj,2} & C_{kj,3} \\ C_{kj,4} & C_{kj,5} & C_{kj,6} \\ C_{kj,7} & C_{kj,8} & C_{kj,9} \end{bmatrix}$$

przy czym $C_{jk} = \tau \cdot C_{kj}$

$\mathbf{L}'$ — kolumna wyrazów wolnych

$$\mathbf{L}' = \begin{bmatrix} \dots \\ \mathbf{L}_j \\ \dots \\ \mathbf{L}_k^i \\ \dots \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}_j' = \begin{bmatrix} L_{j1}' \\ L_{j2}' \\ L_{j3}' \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_k' = \begin{bmatrix} L_{k1}' \\ L_{k2}' \\ L_{k3}' \end{bmatrix}$$

Transformacja przestrzenna segmentów

Transformację przestrzenną współrzędnych wszystkich punktów segmentu wykonuje się wg wzoru

$$\begin{bmatrix} x_{ij}'' \\ y_{ij}'' \\ z_{ij}'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{0j} \end{bmatrix} + \frac{1}{D} \begin{bmatrix} x_{ij}' \\ y_{ij}' \\ z_{ij}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{4} a^2 - b^2 & \frac{1}{2} ab & -b \\ \frac{1}{2} ab & 1 + \frac{1}{4} b^2 - a^2 & a \\ b & -a & 1 - \frac{1}{4} a^2 + b^2 \end{bmatrix}$$

$$D = 1 + \frac{1}{4} (a^2 + b^2)$$

Rozwiązanie układu równań normalnych

Układy równań normalnych rozwiązuje się metodą pierwiastka krakowianowego wg zmodyfikowanego algorytmu umożliwiającego eliminację nieznaczących elementów zerowych w układzie [2], [4].

Obliczenie współrzędnych wyrównanych

Współrzędne ostateczne wszystkich punktów w bloku oblicza się wg wzorów

$$x_i = \frac{1}{n_i} \left[\sum_{j \in S} x_{ij} + \beta \cdot w \cdot X_i \right]$$

$$y_i = \frac{1}{n_i} \left[\sum_{j \in S} y_{ij} + \beta \cdot w \cdot Y_i \right]$$

$$z_i = \frac{1}{n_i} \left[\sum_{j \in S} z_{ij} + \delta \cdot c \cdot Z_i \right]$$

gdzie

β i δ współczynniki przyjmujące wartość:

$$\beta = \begin{cases} 1 & \text{— dla } F \text{ i } P\text{-punktów,} \\ 0 & \text{— dla pozostałych punktów w bloku,} \end{cases}$$

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{— dla } F \text{ i } Z\text{-punktów,} \\ 0 & \text{— dla pozostałych punktów w bloku,} \end{cases}$$

w, c — wagi współrzędnych płaskich X i Y oraz rzędnej Z punktów osnowy terenowej,

n_i — ilość segmentów, w których znajduje się i -ty punkt.

Ocena dokładności

Błędy średnie wyznaczenia współrzędnych x, y, z w bloku aerotriangulacji oblicza się wg wzorów:

$$m_x^2 = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j \in S} (x_{ij} - x_i)^2 + \beta \sum_{i \in F} (X_i - x_i)^2 \right]$$

$$m_y^2 = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j \in S} (y_{ij} - y_i)^2 + \beta \sum_{i \in F} (Y_i - y_i)^2 \right]$$

$$m_z^2 = \frac{1}{N_z} \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j \in S} (z_{ij} - z_i)^2 + \delta \sum_{i \in F} (Z_i - z_i)^2 \right]$$

$$m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}$$

gdzie

N, N_z — ilość obserwacji nadliczbowych odpowiednio w wyrównaniu płaskim i wyrównaniu wysokościowym,

m — ilość punktów aerotriangulacyjnych w bloku.

Jednym z kryteriów zakończenia procesu obliczeniowego jest niezmiennosc, w ramach założonej dokładności, wartości odpowiednich błędów średnich, a mianowicie:

— przy wyrównaniu przestrzennym, wartości m_{xy} policzonej w kolejno wykonywanych wyrównaniach x, y i z (ta sama iteracja),

— przy wyrównaniu płaskim, wartości m_{xy} policzonej z dwu ostatnich wyrównań x, y ($n-1$ i n -ta iteracja).

