

JAN ZIOBRO

*Instytut Geodezji i Kartografii*

## **PRECYZJA I NIEZAWODNOŚĆ POMIARU ŚRODKÓW RZUTÓW W RZECZYWISTYCH AEROTRIANGULACJACH**

*ZARYS TREŚCI: Przedstawiono wyniki badań precyzji i niezawodności pomiaru środków rzutów uzyskanych w produkcyjnych aerotriangulacjach wykonanych w kraju w ciągu ostatnich kilku lat dla skal zdjęć lotniczych 1:13 000, 1:19 000 i 1:26 000. Badaniami objęto 25 bloków o łącznej liczbie 30 tys. zdjęć. Badania oparto na ponownym wyrównaniu danych produkcyjnych przy restrykcyjnym przestrzeganiu warunków poprawnego wyrównania. Wyrównania poprzedziło przedwyrównawcze wykrywanie błędów grubych i złego podziału pomiarów na profile GPS metodą opracowaną przez autora artykułu. Analizę występowania błędów grubych w obserwacjach i ocenę niezawodności pomiaru przeprowadzono metodą data snooping W. Baarda. Przeciętna precyzja pomiaru współrzędnej środka rzutów dla 25 bloków wyniosła 10.7 cm. Niezawodność pomiaru w sieci okazała się wystarczająca w aerotriangulacjach dla skali zdjęć 1:13 000. W aerotriangulacjach dla obu mniejszych skal niezawodność pomiaru była niezadowalająca.*

**Słowa kluczowe:** aerotriangulacja, pomiar środków rzutów, precyzja, niezawodność

### **1. WSTĘP**

Poprawność wyrównania sieci zależy od wyboru właściwego modelu funkcjonalnego, od prawidłowego wagowania pomiarów oraz wyeliminowania omyłek i obserwacji odstających. Spełnienie tych warunków dla aerotriangulacji może być kłopotliwe, gdyż występują tu nawet 4 grupy obserwacji o różnym charakterze i pochodzeniu, a mianowicie: współrzędne fotopunktów, współrzędne tłowe, współrzędne środków rzutów i kąty nachylenia zdjęć. Grupy te mają niekiedy bardzo różniące się precyzje pomiaru, często tylko z gruba określone błędy średnie oraz znacznie różniące się poziomy niezawodności obserwacji w sieci. Utrudnia to prawidłowe wagowanie obserwacji i eliminację obserwacji odstających, jak również ogranicza skuteczne stosowanie dodatkowych parametrów wyrównania dla skompensowania systematycznych błędów obserwacji i niedostatków modelu funkcjonalnego. Podane względy były i są

powodem postulatu, aby wykonawcy poszczególnych grup pomiarów określali starannie błąd wyniku.

Opisany problem szczególnie silnie dotyczy pomiaru środków rzutów, gdyż wykonawcy pomiaru często podają błąd średni pomiaru ze zbyt małym przybliżeniem lub nie podają go wcale. Należy zauważyć, że obecnie istnieje tendencja do projektowania aerotriangulacji z coraz mniejszą liczbą fotopunktów, a tym samym do zwiększania roli środków rzutów jako osnowy.

## 2. CEL BADAŃ

Celem badań było określenie precyzji pomiaru środków rzutów w rzeczywistych blokach aerotriangulacji opracowanych w kraju w ciągu ostatnich kilku lat. Pozwoli to na stosowanie faktycznej precyzji pomiaru w badaniach symulacyjnych w celu projektowania aerotriangulacji oraz na wprowadzanie do wyrównań bardziej realnego błędu średniego *a priori* niż to było w dotychczasowej praktyce. Istotne znaczenie dla praktyki ma fakt, że nie wszystkie programy wyrównania używane w kraju obliczają błąd średni *a posteriori* dla poszczególnych grup obserwacji, co czasami skutkuje bezkrytycznym traktowaniem średniej kwadratowej poprawki do obserwacji jako zamiennika błędu średniego pomiaru. Utożsamianie tych dwóch różnych wielkości w celu zweryfikowania wprowadzonych do wyrównania błędów średnich, przy niewysokim poziomie lokalnej niezawodności wewnętrznej, powoduje istotne zawyżenie oszacowania precyzji pomiaru i zniekształcenie wyników aerotriangulacji.

