

STANISŁAW DĄBROWSKI
FLORIAN DZWIGAŁOWSKI
JAN ZIOBRO

FOTOTRIANGULACJA NA PODSTAWIE ZDJĘĆ SATELITARNYCH
O DUŻYCH KĄTACH NACHYLENIA

ZARYS TREŚCI. Pierwszym tematem artykułu jest metoda fototriangulacji na podstawie zdjęć satelitarnych, umożliwiająca opracowywanie bloków złożonych ze zdjęć wykonanych z różnych orbit, różnymi kamerami i o dużych kątach nachylenia. System obliczeniowy o nazwie SPACEBLOK, napisany dla komputerów ODRA 1305 i IBM PC, umożliwia opracowywanie bloków o wielkości do 27 zdjęć i 1500 punktów.

Drugim tematem artykułu jest fototriangulacja na podstawie bloku 21 radzieckich zdjęć satelitarnych w skali 1:270 000 wraz ze szczegółową analizą dokładności wyników wyrównania przestrzennego i wyrównania quasi-płaskiego.

1. Wstęp

Rozwój technik pozyskiwania obrazów powierzchni Ziemi z wysokości orbitalnych sprawił, że materiały te stały się szeroko dostępne dla wielu dziedzin nauki i gospodarki. Można chyba stwierdzić, że kończy się okres sporadycznego korzystania z tych materiałów i jednostkowych opracowań na skalę laboratoryjną, a zaczyna się okres tworzenia i wdrażania technologii wykorzystujących zdjęcia i obrazy satelitarne jako źródło zasilania informacjami procesów sterowania i zarządzania działami gospodarki oraz permanentnych procesów badawczych.

Wraz z większą dostępnością obrazów satelitarnych stale

zwiększa się zakres ich wykorzystania. Wynika to zarówno z rozwoju metod odczytywania i opracowywania informacji w nich zawartej oraz rozwoju bazy sprzętowej, jak i ze wzrastających potrzeb związanych z intensyfikacją procesów gospodarczych i badaniem naturalnych zasobów Ziemi, badaniem i ochroną środowiska przyrodniczego itp.

Pociąga to za sobą potrzebę tworzenia i ciągłego aktualizowania map topograficznych i tematycznych. Wzrost wymagań dotyczących aktualności i pewności informacji sprawia, że należy z większą dokładnością określać miejsca w przestrzeni, których te informacje dotyczą. Wynika stąd potrzeba odtworzenia orientacji przestrzennej zdjęć i obrazów satelitarnych względem powierzchni Ziemi. Znając bowiem geometrię tworzenia obrazów i ich orientację przestrzenną uzyskujemy przestrzenne przyporządkowanie wszystkich informacji, jakie zdjęcie w sobie zawiera.

Metodą łącznego odtwarzania orientacji zespołów zdjęć satelitarnych, w oparciu o możliwie najmniejszą liczbę punktów o określonym wcześniej położeniu względem układu odniesienia, jest metoda fototriangulacji przestrzennej.

Metody i technologie opracowania zdjęć fotogrametrycznych, w tym fototriangulacja, są w Polsce znane, stosowane i rozwijane od wielu lat. Jednakże zakres stosowalności tych technologii jest ograniczony: nie obejmuje zdjęć z wysokości orbitalnych, wykonanych różnymi kamerami i o dużych kątach nachylenia.

Wśród różnych typów obrazów i zdjęć satelitarnych, nadających się do opracowania metodami fotogrametrycznymi, należy wyróżnić zdjęcia rzadkie, które są udostępniane Polsce; w związku z tym można opierać na nich technologie opracowania i aktualizacji map topograficznych i tematycznych w skali 1:200 000 i większych.

Są to zdjęcia o dużej rozdzielczości, wykonywane kamerami fotogrametrycznymi o odległości obrazu około 1000 mm, z wysokości około 200 km i o nachyleniach sięgających 10 i 20 gradów.

Przystępując do opracowania metody fototriangulacji ze zdjęć satelitarnych przeprowadzono analizę cech dostępnych zdjęć, analizę potrzeb lokalizowania opracowanych informacji w układzie odniesień przestrzennych, który stosowany jest w systemach informacji geograficznej, a także analizę sposobu łączenia zdjęć w bloki i rozwiązań fototriangulacji przestrzennej.

2. Opis opracowanej metody fototriangulacji

W rozdziale przedstawimy metodę fototriangulacji na podstawie zdjęć satelitarnych, której główne cechy użytkowe, model matematyczny oraz ogólny opis oprogramowania są przedstawione w kolejnych podrozdziałach.

Prace, które są treścią artykułu wykonano w Zakładzie Fotogrametrii IGiK, w ramach programu 01.20. "Rozwój i wykorzystanie badań kosmicznych", program "Teledetekcja".

2.1. Główne cechy użytkowe

- Bloki można tworzyć ze zdjęć wykonanych różnymi kamerami z różnych orbit i ze zdjęć o dużych kątach nachylenia.
- Kształt bloku zdjęć jest dowolny.
- Liczba zdjęć bloku może sięgać 27.
- Liczba punktów o wyznaczanych współrzędnych terenowych może sięgać 1500.
- Punkt terenowy może być obserwowany na 9 zdjęciach bloku.
- Obserwacje zdjęć są korygowane ze względu na skurcz filmu i dystorsję obiektywu.
- Wyznaczone współrzędne punktów otrzymują bezpośrednią ocenę dokładności w postaci błędów średnich.
- Wyrównanie bloku jest przeprowadzone w układzie topocentrycznym.
- Można wyznaczać współrzędne przestrzenne lub tylko sytuacyjne.