2.4. Stosowane układy współrzędnych

W metodzie AERONET, w zależności od przyjętego wariantu technologicznego wykonywania obserwacji i wyrównania, stosuje się następujące ortogonalne, prawoskrętne układy współrzędnych:

1) lokalny, autogrametryczny układ współrzędnych modelu niezależnego obserwowanego bezpośrednio na autografie; współrzędne punktów w tym układzie przedstawione są w skali modelu,

2) lokalny układ współrzędnych modelu niezależnego otrzymany na drodze numerycznego opracowania obserwacji stereogramów na stereokomparatorze; współrzędne punktów wyrażone są w przybliżeniu w skali terenowej,

3) lokalny, terenowy układ współrzędnych,

4) państwowy układ współrzędnych w odwzorowaniu Gaussa-Krügera odniesiony do odpowiedniej elipsoidy,

5) układ geocentryczny.

Obowiązują następujące zasady przy stosowaniu powyższych układów:

1) dopuszcza się jednoczesne stosowanie obu rodzajów obserwacji (układy 1 i 2) w jednym bloku aerotriangulacji,

2) dla opracowań wielkoskalowych można przyjąć 3 lub 4 rodzaj układu, przy tym nie istnieje konieczność posiadania przybliżonych współrzędnych punktów aerotriangulacyjnych,

3) dla prac topograficznych wyrównanie bloków prowadzi się w odpowiednio dobranym układzie geocentrycznym, stąd wynika konieczność:

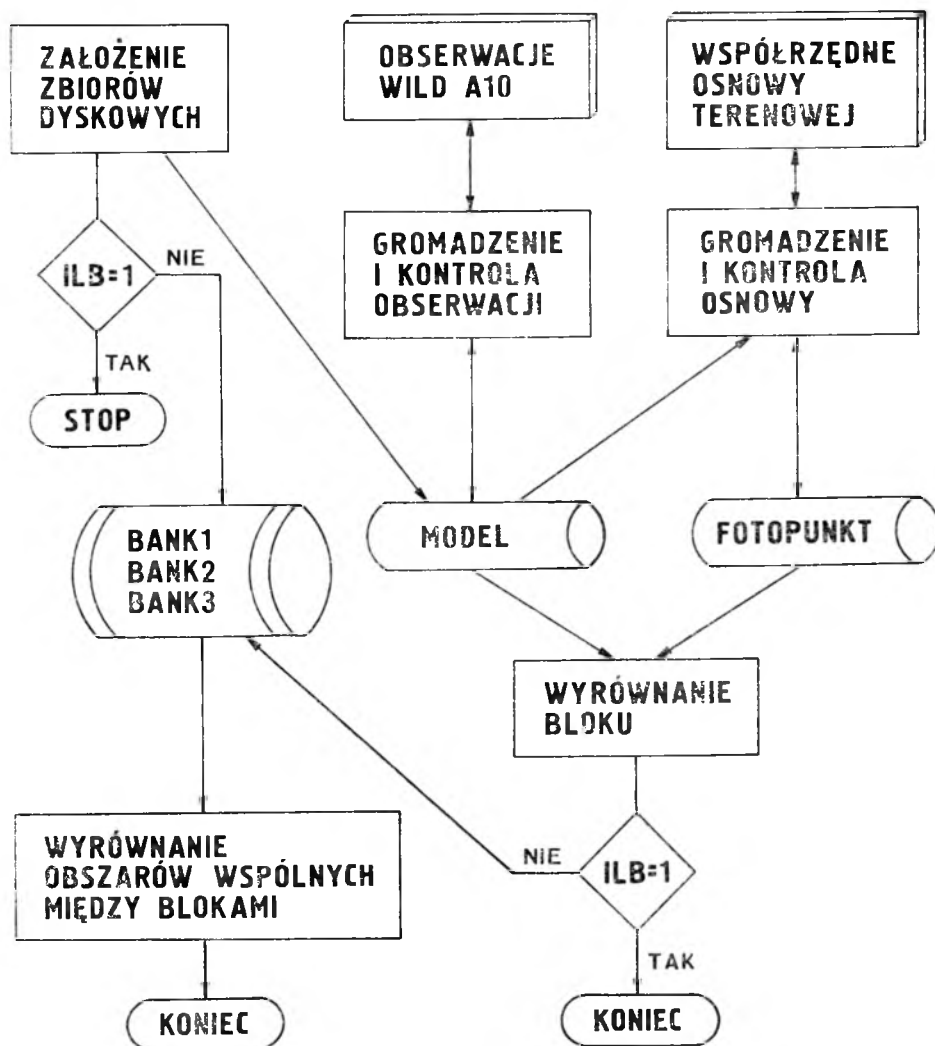
- przyjęcia państwowego układu współrzędnych,
- posiadania przybliżonych współrzędnych dla P i Z -punktów.