Drugim celem badań było określenie niezawodności tej grupy pomiarów w aerotriangulacjach bloków dla często wykonywanych w kraju trzech skal zdjęć lotniczych. Niezawodność pomiaru jest drugim, po precyzji, składnikiem dokładności i zbyt niski jej poziom powoduje gorszą wykrywalność i lokalizację błędów grubych oraz zbyt duży wpływ błędów poszczególnych pomiarów na wynik aerotriangulacji. Porównanie przeciętnego poziomu niezawodności pomiaru uzyskanego w aerotriangulacji bloków o tej samej skali zdjęć z wartością uznawaną za wystarczającą może stanowić przesłankę do wprowadzenia zmian w technologii projektowania sieci.

## 3. METODYKA

Określenie precyzji pomiaru współrzędnej środka rzutów oparto na ponownym opracowaniu danych z bloków produkcyjnych przy rygorystycznym przestrzeganiu warunków poprawności wyrównania. Wyniki produkcyjne pochodziły z różnych systemów pomiarowych i programów wyrównania i były obciążone szeregiem niedoskonałości, które głównie wynikały ze stosowanych technologii. Do wad produkcyjnych opracowań można zaliczyć następujące przypadki:

- część z nich wyrównano bez dodatkowych parametrów, co jest niezgodne ze standardami;

- stosowano głównie 12-parametrowy model Ebnera; nie było to wadą, ale dla opracowań o większych wymaganiach jest tendencja do stosowania modeli dodatkowych parametrów o większej liczbie;
- krótkie profile GPS wyrównywano, oprócz parametru shift, również z parametrem drift, co niepotrzebnie osłabiało sieć;
- używana w produkcji przedwyrównawcza weryfikacja pomiarów GPS dla wykrywania omyłek i pomiarów odstających nie uwzględnia wpływu driftu, co w przypadku dużych wartości tego parametru prowadziło do błędnej eliminacji dobrych pomiarów;
- wspomniana przedwyrównawcza weryfikacja, oparta na porównaniu różnic przyrostów współrzędnych, nie dawała również możliwości wykrycia złego podziału wyników pomiaru na profile GPS. Należy tu zauważyć, że wykonawcy pomiaru nie dostarczają wyników w podziale na profile GPS, jak również coraz częściej w wynikach brak jest znacznika czasu. Wymusza to podział na profile GPS jedynie na podstawie numeracji zdjęć, co jest niewystarczającą przesłanką. Skutek złego podziału na profile praktycznie nie różni się od skutku kilku błędów grubych na profilu GPS, a za pomocą analizy poprawek do obserwacji nie daje się rozróżnić tych przyczyn i prawidłowo przygotować danych do wyrównania;
- w części opracowań użyto programów, które nie miały szacowania błędów średnich *a posteriori* dla poszczególnych grup obserwacji, przez co weryfikacja wprowadzonych do wyrównania błędów średnich obserwacji była wykonana tylko w przybliżeniu;
- wykrywanie błędów grubych w dużej części opracowań wykonano tylko na podstawie poprawek do obserwacji, co było niewystarczające przy zdarzającym się niskim poziomie niezawodności pomiaru.

Powyższe względy skłoniły autora do ponownego opracowania pomiarów produkcyjnych, które wykonano według następujących zasad:

- do wyrównań użyto programu BINGO z 24-parametrowym modelem opartym na pracach H. Bauera, J. Muellera, K. Jacobsena i E. Krucka, który jest autorem programu wyrównania;
- przedwyrównawcze sprawdzenie poprawności podziału obserwacji na profile GPS, wykrywania omyłek i błędów grubych, wykonano metodą opracowaną przez autora tego artykułu (Ziobro, 2006), która nie zawiera wad wcześniej wymienionych;
- krótkie profile GPS wyrównano jedynie z parametrem shift;
- analizę występowania błędów grubych w obserwacjach przeprowadzono metodą *data snooping* W. Baarda. Program wyrównania BINGO dla wszystkich obserwacji oblicza: poprawkę do obserwacji, wartość miary lokalnej niezawodności wewnętrznej, poprawkę standaryzowaną, wielkość błędu grubego, którym jest obciążona obserwacja odstająca;
- w trakcie wyrównań weryfikowano wielkość błędów średnich *a priori* dla poszczególnych grup obserwacji; na potrzebę weryfikacji błędów *a priori*