2.2. Model matematyczny metody

Model geometryczny

Model geometryczny metody ma za podstawę warunek kolinearności punktów obrazu, środka rzutów i punktu terenowego oraz zasady rzutu środkowego. Opisuje on zależność między współrzędnymi obrazu punktu w układzie tłowym a jego współrzędnymi w układzie terenowym. Zależności te są opisane znanymi w literaturze fotogrametrycznej równaniami. Ze względu na mogące występować znaczne kąty nachylenia zdjęć satelitarnych zrezyg-

nowano z upraszczającego, lecz i ograniczającego założenia, że kąty te są kątami małymi.

Model błędów

Wielkości występujące w modelu geometrycznym mają przypisane następujące własności statystyczne:

- Obserwacjami są współrzędne tłowe punktów na zdjęciach bloku. Są one traktowane jako równodokładne.
- Niewiadomymi są współrzędne terenowe punktów i elementy orientacji zewnętrznej zdjęć.
- Stałymi są elementy orientacji wewnętrznej kamer i współrzędne fotopunktów.

Układ współrzędnych

Wyrównanie bloku jest wykonywane w topocentrycznym układzie współrzędnych.

Układ ten jest zdefiniowany następująco:

- jest to układ prostokątny prawoskrętny,
- jego początkiem jest środek przyjętej elipsoidy ziemskiej
- oś Z przechodzi przez geometryczny środek Polski, o współrzędnych $B = 52^{\circ}00$, $L = 19^{\circ}30$ E,
- oś X leży w płaszczyźnie przechodzącej przez bieguny.

Przeliczanie współrzędnych B i L jest wykonywane w oparciu o elementy zalecane przez Międzynarodową Unię Geodezyjną.

Wstępne opracowanie obserwacji

Obserwacje bloku podlegają wstępnemu opracowaniu w sposób następujący:

- Wielkości zarejestrowane podczas obserwacji na stereokomparatorze precyzyjnym są przeliczane na współrzędne lewego i prawego zdjęcia stereogramu.
- Wielokrotne obserwacje punktu na zdjęciu są uśredniane.
- Obserwacje zdjęcia pochodzące z dwóch stereogramów są scalane za pomocą transformacji izometrycznej.
- Współrzędne są przeliczane do układu tłowego za pomocą transformacji afinicznej.

- Współrzędne tłowe punktów są korygowane ze względu na wpływ dystorsji radialnej obiektywu kamery. Korekcja wyznaczana jest na podstawie poprawek dystorsyjnych podanych wzdłuż 4 symetrycznych zdjęć, drogą dwukrotnej interpolacji liniowej po odległości radialnej i kącie kierunkowym.

Organizacja danych i obliczanie przybliżonych wartości niewiadomych

Dalsze opracowanie obserwacji bloku, po ich skorygowaniu i przeliczeniu na układy tłowe kamer, przebiega następująco:

- Sortowanie obserwacji w rekordy zawierające całość danych dotyczących poszczególnego punktu obiektu.

- Dołączenie do obserwacji przybliżonych elementów orientacji zewnętrznej zdjęć, elementów orientacji wewnętrznej zdjęć i współrzędnych fotopunktów.

- Obliczanie przybliżonych współrzędnych punktów terenowych na podstawie przybliżonych elementów orientacji zewnętrznej, elementów orientacji wewnętrznej zdjęć i współrzędnych tłowych punktów, za pomocą wielokrotnego fotogrametrycznego wcięcia w przód.

- Ocena dokładności przybliżenia współrzędnych poszczególnych punktów, przez obliczanie różnicy między współrzędną tłową uzyskaną z obserwacji a współrzędną tłową obliczoną z danych przybliżonych.

- Podział punktów, w zależności od sposobu traktowania obserwacji punktu podczas wyrównania na: fotopunkty, punkty wiążące, punkty przeliczane i punkty usunięte z obliczeń.

Układ równań obserwacyjnych

Układ z równań obserwacyjnych ułożonych dla wszystkich obserwacji bloku jest uzupełniony równaniami warunkowymi. Równania warunkowe orientują liniowo i kątowo sieć fotogrametryczną względem układu odniesienia i określają skalę sieci. Równania warunkowe są układane na podstawie obserwacji fotopunktów o znanych współrzędnych X, Y, Z , znanych X, Y lub tylko Z .

Łączne rozwiązanie układu równań poprawek i równań warunkowych przeprowadza się przez wyeliminowanie odpowiednich niewiadomych z równań poprawek za pomocą równań warunkowych.

Rozwiązanie układu równań nieliniowych

Rozwiązanie układu równań obserwacyjnych, ze względu na nieliniowość tych równań, prowadzone jest metodą iteracyjną, znaną pod nazwą zwykłej metody Newtona. Równania obserwacyjne są linearyzowane przez rozwinięcie w szereg Taylora, z ograniczeniem do wyrazów pierwszego rzędu.

Uzyskane z rozwiązania zlinearyzowanego układu przyrosty niewiadomych są badane ze względu na ich wartości bezwzględne. W przypadku, gdy którykolwiek przyrost przekracza wartość przyjętego kryterium, wykonywana jest następną iteracja.

Rozwiązanie układu równań liniowych

Ścisłe i bezpośrednie rozwiązanie wielkiego, rozrzedzonego układu równań liniowych oraz obliczanie błędów średnich niewiadomych jest wykonywane metodą oznaczoną skrótem BBD (Bordered Block Diagonal - przekształcenie macierzy "blokowej, diagonalnej z obrzeżeniem"), znaną również jako metoda wyrównania wielogrupowego.