3. Systemy programów AERONET

3.1. Informacje ogólne

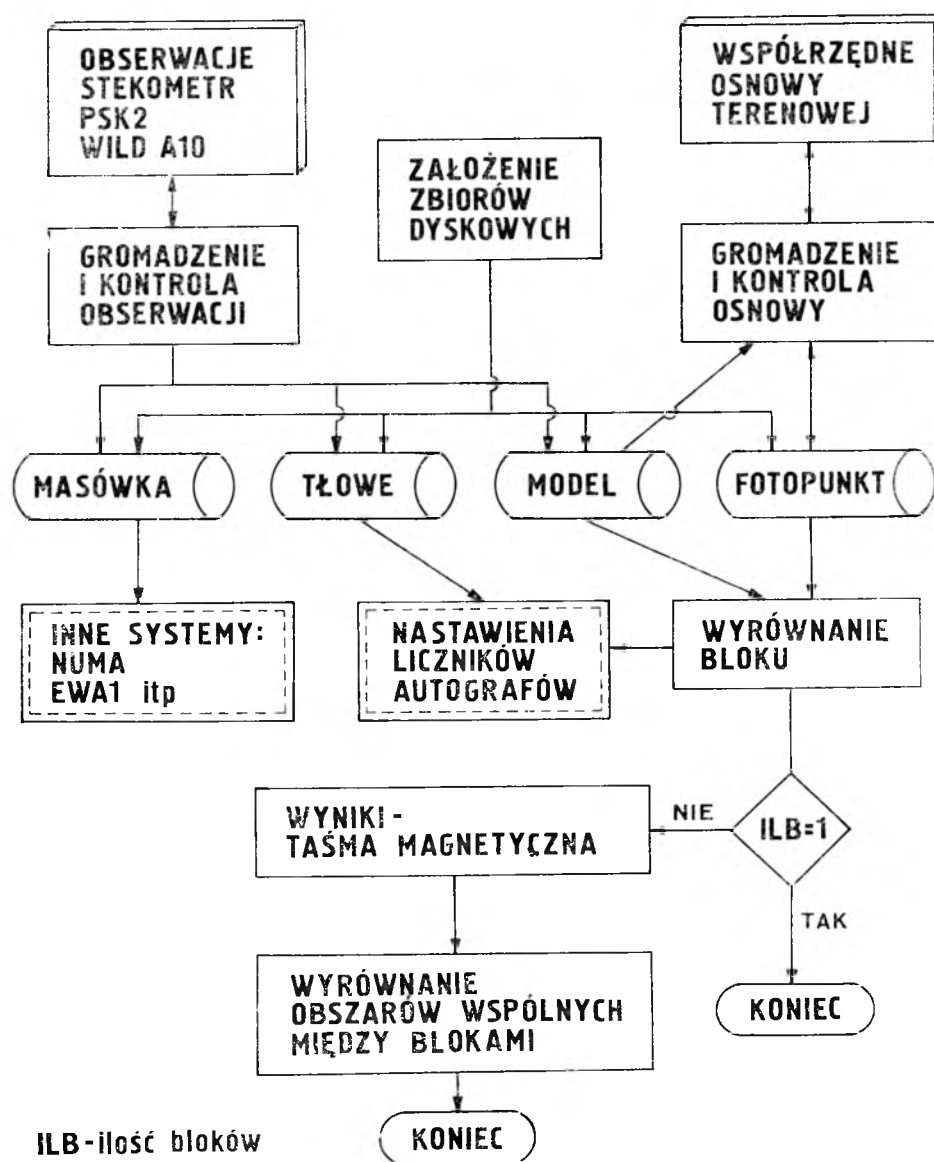
Tak jak to było zasygnalizowane we wstępie, współczesna technologia numerycznego opracowania aerotriangulacji powinna kompleksowo rozwiązywać zadania:

- gromadzenia,
- kontroli,
- przetworzenia,
- ochrony dużej liczby danych źródłowych i wyników.

SCHEMAT OGÓLNY SYSTEMU AERONET1

ILB - ilość bloków

SCHEMAT OGÓLNY SYSTEMÓW AERONET2 I AERONET2E



W celu spełnienia przedstawionych wyżej warunków konieczne jest dysponowanie odpowiednim sprzętem komputerowym, dającym możliwość operowania dużymi zbiorami danych.

Technologie AERONET zostały opracowane dla minikomputerów NOVA 840 i ECLIPSE C/300 w konfiguracji obejmującej pamięci dyskowe i taśmy magnetyczne.

Zgodnie z podanymi wyżej założeniami, w oprogramowaniu wyróżnia się:

- bank danych źródłowych,
- programy wyrównania aerotriangulacji,
- bank wyników.