przy różnych grupach pomiarów zwracana jest uwaga w literaturze tematu (Wiśniewski, 1990; 2005; Prószyński et al., 2006; Kruck, 2006); w wyrównaniach w sposób iteracyjny weryfikowano założone błędy średnie aż do uzyskania 5% zgodności błędów *a priori* i *a posteriori* dla wszystkich grup pomiaru;

- na podstawie wyników wyrównania bloku określono wartość miary globalnej niezawodności wewnętrznej współrzędnej środka rzutów, jako przeciętną z wartości lokalnych niezawodności.

#### 4. OPIS BLOKÓW TESTOWYCH

Do testowania wybrano 25 bloków w trzech skalach zdjęć lotniczych: 1:13 000, 1:19 000 oraz 1:26 000, które były często stosowane w kraju w ciągu ostatnich kilku lat. Drugą istotną cechą bloków było występowanie pomiaru środków rzutów przeciętnie dla 90% zdjęć w bloku. Liczba zdjęć w blokach wynosiła od 136 do 3402, a łączna liczba zdjęć we wszystkich blokach wyniosła około 30 tys. Fotopunktami w tych blokach były szczegóły terenowe. Bloki o skalach zdjęć 1:13 000 i 1:26 000 to bardzo duże bloki o prostokątnym kształcie, które wykonano kilkoma kamerami. Bloki o skali zdjęć 1:19 000 cechował nieregularny kształt, o znacznej liczbie załamania granic. Dalsze cechy bloków, przeciętne dla danej skali, zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Niektóre cechy bloków, przeciętne dla danej skali zdjęć

Bloki o skali zdjęć	Liczba bloków	Przeciętna liczba zdjęć przypadająca na jeden fotopunkt	Przeciętny błąd średni <i>a priori</i> współrzędnej fotopunktu [cm]		Przeciętna liczba punktów wiążących na zdjęciu	Przeciętny błąd średni <i>a priori</i> współrzędnej tłowej [μm]
			poziomej	rzędnej		
1	2	3	4	5	6	7
1:13 000	10	12	18	31	37	4.4
1:19 000	4	9	27	32	23	6.5
1:26 000	11	11	46	27	38	5.1

#### 5. ANALIZA WYNIKÓW

Wyniki wyrównań dotyczące pomiaru środków rzutów zgrupowano w trzech tabelach o numerach 2, 3, 4, dla każdej z wymienionych wcześniej skal zdjęć lotniczych. W kolumnie 4 tych tabel podano zweryfikowany błąd średni *a priori* współrzędnej pomiaru środka rzutów (jednakowy dla trzech współrzędnych), który można utożsamiać z jego precyzją. Wartości te tworzą 25-elementową próbę, dla której określono charakteryzujące ją podstawowe wielkości, (Ney, 1976): średnia z próby – 10.7 cm; odchylenie standardowe – 4.1 cm; rozstęp – 15.1 cm. Ta średnia

precyzja może być stosowana jako błąd średni *a priori* pomiaru w badaniach symulacyjnych dla potrzeb projektowania aerotriangulacji, jak również w wyrównaniach, gdy błąd ten nie został określony przez wykonawcę pomiaru.

Podział bloków ze względu na skalę zdjęć lotniczych wynika ze spostrzeżenia, że jeżeli pierwszy składnik dokładności pomiaru – precyzja jest raczej niezależny od skali, to jej drugi składnik – niezawodność już jest od niej zależny, gdyż skala wpływa na relacje między dokładnościami poszczególnych grup pomiarów. W tabelach, w kolumnach od 5 do 7 podano wartości globalnej niezawodności wewnętrznej współrzędnych środka rzutów. W kolumnach od 8 do 10 zamieszczono średnią kwadratową poprawkę do współrzędnej środka rzutów.