W metodzie tej, zastosowanej do rozwiązania problemu fototriangulacji satelitarnej, niewiadomymi grupowymi są współrzędne jednego punktu, natomiast niewiadomymi wiążącymi są elementy orientacji zewnętrznej wszystkich zdjęć bloku.

Jeden cykl redukcji dotyczy obserwacji jednego punktu na zdjęciach bloku i obejmuje:

- ułożenie równań obserwacyjnych danego punktu,
- ułożenie równań normalnych,
- redukcję niewiadomych grupowych.

Ponadto, w trakcie cyklu wykonuje się:

- dodanie części wartości do tablicy układu równań normalnych niewiadomych wiążących,
- tworzenie i zapisywanie w zewnętrznej pamięci komputera fragmentu częściowo zredukowanej odwrotności pierwiastka układu równań normalnych.

Tablica równań normalnych niewiadomych wiążących jest tablicą gęstą, ze względu na założony dowolny kształt bloku zdjęć satelitarnych.

Obliczenia są prowadzone za pomocą algorytmu Banachiewicza - metodą pierwiastka krakowianowego.

Końcowym wynikiem obliczeń są:

- współrzędne punktów z oceną dokładności,
- elementy orientacji zewnętrznej zdjęć z oceną dokładności.

2.3. Oprogramowanie

Oprogramowanie fototriangulacji zostało opracowane na komputery ODRA 1305 i IBM PC. System obliczeniowy o nazwie SPACEBLOK złożony jest z 9 programów. Programy są napisane w języku FORTRAN 66 i FORTRAN 77. Główne funkcje wykonywane przez oprogramowanie przedstawiają się następująco:

- konwersacyjne przygotowanie danych,
- wstępne opracowanie wyników obserwacji,
- organizacja i kontrola całego zbioru danych,
- wyznaczenie niewiadomych,
- wyznaczenie błędów średnich niewiadomych,
- wprowadzanie zmian w danych,
- obliczanie parametrów do dalszego, analogowego opracowania zdjęć.

Wymagana wielkość pamięci operacyjnej do obliczeń na komputerze ODRA 1305 wynosi 49 K słów 24 bitowych, a na IBM PC - 215 KB.

Wyrównanie bloku, omówionego w następnym rozdziale, o 21 zdjęciach i 150 punktach wiążących (890 obserwacjach) wymagało w obliczeniach na komputerze IBM PC/XT:

- 19 minut dla wyznaczenia niewiadomych (5 iteracji),
- 25 minut dla obliczenia błędów średnich niewiadomych.

3. Fototriangulacja na podstawie radzieckich zdjęć satelitarnych

Zdjęcia radzieckie będą stanowiły jedno z podstawowych źródeł informacji, którymi będą zasilane pola odniesień przestrzennych, jak również podstawę do aktualizacji map drobnoskalowych. Dlatego też określenie jakości geometrycznej tych zdjęć oraz dokładności wykonywanej na ich podstawie fototriangulacji stanowiło ważny cel badawczy.

Badania przeprowadzono na bloku zdjęciowym o nazwie "Kosmos -79", utworzonym z 21 panchromatycznych zdjęć w skali 1:270000,

obejmującym 36 000 km² północnej części Polski. Badaniami objęto dwa warianty fototriangulacji:

- wyrównanie przestrzenne, w którym wyznaczane są trzy współrzędne punktów terenowych
- wyrównanie quasi-płaskie, w którym wyznaczane są współrzędne X, Y przy warunku, że współrzędna Z wszystkich wyznaczanych punktów ma wartość średniej wysokości terenu.

Analiza wyników uzyskanych tymi dwoma wariantami pozwoliła na wyciągnięcie wniosków dotyczących wykorzystania zdjęć w produkcji. Poza tym został określony sposób pozyskiwania współrzędnych fotopunktów dla satelitarnych bloków zdjęć terenu Polski.

W dalszym ciągu artykułu przedstawiono poszczególne etapy fototriangulacji, przy czym zagadnienia różniące omawianą metodę od aerotriangulacji ze zdjęć lotniczych są opisane bardziej szczegółowo.

3.1. Charakterystyka bloku zdjęciowego

Satelitarne zdjęcia radzieckie na tyle różnią się od fotogrametrycznych zdjęć lotniczych, że celowe jest podanie ich podstawowych parametrów.

Zdjęcia bloku zostały wykonane podczas jednego przejścia satelity, trzema kamerami.

Zdjęcia tworzą trójszereg, po 7 zdjęć w szeregu o pokryciu 60% i pokryciu między szeregami 5%. Zdjęcia środkowego szeregu mają nachylenie ok. 0,5 grada, zdjęcia szeregów bocznych są nachylone w płaszczyźnie prostopadłej do orbity o kąty +19 i -19 gradów.

Średnia skala zdjęć wynosi 1:216 000. Przeciętna długość bazy stereogramu wynosi 25,5 km. Momenty wykonania zdjęć nie były synchronizowane.

Trzy kamery, którymi wykonano poszczególne szeregi, mają podobne parametry:

- odległość obrazu ok. 1010 mm,
- format zdjęć 30 cm na 30 cm,
- dystorsję radialną obiektywu niesymetryczną o wartościach dochodzących do skraju zdjęcia do 600 μm (niesymetryczność sięga 70 μm),
- nieokreśloną dystorsję tangencjalną,

- kąt rozwarcia kamery 26 gradów.