Podczas procesów obliczeniowych dane zawarte w wymienionych bankach są sukcesywnie uzupełniane, kontrolowane i modyfikowane. Tak zorganizowana struktura oprogramowania, szczególnie ważna przy opracowaniu dużych obszarów, umożliwia:

- jednoczesne wykonywanie pomiaru polowej osnowy fotogrametrycznej, obserwacji modeli i opracowania numerycznego,
- ciągłą kontrolę obserwacji oraz współrzędnych punktów polowej osnowy fotogrametrycznej dającą możliwość szybkiego podejmowania decyzji co do konieczności powtarzania pomiaru,
- elastyczne operowanie materiałem obserwacyjnym, np. dopiero na etapie opracowania numerycznego następuje podział na bloki, a ich zasięg może być zmieniony w miarę potrzeb.

3.2. Programy banku danych źródłowych

Programy założenia zbiorów na dane źródłowe

Najważniejszymi zbiorami są:

MODEL — zbiór modeli niezależnych.

Zbiór może zawierać do około 10 000 modeli, umieszczone są w nim tylko dane o punktach aerotriangulacyjnych. Obserwacje punktów dodatkowych gromadzi się w oddzielnym zbiorze o nazwie MASÓWKA i przebiega w oddzielnym procesie obliczeniowym, a ich liczba może dochodzić do 700 na jednym modelu.

FOTOPUNKT — zbiór terenowej osnowy fotogrametrycznej.

Program obliczenia modeli niezależnych na podstawie obserwacji negatywów lub diapozytywów zdjęć lotniczych na stekometrze lub PSK2

Najważniejszymi etapami obliczeń są:

- uśrednienie obserwacji wielokrotnych z automatyczną eliminacją błędów i obliczeniem współrzędnych tłowych punktów na zdjęciach,
- korekcja współrzędnych tłowych punktów ze względu na wpływ błędów systematycznych z wykorzystaniem danych z kalibracji kamery (skurcz filmu, dystorsja, krzywizna Ziemi, refrakcja),
- obliczenie elementów orientacji wzajemnej,
- wyznaczenie współrzędnych środków rzutów i pozostałych punktów w lokalnym układzie modelu,
- umieszczenie modelu w zbiorze MODEL.

Program obliczenia niezależnych modeli na podstawie obserwacji negatywów lub diapozytywów zdjęć lotniczych na autografie Wild A10

Program obejmuje:

- obliczenie współrzędnych środków rzutów na podstawie obserwacji tzw. *siatek kwadratów*,
- uśrednienie obserwacji wielokrotnych z automatyczną eliminacją błędów,
- uzupełnienie modeli odpowiednimi współrzędnymi środków rzutów i umieszczenie ich w zbiorze MODEL.

Ponieważ przy przestrzennym wyrównaniu aerotriangulacji niezbędna jest znajomość współrzędnych środków rzutów modelu, opracowano metodę ich wyznaczania, a także zasady wykonywania obserwacji na autografach [12].

Na modelu testowym, tj. modelu zbudowanym na płytach szklanych z siatką kwadratów, wykonuje się obserwacje 6 punktów charakterystycznych i 2 krzyży na nośnikach zdjęć. Modelowi testowemu odpowiada *model teoretyczny*. Poprzez kolejne dwie transformacje przestrzenne (liniowe) określa się współrzędne środków rzutów w układzie autografu. Po zakończeniu obserwacji modelu testowego następują obserwacje modeli fotogrametrycznych, przy czym niezmiennicze muszą pozostać ogniskowa, składowe bazy i ω lewego zdjęcia.

Częstotliwość określania współrzędnych środków rzutów zależy od stanu rektyfikacji autografu, np. obserwacje modeli testowych były wykonywane raz na około 600—700 modeli rzeczywistych w pracach prowadzonych w Iraku.

Program gromadzenia współrzędnych terenowej osnowy fotogrametrycznej w zbiorze FOTOPUNKT

Program umożliwia:

- sukcesywne dopisywanie do zbioru FOTOPUNKT współrzędnych punktów,
- poprawianie błędów we współrzędnych punktów zapisanych do zbioru wcześniej,
- druk zawartości zbioru.

Program kontroli formalnej danych umieszczonych w zbiorze MODEL

W wariancie technologicznym AERONET1 przystosowanym do opracowań topograficznych, obowiązują specjalne zasady numeracji szeregów, modeli i punktów, związane z numerem odfotografowanym na zdjęciu. Pozwala to na stosunkowo prostą i szczegółową kontrolę prawidłowości tej numeracji.

W wariancie technologicznym AERONET2 dopuszcza się swobodną numerację modeli i punktów. Kontrola polega na:

- sprawdzeniu, w ilu modelach był zaobserwowany punkt z jednym i tym samym numerem,
- sprawdzeniu, czy jego położenie w oddzielnych modelach w szeregu i w różnych szeregach jest poprawne.