Jak już wspomniano lokalna niezawodność wewnętrzna, obliczana dla każdej obserwacji w sieci, pozwala na ocenę poziomu wykrywalności błędów grubych w pomiarach oraz ocenę wpływu błędów w obserwacjach na wynik aerotriangulacji. Na podstawie publikacji dotyczących niezawodności sieci (Casaca, 1987; Gruen, 1980; Foerstner, 1985; Kruck, 2006; Prószyński et al., 2002) można w przybliżeniu przyjąć, że obserwacja jest wystarczająco kontrolowana przez inne, gdy wartość tej miary jest większa od 0.50. Wartość 0.75 jest określana jako wysoka niezawodność. Natomiast wartości poniżej 0.25 świadczą o słabej wykrywalności błędów grubych i o tym, że błędy w obserwacjach w dużej części obciążają wyznaczone niewiadome.

Analiza globalnej niezawodności wewnętrznej pomiaru środków rzutów dla poszczególnych skal pokazała, że w blokach o skali zdjęć 1:13 000 pomiary środków rzutów miały przeciętnie niezawodność: 0.50 dla X, 0.48 dla Y i 0.75 dla Z. Można więc powiedzieć, że niezawodność pomiaru środków rzutów w tych aerotriangulacjach była wystarczająca. Dla tych bloków przeciętne poprawki wyrównawcze do wszystkich trzech współrzędnych środka rzutów stanowiły około 76% przeciętnego błędu średniego *a priori* (ostatni wiersz w tabeli 2).

Inaczej ma się to w blokach dla skal 1:19 000 i 1:26 000. Wyniki zamieszczone w tabelach 3 i 4 pokazały, że w 9 na 15 bloków poziom globalnej niezawodności wewnętrznej współrzędnych poziomych środków rzutów był mniejszy od 0.25, a przeciętna niezawodność tych współrzędnych (ostatnie wiersze tabel 3 i 4) była bliska wartości 0.25. Wystarczający poziom niezawodności uzyskano jedynie dla bloku 3-3 (tabela 4), a przyczyna różnicy w niezawodności pomiaru między tym blokiem a pozostałymi leży w znacznie większej dokładności fotopunktów i znacznie silniejszych wiązaniach między szeregami zdjęć. Porównanie przeciętnego błędu średniego *a priori* z przeciętną wartością poprawki do współrzędnych poziomych (ostatnie wiersze tabel 3 i 4) pokazało, że tylko około 56% błędu pomiaru współrzędnych poziomych zostało wykazanych w wyrównaniu jako poprawka do obserwacji, a pozostała część błędu zniekształciła poprawki do innych obserwacji i wyznaczone niewiadome.

Warto zaznaczyć, że przy niewystarczającej niezawodności obserwacji nie jest możliwe skuteczne wykrywanie błędów grubych na podstawie poprawek wyrównawczych, gdyż stanowią one tylko część błędu grubego, którym obciążona jest obserwacja, oraz dlatego, że poprawki do obserwacji sąsiednich

mogą mieć wartości większe niż poprawka do obserwacji faktycznie obciążonej błędem grubym (Prószyński et al., 2002). W takim przypadku do wykrywania błędów grubych niezbędne jest stosowanie metody *data snooping* W. Baarda.

Tabela 2. Precyzja i niezawodność pomiaru środków rzutów w blokach o skali zdjęć 1:13 000

Lp.	Nazwa bloku	Liczba pomiarów w środkach rzutów	Błąd średni <i>a priori</i> pomiaru współrzędnej środka rzutów [cm]	Globalna niezawodność wewnętrzna współrzędnej środka rzutów			Średnia kwadratowa poprawka do współrzędnej środka rzutów [cm]		
				dla X	dla Y	dla Z	dla X	dla Y	dla Z
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1-68	1924	13.3	0.53	0.54	0.85	11.5	11.3	9.8
2	3-68	1623	15.6	0.76	0.75	0.85	15.5	13.7	12.5
3	4-68	1549	8.1	0.42	0.41	0.76	5.1	7.1	5.1
4	5A-68	846	5.2	0.51	0.49	0.80	3.6	3.7	3.6
5	5B-68	1011	9.2	0.53	0.50	0.83	7.7	7.9	5.8
6	7-68	2006	5.8	0.40	0.38	0.76	3.9	3.8	4.0
7	8-68	1923	8.1	0.42	0.41	0.77	5.8	5.9	5.0
8	9-68	2249	6.4	0.42	0.39	0.72	4.6	4.4	4.0
9	10-30	1392	20.2	0.49	0.44	0.70	15.4	17.6	11.8
10	13-30	1033	10.4	0.47	0.45	0.77	7.1	7.9	7.9
Przeciętnie		–	10.2	0.50	0.48	0.78	8.0	8.3	7.0