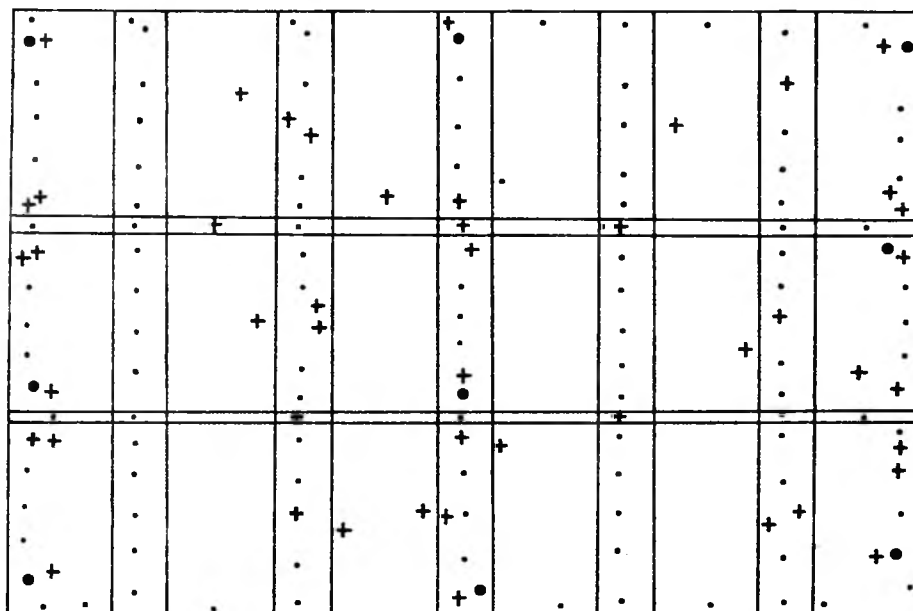
Zdjęcia wykonane są na filmie panchromatycznym i posiadają duży ogólny skurcz sięgający 1% oraz znaczny skurcz afiniczny.

Ze względu na dalsze opracowanie na instrumentach analogowych, które nie posiadają nośników dla tak dużego formatu zdjęcia, zostały one zmniejszone do formatu 23 cm na 23 cm (do skali ok. 1:270 000, przy odległości obrazu 780 mm).

3.2. Projekt fototriangulacji

Budowaną sieć przestrzenną cechuje zwiększona, w stosunku do wykonywanych aerotriangulacji, gęstość wiązań stereogramów - po 7 punktów wiążących. Zwiększając liczbę wiązań kierowano się następującymi przesłankami:

- liczba ta jest uważana za optymalną przy zwiększaniu dokładności i pewności wyznaczenia,
- większa liczba wiązań między stereogramami ma na celu częściowe skompensowanie niekorzystnie małego poprzecznego pokrycia.



• Fotopunkty + Fotopunkty kontrolne • Punkty wiążące

Rys. 1. Szkic bloku fototriangulacji "Kosmos-79"

W każdym z trzech szeregów zaprojektowano po 3 fotopunkty. Poza tym, w celu uzyskania niezależnej oceny dokładności zaprojektowano 47 fotopunktów kontrolnych, które w wyrównaniu wystąpiły jako punkty wiążące. Fotopunkty te są równomiernie rozmieszczone w obszarze bloku.

Szkic bloku z rozmieszczeniem punktów wiążących, fotopunktów i fotopunktów kontrolnych przedstawiony jest na rysunku 1.

Liczbowa charakterystyka zaprojektowanej sieci przedstawia się następująco:

- na modelu obserwowanych jest przeciętnie 17 punktów (na zdjęciu przeciętnie 24 punkty),
- liczba punktów wiążących szeregi wynosi 7 i 9 punktów,
- liczba punktów wyznaczanych wynosi 152.

3.3. Pozyskiwanie współrzędnych fotopunktów

Pierwsza część badań w tym zakresie miała za cel wstępne określenie geometrycznej jakości zdjęć.

Badanie polegało na wykonaniu fotogrametrycznych wcięć wstecz dla 6 zdjęć, przy czym fotopunktami były szczegóły sytuacyjne zidentyfikowane i pomierzone na mapach topograficznych w skali 1:50 000, przeciętnie w liczbie 20 na zdjęcie.

Przy wykonywaniu wcięć były przeprowadzane korekcje z tytułu afinicznego skurczu zdjęć, dystorsji obiektywu oraz poprawki ze względu na krzywiznę Ziemi.

Parametrem podlegającym analizie był błąd średni współrzędnej tłowej, liczony z wielkości poprawek. Wartości błędu średniego dla poszczególnych zdjęć mieszczą się w przedziale od 43 μm do 76 μm . Średnia wartość błędu wynosi 60 μm , co po przemnożeniu przez skalę zdjęć wynosi 16,2 m.

Z analizy czynników wpływających na wielkość otrzymanego błędu wynika, że znaczna jego część jest skutkiem błędu kartowania szczegółów sytuacyjnych i błędu pomiaru współrzędnych na mapie. Z tego powodu mapa topograficzna w skali 1:50 000 jest za mało dokładna dla pozyskiwania współrzędnych fotopunktów.

Dla terenu Polski, określono inny sposób pozyskiwania współrzędnych o wyższej dokładności niż poprzedni, polegający na wyborze fotopunktów na mapach w skali 1:50 000 i odczytaniu współrzędnych z map topograficznych w skali 1:10 000.