W obu przypadkach wykryte niezgodności umieszcza się na tzw. liście błędów.

Program kontroli modeli niezależnych w pokryciu podłużnym w szeregach

Kontrola polega na wielokrotnym wykonaniu liniowej transformacji przestrzennej, tj.:

- transformacji par modeli (modelu następnego na układ modelu poprzedniego w szeregu) w celu utworzenia listy błędów,
- transformacji każdego kolejnego modelu do układu modelu pierwszego w szeregu w celu utworzenia szeregów niezależnych.

Program kontroli pokrycia poprzecznego między szeregami

Kontrola polega na wykonaniu dla odpowiednich par szeregów kolejno:

- liniowej transformacji przestrzennej,
- transformacji wielomianowej 2 lub 3 stopnia.

W transformacji pierwszej wykrywano błędy grube i omyłki, w drugiej niedopuszczalne różnice obserwacji, a następnie zestawia się listę błędów.

Program modyfikacji w zbiorze MODEL

Program służy do:

— wprowadzania odpowiednich zmian w zbiorze wg *list błędów* otrzymywanych na różnych etapach kontroli; generalnie obowiązuje zasada, że następną kontrolę wykonuje się tylko po usunięciu błędów etapu wcześniejszego,

— druku informacji z żądanych obszarów zbioru MODEL.

W technologii AERONET automatyczną eliminację błędów stosuje się w ograniczonym zakresie. Ze względu na rodzaj zastosowanego sprzętu, a także oprogramowania podstawowego, przyjęto za celowe danie możliwości wprowadzania poprawek w reżimie konwersacyjnej pracy operatora systemu z komputerem. Operator wykorzystuje wydrukowane przez komputer informacje, najczęściej w postaci *listy błędów*. Na podstawie analizy tych list podejmuje się decyzje co do konieczności powtórzenia obserwacji i pomiarów, a także możliwości eliminacji punktów. W ten sposób zapobiega się:

— usuwaniu punktów niezbędnych w sieci,
— zbędnemu przedłużaniu procesu z niepełnymi, niewłaściwymi danymi.

3.3. Programy wyrównania aerotriangulacji

Program przygotowania bloku do wyrównania

Dopiero na tym etapie obliczeń określa się blok aerotriangulacji. W specjalnym *planie* podaje się numery szeregów i przedziały numerów modeli w tych szeregach. Pozwala to na wykonanie następujących czynności:

- wybór ze zbioru MODEL odpowiednich modeli,
- wybór ze zbioru FOTOPUNKT odpowiednich punktów osnowy,
- sygnalizację błędów i braków w powyższych danych,
- utworzenie segmentów o żądanej wielkości, lub przygotowanie modeli przy mieszanych cyklach wyrównania,
- przygotowanie zbiorów roboczych.

Program wyrównania bloku aerotriangulacji

Program realizuje metodę wyrównania AERONET, przedstawioną w rozdziale 2. W wyniku otrzymuje się wykaz współrzędnych wszystkich punktów aerotriangulacyjnych w bloku, a także analizę dokładności dla całego bloku i poszczególnych punktów.

W systemie AERONET można jednorazowo opracować bloki zbudowane maksymalnie z 300 segmentów. Podczas wyrównania tak dużych bloków należy rozwiązywać wielokrotnie układy równań z około 1000 niewiadomych. Na podstawie doświadczeń zagranicznych [1] wiadomo, że do rozwiązywania tego typu zadań stosowano dotychczas tylko duże komputery, np. typu CDC 6600. Celem skrócenia czasu obliczeń na stosunkowo wolnym minikomputerze NOVA 840 zastosowano optymalizowany algorytm opracowania danych, polegający na wykonaniu pierwszych dwóch — trzech iteracji w segmentach składających się z 2 lub 3 modeli. Wyrównanie oddzielnych modeli niezależnych wykonywane jest tylko raz w ostatniej iteracji. Przynosi to znaczne efekty ekonomiczne, nie obniżając dokładności wyników.

3.4. Programy banku wyników

W technologii AERONET1 wyniki wyrównania gromadzone są w zbiorach dyskowych o nazwach BANK1, BANK2, BANK3.

W zbiorach tych zapisuje się:

- wyniki wyrównania bloku, tj. wyrównane współrzędne wszystkich punktów aerotriangulacyjnych; dla punktów położonych przy granicy stref odwzorowawczych podawane są współrzędne w obu strefach,
- parametry określające typ i zasięg bloku,
- ostateczne współrzędne punktów aerotriangulacyjnych w bloku, otrzymane po uzgodnieniu obszarów wzajemnego pokrywania się bloków.