Tabela 3. Precyzja i niezawodność pomiaru środków rzutów w blokach o skali zdjęć 1:19 000

Lp.	Nazwa bloku	Liczba pomiarów w środkach rzutów	Błąd średni <i>a priori</i> pomiaru współrzędnej środka rzutów [cm]	Globalna niezawodność wewnętrzna współrzędnej środka rzutów			Średnia kwadratowa poprawka do współrzędnej środka rzutów [cm]		
				dla X	dla Y	dla Z	dla X	dla Y	dla Z
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	C-16	268	20.3	0.27	0.27	0,64	10.6	11.9	14.4
2	G-1	303	11.5	0.44	0.43	0.75	8.7	8.0	8.8
3	G-2	136	7.8	0.26	0.29	0.66	4.2	4.5	6.3
4	J-20	359	7.9	0.13	0.12	0.50	3.3	3.3	5.0
Przeciętnie		–	11.9	0.28	0.28	0.64	6.7	6.9	8.6

Tabela 4. Precyzja i niezawodność pomiaru środków rzutów w blokach o skali zdjęć 1:26 000

Lp.	Nazwa bloku	Liczba pomiarów środków rzutów	Błąd średni <i>a priori</i> pomiaru współrzędnej j środka rzutów [cm]	Globalna niezawodność wewnętrzna współrzędnej środka rzutów			Średnia kwadratowa poprawka do współrzędnej środka rzutów [cm]		
				dla X	dla Y	dla Z	dla X	dla Y	dla Z
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2-1	331	8.1	0.16	0.14	0.56	3.4	3.4	5.3
2	2-2	314	6.9	0.15	0.13	0.54	2.8	2.8	4.7
3	2-a	769	10.4	0.23	0.21	0.64	5.3	5.4	6.9
4	2-b	1510	10.4	0.22	0.20	0.63	5.4	5.5	7.1
5	2-c	1211	8.7	0.18	0.16	0.57	4.1	4.2	5.9
6	3-3	2996	13.3	0.51	0.50	0.78	10.5	10.1	9.7
7	4-7	270	7.5	0.17	0.18	0.60	3.0	3.3	5.9
8	4-a	1261	16.7	0.37	0.34	0.71	10.8	12.6	10.1
9	4-b	2088	10.4	0.22	0.20	0.61	5.4	5.6	6.7
10	4-c2	313	11.5	0.22	0.20	0.60	6.5	5.7	7.5
11	4-d	932	12.7	0.26	0.25	0.66	7.2	7.9	7.8
Przeciętnie		–	10.6	0.24	0.23	0.63	5.9	5.9	7.0

## 6. PODSUMOWANIE

Przeciętna precyzja pomiaru współrzędnych środków rzutów w aerotriangulacjach wykonanych w kraju w ciągu ostatnich kilku lat wynosi 10.7 cm. Ta średnia precyzja, uzyskana na podstawie dość licznej próby zbadanych bloków, może być stosowana jako błąd średni *a priori* pomiaru w badaniach symulacyjnych dla potrzeb projektowania aerotriangulacji, jak również w wyrównaniach, gdy błąd ten nie został określony przez wykonawcę pomiaru.

Badania pokazały również, że globalna niezawodność wewnętrzna pomiaru jest wystarczająca w aerotriangulacjach bloków zdjęć w skali 1:13 000. W aerotriangulacjach bloków o skalach zdjęć 1:19 000 i 1:26 000 niezawodność była zbyt niska dla współrzędnych poziomych środków rzutów. Wynika to przede wszystkim z nie najlepszych założeń dla projektowania aerotriangulacji. Warunki, jakim powinno odpowiadać projektowanie aerotriangulacji w tych skalach, tak aby zostały spełnione kryteria dobrej niezawodności pomiarów, będą przedmiotem dalszych badań.