Ten sposób wymaga, aby szczegół sytuacyjny wybrany jako fotopunkt, był możliwy do zidentyfikowania na zdjęciu satelitarnym oraz aby był dokładnie kartowany i przedstawiany na mapie w skali 1:10 000. Tym warunkom odpowiadają skrzyżowania dróg ulepszonych, dlatego też wszystkie 56 fotopunktów omawianego bloku były takimi szczegółami.

Pomiar współrzędnych wykonano na oryginałach polowych, pierworysach wydawniczych lub diapozytywach pierworysów wydawniczych. Mapy topograficzne w skali 1:10 000 tej części Polski zostały wykonane metodą kombinowaną, stąd błąd średni odczytania współrzędnej poziomej należy ocenić na 4 m.

Rzędną wysokościową określono na podstawie warstwic z dokładnością 2 m.

3.4. Pozyskiwanie przybliżonych elementów orientacji zewnętrznej zdjęć

Elementy orientacji zewnętrznej bloku zostały określone indywidualnie dla każdego zdjęcia bloku.

Elementy orientacji katowej określono na podstawie parametrów orbity, nominalnego nachylenia kamer oraz mapy w skali 1:1 500 000. Podczas wyrównania bloku należy pamiętać o małej dokładności przybliżenia tych kątów (parę gradów), co w dużej mierze wynika z nierównoległości między osią Z układu topocentrycznego a lokalną prostą pionową, względem której określane są kąty.

Współrzędne środków rzutów określono na podstawie mapy i parametrów orbity. Współrzędne o dokładności kilku kilometrów są wystarczającym przybliżeniem.

3.5. Sygnalizacja kameralna i obserwacje

Punkty sieci fotogrametrycznej zasygnalizowano kameralnie za pomocą laserowego instrumentu TRANSMARK B firmy Carl Zeiss Jena. Sygnalizację przeprowadzono następująco:

- punkty wiążące zasygnalizowano tak jak w standardowym bloku zdjęć lotniczych,
 - fotopunkty i fotopunkty kontrolne również zasygnalizowano.
- Obserwacje wykonano na stereokomparatorze Stokometr.

3.6. Wyniki wstępnego opracowania obserwacji

Zgodność wewnętrzną obserwacji, obliczona jako błąd średni uśrednionej (dwukrotnej) obserwacji, waha się dla poszczególnych zdjęć w przedziale od 1,8 μm do 3,4 μm .

Dokładność łączenia połówek obserwacji zdjęć transformacją izometryczną, określona z szeregu poprawek do obserwacji znaczków tłowych (15 transformacji, 120 poprawek) i obliczona jako odchylenie standardowe, wyniosła 9,9 μm , przy maksymalnej wartości poprawki równej 29 μm .

Dokładność przeliczenia współrzędnych z układu stereokomparatora na układ tłowy transformacją afiniczną, określona jest w ten sam sposób jak w poprzednim obliczeniu. Odchylenie standardowe wyniosło 16,0 μm (dla 21 transformacji, 168 poprawek i maksymalnej wartości poprawki równej 27 μm).

3.7. Przebieg wyrównań

3.7.1 Przebieg wyrównania przestrzennego

W trakcie wyrównania jeden z punktów wiążących szeregi został przesunięty do grupy punktów przeliczanych, ze względu na duże poprawki do obserwacji. Poprawki wyrównawcze do obserwacji fotopunktów nie przekraczają 25 μm . Maksymalna poprawka do obserwacji punktów wiążących wyniosła 40 μm . Błąd średni obserwacji liczony z wartości poprawek wyniósł 12,5 μm , przy czym liczba obserwacji wynosiła 886 a liczba niewiadomych 582.

3.7.2. Przebieg wyrównania quasi-płaskiego

Wyrównanie quasi-płaskie, tzn. wyrównanie przy warunku, że punktom wyznaczanym nadaje się taką samą, stałą wysokość nad elipsoidą odniesienia (a wyznaczone są współrzędne X, Y), jest możliwe dla omawianego bloku z następujących powodów:

- dokładność wyznaczenia wysokości w wyrównaniu przestrzennym jest mała - błąd średni wysokości na fotopunktach kontrolnych wyniósł 58 m,
- wysokości terenu na obszarze bloku znajdują się w przedziale od 0 m do 220 m (z wyjątkiem Garbu Lubawskiego z Dylewską Górą o wysokości 312 m),

- nadanie punktom wyznaczanym średniej wysokości tego terenu (107 m) może więc spowodować maksymalny błąd wysokości punktu wynoszący ok. 110 m, przy spodziewanym błędzie średnim ca 40 m.

Zaletami wyrównania quasi-płaskiego w stosunku do przestrzennego są:

- korzystniejsze warunki geometryczne wyznaczania współrzędnych X, Y ,
- znacznie większa pewność metody dla wyznaczania współrzędnych X, Y , gdyż wzrasta nadwyznaczalność układu.

W wyrównaniu przestrzennym stosunek liczby obserwacji do liczby niewiadomych wynosi 1,5, a w wyrównaniu quasi-płaskim stosunek ten wynosi 2,0.

Jako przybliżenie współrzędnych X, Y przyjęto wyniki wyrównania przestrzennego. Następnie po przeliczeniu współrzędnych z układu topocentrycznego na układ "42", współrzędnej Z wszystkich wyznaczonych punktów nadano wartość średniej wysokości terenu, a następnie współrzędne ponownie przeliczono na układ topocentryczny.

W trakcie wyrównania jeden punkt wiążący modele przesunięto do grupy punktów przeliczanych.