W technologii AERONET2 i AERONET2E wyrównane bloki są gromadzone w sposób uporządkowany na taśmach magnetycznych. Blok identyfikuje się w wyżej wymienionych zbiorach za pomocą jego numeru.

Program gromadzenia wyrównanych bloków

Program umożliwia:

- sukcesywne dopisywanie wyrównanych bloków do zbioru BANK1, BANK2, BANK3,
- usuwanie ze zbiorów bloków, dla których wykonano ponowne wyrównanie,
- wydruk wykazu współrzędnych dopisanego bloku.

Programy uzgodnienia obszarów wzajemnego pokrywania się bloków

W technologii AERONET1, tj. przy opracowaniach topograficznych przyjmuje się duże obszary wzajemnego pokrycia między blokami. Osia-

ga ona wielkości odpowiednio: po 2 szeregi lub po 4 modele w każdym szeregu (po dwa na skrajach bloku).

W technologii AERONET2 i AERONET2E, tj. w opracowaniach wielkoskalowych dopuszcza się dowolność w przyjmowaniu obszaru wzajemnego pokrycia między blokami. Ostateczne wartości współrzędnych otrzymuje się w uzupełniających procesach wyrównawczych, polegających na obliczeniu ogólnych wagowanych średnich arytmetycznych, o wagach zależnych od położenia punktu

Program tworzenia ostatecznych wykazów współrzędnych

Program daje możliwość otrzymania wykazów współrzędnych wg wcześniej zadanego podziału, np. w arkuszach mapy o zadanej skali. Dopuszcza się wydruk:

- wybranych arkuszy,
- wybranych grup arkuszy,
- kompletnej zawartości zbioru.

4. Podsumowanie

Przedstawione technologie aerotriangulacji są wykorzystywane produkcyjnie.

AERONET1 posłużył w szczególności do wyrównania sieci aerotriangulacji obejmującej:

- 4 600 zdjęć lotniczych w skali 1 : 50 000 wykonanych kamerą nadszerokokątną o ogniskowej 83,23 mm i formacie zdjęć 23×23 cm,
- 16 000 punktów wiążących nakłutych na zdjęciach za pomocą instrumentu *PUG2*,
- 4 600 środków rzutów,
- 1 100 identyfikowanych na zdjęciach i pomierzonych w terenie *F*, *P* i *Z*-punktów,
- 40 bloków o przeciętnej wielkości 150 modeli.

Otrzymane praktycznie dokładności można charakteryzować na 2 przykładach opracowanych przy użyciu wariantu technologicznego AERONET2, a mianowicie:

- obiektu produkcyjnego (kamera szerokokątna, $f = 152$ mm, skala zdjęć 1 : 8000, blok 101 modeli, $q = 30\%$, 30 *F*-punktów, 44 *P*-punktów kontrolnych, 45 *Z*-punktów kontrolnych),
- obiektu przygotowanego przez IGiK (kamera szerokokątna, $f =$

= 152 mm, skala zdjęć 1 : 3000, blok 56 modeli, $q = 60\%$, 17 F -punktów, 19 P -punktów kontrolnych, 302 Z -punkty kontrolne).

Otrzymano następujące wielkości błędów średnich, obliczone na podstawie porównania współrzędnych wyrównanych i geodezyjnych punktów kontrolnych:

a) wyrażone w mikrometrach w skali zdjęcia

— obiekt produkcyjny:

$$m_x = 0,009 \quad m_y = 0,009 \quad m_z = 0,019$$

— obiekt IGiK:

$$m_x = 0,013 \quad m_y = 0,012 \quad m_z = 0,013$$

b) wyrażone w centymetrach w terenie

— obiekt produkcyjny:

$$m_x = 7,5 \quad m_y = 7,5 \quad m_z = 15,3$$

— obiekt IGiK:

$$m_x = 4,0 \quad m_y = 3,6 \quad m_z = 4,0$$

Jak widać z powyższego zestawienia osiągnięto wysoką dokładność wyników wyrównania dla obu obiektów, przy czym wyraźnie lepszą dokładność wyrównania wysokościowego dla obiektu przygotowanego przez IGiK.

W podsumowaniu można stwierdzić, że technologie AERONET zapewniają uzyskiwanie wyników o dużych dokładnościach, ale tylko wówczas, kiedy dane początkowe (obserwacje i współrzędne terenowe) charakteryzują się odpowiednią jakością.