**LITERATURA**

- Casaca J., 1987, *A reliability criterion for geodetic network design*, *Zeszyty Naukowe, Akademia Górniczo-Hutnicza*, Geodezja 95.
- Foerstner W., 1985, *The reliability of block triangulation*, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. LI, 8, August 1985.
- Gruen A., 1980, *Precision and reliability aspects in close-range photogrammetry*. *Int. Arch. Photogrammetry*, 11(23B) 378–391.
- Kruck E., 2006, *Bingo 5.3 User's Manual*, Geoinformatics & Photogrammetric Engineering.
- Ney B., 1976, *Metody statystyczne w geodezji*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, w Krakowie.
- Prószyński W., Kwaśniak M., 2002, *Niezawodność sieci geodezyjnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Prószyński W., Kwaśniak M., 2006, *Podstawy geodezyjnego wyznaczania przemieszczeń*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Wiśniewski Z., 1990, *Estymacja lokalnych wariancji po wyrównaniu sieci kątowno-liniowych*, *Geodezja i Kartografia*, 1990, tom 39, zeszyt 1-2.
- Wiśniewski Z., 2005, *Rachunek wyrównawczy w geodezji (z przykładami)*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, w Olsztynie.
- Ziobro J., 2006, *Przedwyrównawcze wykrywanie błędów grubych w pomiarze środków rzutów dla aerotriangulacji*, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 16.

*Recenzował: prof. dr hab. inż. Andrzej Majde*



JAN ZIOBRO

*Institute of Geodesy and Cartography*

## **PRECISION AND RELIABILITY OF MEASUREMENTS OF PROJECTION CENTERS IN REAL AEROTRIANGULATIONS**

### *Summary*

Correctness of network adjustment depends on selection of proper functional and statistical model and on eliminating mistakes and gross errors. Fulfilment of these conditions for aerial triangulation can be troublesome, as it involves even four groups of observations, different in character and origin. These groups are sometimes characterised by different precision of measurement, having often only roughly determined mean errors and variable levels of reliability of network observations. It makes more difficult correct weighting of observations and detection of gross errors. Above described problem is particularly related to measurement of projection centers, as observers often report mean error roughly or did not give it at all. The aim of this study was to determine precision of measurement of projection centers obtained in real blocks. The second goal of the work was to estimate reliability of this group of measurements in aerial triangulations for three scales of aerial photographs.

The study was based on renewed data preparation from production blocks, strictly obeying conditions of correctness of adjustment. Adjustment was preceded by pre-adjustment detection of gross errors and bad assignment of measurements into GPS profiles, using method prepared by the author. Production results were derived from various measurement systems and adjustment softwares; they were characterised by numerous imperfections concerning functional and statistical model, which were generally caused by the applied technologies. 25 blocks were selected for testing, applying three scales of aerial photographs: 1:13 000, 1:19 000 and 1:26 000, most frequently used in our country. Appearance of measurement of projection centers (on the average for 90 % of photographs in the block) was the second, important feature of these blocks. Number of photographs in blocks varied from 136 to 3402, and total number of photographs in all blocks was about 30 000.

Verified mean errors *a priori*, obtained from 25 adjustments, reach on the average 10.7 cm and standard deviation is 4.1 cm.

Analysis of global internal reliability of measurement of projection centers for particular scales revealed, that in blocks of photographs at a scale of 1:13 000 average redundancy component reached 0.50 for X, 0.48 for Y and 0.75 for Z. So, it can be concluded, that reliability of measurement of projections centers in these aerial triangulations was sufficient. For these blocks mean residual for all three coordinates of projection center reached 76 % of the average mean error *a priori*. For scales 1:19 000 and 1:26 000, in 9 out of 15 blocks redundancy component of horizontal coordinates of projection centers was lower than 0.25. Sufficient level of reliability was obtained only for one block. Average residual of horizontal coordinates was only ca. 56 % of mean error *a priori*.

Translation: Zbigniew Bochenek

**Keywords:** Aerial triangulation, GPS measurement, precision, reliability