Poprawki do obserwacji fotopunktów nie przekraczają 55 μm . Maksymalna poprawka do obserwacji punktów wiążących wyniosła 44 μm . Błąd średni obserwacji wyniósł 15,7 μm , przy czym liczba obserwacji wyniosła 880, a liczba niewiadomych 432.

3.8. Analiza wyników wyrównania przestrzennego

Analizę przeprowadzono na podstawie błędów średnich współrzędnych fotopunktów kontrolnych.

3.8.1. Analiza na podstawie błędów średnich

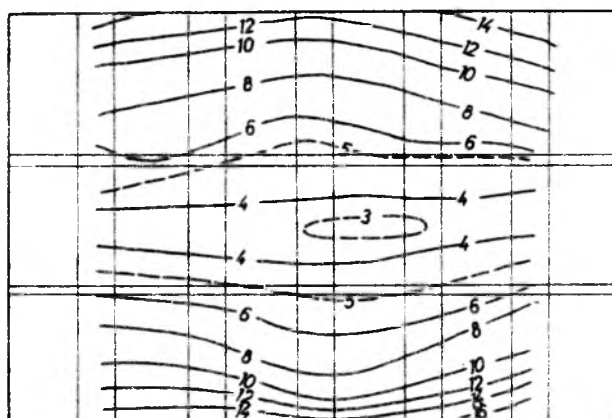
Z analizy tych błędów wynika, że dokładność wyznaczonych współrzędnych punktów jest istotnie niejednorodna, gdyż wielkości błędów średnich współrzędnych poziomych znacznie się różnią.

Błąd średni współrzędnej X jest praktycznie niezależny od położenia punktu w bloku i mieści się w przedziale 3 m - 9 m, (kąt między osią X a kierunkiem ruchu satelity wynosi 14 gradów).

Natomiast błąd średni współrzędnej Y dla punktów leżących blisko osi trójszeregu mieści się w przedziale 3 m - 6 m i rośnie wraz ze wzrostem odległości od osi trójszeregu, osiągając na skraju bloku wartości:

- 16 m dla punktów leżących w pasach potrójnego pokrycia,
- 25 m dla punktów obserwowanych tylko na jednym stereogramie.

Rozkład błędu średniego współrzędnej Y punktów leżących w pasach potrójnego pokrycia przedstawiony jest izoliniami na rysunku 2.



Rys. 2. Rozkład błędu średniego współrzędnej Y w wyrównaniu przestrzennym

W poszukiwaniu możliwości podniesienia dokładności współrzędnej Y wykonano symulację wyrównania bloku z dodatkowym warunkiem orbity. Warunek ten zakłada, że środki rzutów wszystkich 21 zdjęć bloku znajdują się na jednej kołowej orbicie.

Z analizy wyników tej symulacji wynika, że w odniesieniu do wyrównania bez warunku orbity błędy średnie współrzędnej Y punktów leżących blisko osi bloku zmniejszyły się około 20%, a błędy Y punktów leżących na skraju tylko około 5%.

Z analiz wynika, że czynnikami wpływającymi dominująco na dokładności współrzędnej Y są:

- odległość wyznaczanego punktu od osi trójszeregu (odległość kątowna punktów leżących na skraju wynosi 24 grady),
- mały stosunek bazowy (1:8,5).

Błędy średnie rzędnej Z są wielokrotnie większe od błędów współrzędnych X, Y . Punkty wiążące mają błędy rzędnej Z wynoszące przeciętnie 40 m. Natomiast punkty obserwowane tylko na jednym stereogramie mają błędy średnie Z wynoszące przeciętnie 55 m (maksymalnie 75 m).

3.8.2. Analiza na podstawie fotopunktów kontrolnych

Fotopunkty kontrolne, których współrzędne odczytano z map topograficznych w skali 1:10 000, zostały zaobserwowane w następujący sposób:

- 28 punktów - tylko na jednym stereogramie,
- 18 punktów - na dwóch lub więcej stereogramach.

Z odchyłek, otrzymanych dla 46 fotopunktów kontrolnych, obliczono błędy średnie współrzędnej wyznaczonej fototriangulacją (przy założeniu bezbłędności współrzędnych odczytanych z mapy); wynoszą one

$$m_x = 11 \text{ m}, \quad m_y = 14 \text{ m}, \quad m_z = 58 \text{ m}.$$

Z powyższego obliczenia został odrzucony jeden fotopunkt kontrolny, gdyż różnice współrzędnych były większe od 100 m; wynikało to z omyłkowej identyfikacji skrzyżowania ulic w mieście. Oceny dokładności wyników wyrównania przestrzennego i wyrównania quasi-płaskiego są zestawione w tabelicy 1.

Z porównania ocen dokładności współrzędnych X, Y za pomocą błędów średnich i za pomocą fotopunktów kontrolnych wynika, że są one rozbieżne. Próba wyjaśnienia przyczyn tej rozbieżności jest przedstawiona w analizie wyników wyrównania quasi-płaskiego (w następnym rozdziale), gdzie zjawisko to wystąpiło jeszcze wyraźniej.

3.9. Analiza wyników wyrównania quasi-płaskiego

Analizę tę przeprowadzono przy takich samych warunkach jak dla wyrównania przestrzennego.