LITERATURA

- [1] Ackermann F.: *Aerotriangulation mit unabhängigen modellen*. Bildmessung und Luftbildwesen nr 4, 1970.
- [2] Deryło-Stępnia J.: *O pewnych metodach wyrównania sieci triangulacyjnych z zastosowaniem komputerów*. Rozprawa doktorska, CIGiK, Warszawa 1977.
- [3] Gaździcki J.: *An algorithm of simultaneous multiple transformations*. CIGiK, Warszawa 1977.
- [4] Gaździcki J.: *Informatyka w geodezji i kartografii*. PPWK, Warszawa 1975.
- [5] Gaździcki J.: *Numeryczne opracowanie aerotriangulacji przestrzennej metodą AEROBLOK*. Prace IGiK, tom XX, zeszyt 1(46), 1973.
- [6] Gaździcki J.: *System wyrównania aerotriangulacji AERONET — metoda i podstawowe wzory*. CIGiK, Warszawa 1976, praca nie publikowana.
- [7] Musiał E.: *AERONET1 — system wyrównania aerotriangulacji z niezależnych modeli*. Dokumentacja systemu. CIGiK, Warszawa 1976.

- [8] Musiał E.: *AERONET2 — system wyrównania aerotriangulacji z niezależnych modeli*. Dokumentacja systemu. CIGiK, Warszawa 1978.
- [9] Musiał E.: *Nowy system aerotriangulacji z niezależnych modeli — AEROBLOK*. Przegląd Geodezyjny nr 2, 1976.
- [10] Musiał E., Rymarowicz A.: *Technologia aerotriangulacji z niezależnych modeli — AEROBLOK*. Przegląd Geodezyjny nr nr 5, 7, 9, 1973.
- [11] Orzechowski J., Rymarowicz A.: *Numeryczne, blokowe wyrównanie szeregów aerotriangulacji przestrzennej*. Biuletyn Postępu Technicznego PPF, 1966.
- [12] Rymarowicz A.: *Warunki techniczne wykonania obserwacji na autografie Wild A10 aerotriangulacji przestrzennej metodą modeli niezależnych*. Bagdad 1975, maszynopis.

Recenzował: prof. dr hab. Jerzy Gaździcki

ЕВА МУСЯЛ

ТЕХНОЛОГИЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ
АЭРОТРИАНГУЛЯЦИИ AERONET

Резюме

Уже почти 10 лет применяется в Польше в широком масштабе метод аналитической аэротриангуляции из независимых моделей AEROBLOK. Новые нужды в области экспортной продукции, а особенно возрастающие требования относительно точности, явились причиной разработки в 1976—1978 годах метода и технологии AERONET.

Методы был разработан с алгоритмической стороны Е. Газьдзицким, а с фотограмметрической стороны автором данной статьи, которая также приготовила и внедрила в производство технологии AERONET 1, AERONET 2, AERONET 2E.

Технологии эти приспособлены для крупномасштабных и среднемасштабных работ и реализуются на разных компьютерах, т.е. NOVA 840 и ECLIPSE C/300.

В статье изложены поочередно:

- метод уравнивания AERONET,
- технология цифровой обработки аэротриангуляции и системы программ.

В методе AERONET уравниванию подлежат блоки, построенные из сегментов. Сегментом называется файл координат пунктов xuz , выраженных в единой системе координат и определяющих положение пунктов, принадлежащих к одной стереограмме или к нескольким соответственно преобразованным очередным моделям одного маршрута.

Метод AERONET является итерационным горизонтально-вертикальным уравниванием, в котором все параметры трансформации сегментов определены одновременно путем решения больших систем нормальных уравнений. Практический опыт указывает, что уравнивание замыкается числом от 3 до 5 итераций.

В технологическом варианте AERONET 1, приспособленном для топографических работ, уравнивание происходит в соответствующей геоцентрической системе.

Наиважнейшими этапами процесса уравнивания являются:

- 1) трансформация и нормализация геодезических координат,
- 2) нормализация координат в сегментах,
- 3) создание нормальных уравнений для горизонтального уравнивания xu ,
- 4) плоская трансформация сегментов,
- 5) создание нормальных уравнений для вертикального уравнивания z ,
- 6) пространственная трансформация сегментов,
- 7) решение системы нормальных уравнений методом краевянного корня,
- 8) вычисление координат уравнивания, оценка точности, упорядочение результатов анализа, принятие решения относительно продолжения процесса,
- 9) вычисление окончательных координат аэротриангуляционных пунктов.

Технология цифровой обработки аэротриангуляции AERONET комплексно решает задачи сбора, контроля, обработки и хранения большого числа исходных данных и результатов. С этой целью в программировании выделяются:

- банк исходных данных,
- программы уравнивания аэротриангуляции,
- банк результатов.

По мере притока материалов полевых измерений и наблюдений данные, содержащиеся в перечисленных банках, последовательно дополняются, контролируются и модифицируются.

Программы банка исходных данных:

- 1) заложение дисковых файлов на исходные данные MODEL, FOTOPUNKT,
- 2) вычисление независимых моделей на основе наблюдений, выполненных на стекометре и PSK,
- 3) вычисление независимых моделей на основе наблюдений на автографе Wild A10,
- 4) сбор координат полевой основы,
- 5) формальный контроль наблюдений,
- 6) контроль независимых моделей в продольном перекрытии,
- 7) контроль поперечного перекрытия между маршрутами,
- 8) поправка исходных данных в дисковых файлах.

Программы уравнивания аэротриангуляции:

- 1) выбор данных в дисковых файлах и приготовление блока для уравнивания,
- 2) уравнивание блока аэротриангуляции методом AERONET; программа эта дает возможность уравнивания блоков, построенных максимально из 300 сегментов.

Программы банка результатов:

- 1) сбор уравненных блоков,
- 2) согласование территории взаимного перекрытия блоков,
- 3) создание окончательных списков координат.

Технологии AERONET применяются в настоящее время в производстве. Получаемая точность зависит прежде всего от качества исходных данных. В материалах ИГиК результаты уравнивания характеризуются средней квадратической ошибкой контрольных пунктов, составляющей $m_x = m_y = m_z = 0,012 \text{ м}$ в масштабе снимка.

Перевод:

Róża Tołstikowa

EWA MUSIAŁ

THE „AERONET” TECHNOLOGY FOR DIGITAL
AEROTRIANGULATION

Summary

For nearly ten years the AEROBLOK method of analytical aerotriangulation, from independent models, is widely used in Poland. The new needs of export production and specially higher demands in accuracy caused the development of the AERONET method and technology in years 1976—78. The method was invented by J. Gaździcki from the algorithmic side and from photogrammetric side by the author of this paper, who also prepared and introduced to production other technologies as AERONET 1, AERONET 2, AERONET 2E. This technologies are adapted to mean and large-scale aerotriangulation and are realised using computers, NOVA 840 and ECLIPSE C/300.

Here are presented successively:

- the adjustment method AERONET
- technologies for digital aerotriangulation and program systems

In the AERONET method, the blocks made of segments are adjusted. The segment is a set of point coordinates (xyz) of either one stereogram or more suitable transformed subsequent stereograms of the same strip. All point coordinates of the segment are related to one assumed coordinate system.

The AERONET method is an iterative „horizontal-vertical” adjustment, in which all segment transformation parameters are computed simultaneously by solving big normal equation systems. Practically, the adjustment closes after 3 to 5 iterations.

In the technological variant AERONET 1, which is adapted for topographic purpose, the adjustment is computed in corresponding geocentric system.

The most important steps of adjustment process are:

- 1) the transformation and normalisation of geodetical coordinates,
- 2) normalisation of coordinates in segments,
- 3) preparing the reduced normal equations for horizontal adjustment xy ,
- 4) flat transformation of segments,
- 5) preparing the reduced normal equations for vertical adjustment z ,
- 6) spatial transformation of segments,
- 7) solving the normal equation system using the Cholesky-Banachiewicz method (krakovianian root),
- 8) computing the adjusted coordinates, estimation of accuracy, result analysis, decision if to continue the process,
- 9) computing the final coordinates of aerotriangulation points.

The AERONET technologies for digital aerotriangulation are solving satisfactory such problems as data collecting, check, processing, care of big amounts of source data and results.

The program system consists of:

- source data base,
- aerotriangulation adjustment programs,
- result base.

The data stored in bases mentioned above are supplemented, checked and modified, as new data (e.g. observations, field measures) are coming.

Programs of the source data base:

- 1) creating the disc files of MODEL and FOTOPUNKT source data,
- 2) computing the independent models using data from STEKOMETR and PSK,
- 3) computing the independent models using WILD A10 autograph data,
- 4) collecting the terrain network coordinates,
- 5) formal check of observations,
- 6) check of lateral overlapping,
- 7) check of side overlapping,
- 8) correction of source data stored on discs.

Programs of aerotriangulation adjustment:

- 1) data choice from disc files and preparing the block for adjustment,
- 2) the aerotriangulation block adjustment using the AERONET method. This program enables the adjustment of blocks made of 300 segments max.

Programs for the result base:

- 1) collecting of the adjusted blocks,
- 2) coordination of the overlapping areas of the blocks,
- 3) listing the final coordinates.

The AERONET technologies are used now in production and the obtained accuracy greatly depends on source data quality.

As far as the materials elaborated by IGiK are considered the mean square error of check points adjusted using this method is: $m_x = m_y = m_z = 0,012 \mu\text{m}$ in photographic scale.

Translation: Jacek Drachal