3.9.1. Analiza na podstawie błędów średnich

Z analizy błędów średnich współrzędnych X, Y wynika, że dokładność wyników jest bardziej jednolita niż w wyrównaniu przes-

Tablica 1

Rodzaj wyrównania	Błąd średni obserwacji z wyrównania [μm]	Dokładność wyznaczenia współrzędnych					
		Błędy średnie z wyrównania [m]			Błędy średnie z fotopunktów kontrolnych [m]		
		m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
przes- trzenne	12,5	3+9	3+25	27+76	11	14	58
quasi- płaskie	15,7	3+6	3+6	---	12	12	42

trzennym. Błędy średnie obydwóch współrzędnych (w całym bloku) mieszczą się w przedziale od 2,8 m do 6,2 m. Wielkość błędu jest przede wszystkim zależna od liczby obserwacji punktu, a w mniejszym stopniu od położenia punktu w sieci.

3.9.2. Analiza na podstawie fotopunktów kontrolnych

Błędy średnie współrzędnych uzyskane na podstawie 46 fotopunktów kontrolnych wyniosły:

$$m_x = 12 \text{ m}, \quad m_y = 12 \text{ m}, \quad m_z = 42 \text{ m}.$$

Należy zaznaczyć, że na ogólną liczbę 92 różnic współrzędnych X, Y:

- 5 różnic przekracza dwukrotny błąd średni,
- wszystkie różnice mieszczą się w trzykrotnym błędzie średnim.

Istotnym problemem jest znaczna rozbieżność ocen dokładności uzyskanych za pomocą błędów średnich i za pomocą fotopunktów kontrolnych. Rozbieżność ta jest wyraźna w wyrównaniu quasi-płaskim, gdzie błędy średnie z wyrównania znajdują się w przedziale od 3 m do 6 m, a błędy średnie z fotopunktów kontrolnych wynoszą $m_x = m_y = 12 \text{ m}$.

Wyjaśnienia tej rozbieżności należy doszukiwać się w następujących przyczynach:

a) Jakość identyfikacji na zdjęciach szczegółów sytuacyjnych wybieranych jako fotopunkty. Określanie środka geometrycznego szczegółu, w tym przypadku środka skrzyżowania dróg, może być obciążone znacznym błędem, gdyż drogi są obserwowane na zdjęciach jako jeden obiekt - łącznie z poboczami, drzewami oraz cieniami przez nie rzucanymi. Tak więc należy sądzić, że błąd identyfikacji jest znacznie większy od błędu odczytania współrzędnych fotopunktów (4 m) na mapie w skali 1:10 000.

b) Drugą przyczyną tej rozbieżności jest niewątpliwie nie w pełni skorygowana duża dystorsja obiektywów kamer i pozostający nieregularny skurcz zdjęć.

4. Wnioski

Radzieckie zdjęcia satelitarne, pomimo okazałych wielkości dystorsji i skurczu, pozwalają na wyznaczenie, opracowaną metodą fototriangulacji, współrzędnych poziomych X , Y z błędem $m_X = m_Y = 12$ m. Uzyskana dokładność umożliwia wykorzystanie zdjęć do sytuacyjnych opracowań map topograficznych w skalach średnich i małych oraz do lokalizowania informacji w układzie odniesień przestrzennych, stosowanym w systemach informacji geograficznej.

Dokładność wyznaczenia współrzędnej Z w wyrównaniu przestrzennym, $m_Z = 58$ m, jest zbyt niska do opracowań wysokościowych; jest to efekt małego stosunku bazowego (1:8,5).

Wyrównanie quasi-płaskie daje nieco lepsze wyniki oraz dużo większą pewność wyznaczenia współrzędnych poziomych, dlatego należy je zalecić dla bloków o podobnej geometrii jak badany.

Sposób określenia współrzędnych fotopunktów, zadowalający ze względu na dokładność, należy uzupełnić terenową weryfikacją zidentyfikowanych punktów, co da możliwość wyeliminowania tych punktów, które są obciążone znacznym błędem identyfikacji.

L I T E R A T U R A

- [1] Anderson J. M., Erio G., Lee C.: *Analytical Bundle Triangulation with Large Scale Photography: Comparison with Polynomial Adjustment and Experiments Using Added Parameters*. Sympozjum ISP, Komisja III. Stuttgart 1974.
- [2] Baran W.: *Teoretyczne podstawy opracowania wyników pomiarów geodezyjnych*. PWN. Warszawa 1983.
- [3] Baran W.: *Zastosowanie metod krakowianowych do wyrównania dużych sieci geodezyjnych*. Zeszyty Naukowe AGH, Geodezja z. 86. Kraków 1986.
- [4] Bauer H.: *Bundle Adjustment with Additional Parameters - - Practical Experiences*. Sympozjum ISP, Komisja III. Stuttgart 1974.
- [5] Bauer H., Müller J.: *Height Accuracy of Blocks and Bundle Adjustment with Additional Parameters*. Kongres ISP, Komisja III, Ottawa 1972.
- [6] Brown D. C.: *Bundle Adjustment with Strip - and Block - Invariant Parameters*. *Bildmessung und Luftbildwesen*, nr 6, 1974.
- [7] Bugajewski L. M., Portnov A.M.: *Teoria odinocnych kosmickich snimkov*. Nedra. Moskwa 1984.
- [8] Ebner H.: *Self Calibrating Block Adjustment*. *Bildmessung und Luftbildwesen*, nr 4, 1976.
- [9] Główny Urząd Geodezji i Kartografii: *Wytyczne techniczne G-1.8, Aerotriangulacja analityczna*. 1984.
- [10] Gotthardt E.: *Zusatzglieder bei der Aerotriangulation mit Bündel*. *Bildmessung und Luftbildwesen*, nr 6, 1975.
- [11] Grün A.: *Simultane Kompensation systematischer Fehler mit Münchener Bündel-program MBOP*. Kongres ISP, Komisja III, Helsinki 1976.
- [12] Grün A.: *Zur Adwendung der moderner Präzisions-photogrammetrie in Netzverdichtung und Katastervermessung*. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, nr 3, 1979.
- [13] Jacobsen K.: *Attempt at Obtaining the Best Possible Accuracy in Bundle, Block Adjustment*. Kongres ISP, Komisja III. Hamburg 1980.
- [14] Jacobsen K.: *Bundle Block Adjustment with Small Format Photographs*. Kongres ISP, Komisja III, Hamburg 1980.

- [15] Jacobsen K.: *Programmgesteuert Auswahl zusätzlicher Parameter*. Bildmessung und Luftbildwesen, nr 6, 1982.
- [16] Juhl J., Brande-Lavaridsen O.: *The Automatic Self-Calibrating Block Adjustment Method and Its Result from Jämijärvi Testfield*. Kongres ISP, Komisja III. Hamburg 1980.
- [17] Müller S.: *Blocktriangulation mit Verbesserung der inneren Orientierung*. Bildmessung und Luftbildwesen, nr 3, 1971.
- [18] Ney B.: *Metody statystyczne w geodezji*. Skrypt 497, AGH. Kraków 1976.
- [19] Salmenperä H., Anderson J. M., Savolainen A.: *Efficiency of the Extended Mathematical Model in Bundle Adjustment*. Sympozjum ISP, Komisja III. Stuttgart 1974.
- [20] Schut G. H.: *On Correction terms for Systematic Errors in Bundle Adjustment*. Sympozjum ISP, Komisja III. Stuttgart 1974.
- [21] Sledziński J.: *Geodezja satelitarna*. PPWK. Warszawa 1978.
- [22] Tjuflin J. S.: *Kosmičeskaja fotogrametria pri izučeni planet i sputnikov*. Nedra. Moskwa 1986.

Recenzował: prof. dr hab. Andrzej Majde

Przyjęto do opublikowania w dniu 14 lutego 1989 r.

STANISŁAW DĄBROWSKI

FLORIAN DZWIGAŁOWSKI

JAN ZIOBRO

TRIANGULATION FROM SATELLITE PHOTOGRAPHS CHARACTERIZED BY GREAT TILT ANGLES

S u m m a r y

At first part of the article the authors presented method of triangulation from satellite photographs, which enables analysis of blocks composed from photographs, taken from different orbits, with the use of various cameras, characterized by great tilt angles. Software called SPACEBLOK, written for IBM PC computers, allows for analysis of blocks up to 27 photographs and 1500 points.

At the second part triangulation based on 21 Soviet space photographs at a scale of 1:270 000 was described. The block is composed of 3 strips of photographs, taken with the use of three cameras, installed on the board of satellite. Photographs from side strips are tilted by 19° . Sidelap is 5%, focal length 770 mm, base ratio 1:8,5. Adjustment was performed in topocentric system; it was based on 9 fixed points.

Two variants of triangulation from satellite photographs were examined, namely:

- spatial adjustment, with determination of X , Y , Z coordinates,

- quasi-plane adjustment, with determination of X , Y coordinates, assuming that heights of all determined points have the same value equal to the average terrain elevation.

Accuracy of coordinates, determined with the use of 46 control points, regularly spread throughout block, was as follows:

- for spatial adjustment there are the following mean errors:

$m_X = 11$ m, $m_Y = 14$ m, $m_Z = 58$ m

- for quasi-plane adjustment the following values of mean errors were obtained:

$m_X = 12$ m and $m_Y = 12$ m.

Translation: Zbigniew Bochenek

Станислав Домбровски
Флорян Дзьвигаловски
Ян Энобро

ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ НА ОСНОВЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ С БОЛЬШИМ УГЛОМ НАКЛОНЕНИЯ

Р е з ю м е

Первой темой статьи является метод фототриангуляции на основе космических снимков, разрешающий обработку блоков, составленных из снимков выполненных с разных орбит, разными камерами и с большими углами наклона. Вычислительная система

названная SPACEBLOK, написанная для компьютеров IBM PC, дает возможность обработки блоков величиной до 27 снимков и 1500 пунктов.

Второй темой статьи является фототриангуляция на основе блока 21 советских космических снимков в масштабе 1:270 000. Блок создан из трех рядов, выполненных тремя камерами, помещенными на одном спутнике. Снимки блоковых рядов имеют наклонение 19 градусов. Перекрытие между рядами (маршрутами) составляет около 5%, фокусное расстояние снимков 770 мм, базисное соотношение 1:8,5. Уравнивание проведено в топоцентрической системе координат на основе 9 фотопунктов.

Исследованиями охвачены два варианта фототриангуляции:

- пространственное уравнивание, в котором определяются координаты X , Y , Z
- квази-плоское уравнивание, в котором определяются только координаты X , Y при условии, что ординаты Z всех определяемых пунктов имеют среднюю высоту территории.

Точность координат определяемых пунктов, определенная с помощью 46 контрольных пунктов, размещенных регулярно в районе блока, составила:

- из пространственного уравнивания средние квадратические ошибки координат имеют значения $m_X = 11$ м, $m_Y = 14$ м, $m_Z = 58$ м
- из квази-плоского уравнивания средние квадратические ошибки координат имеют значения $m_X = 12$ м и $m_Y = 12$ м.

Перевод: Róża Tołstikowa

