



## Analiza wpływu korekcji *biasu* na dokładność produktów fotogrametrycznych z wysokorozdzielczych danych satelitarnych

MICHALINA WILIŃSKA, MICHAŁ KĘDZIERSKI, RAFAŁ DĄBROWSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,  
Zakład Teledetekcji i Fotogrametrii, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2  
mwilinska@wat.edu.pl, mkedzierski@wat.edu.pl, dabrowski@wat.edu.pl

**Streszczenie.** Celem pracy było przeprowadzenie analizy orientacji scen stereo w zależności od liczby wykorzystanych fotopunktów, zbadanie wpływu odchyłeń standardowych *biasu* na wyniki orientacji oraz ocena dokładnościowa numerycznych modeli terenu i ortoobrazów wygenerowanych z wysokorozdzielczych zobrażeń satelitarnych pozyskanych z satelitów GeoEye-1 oraz Ikonos-2.

W literaturze anglojęzycznej tematykę *biasu*, czyli poprawki wynikającej z podniesienia dokładności korekcji RPC (ang. *Rational Polynomial Coefficient*), poruszają w swoich artykułach C. S. Fraser oraz H. B. Hanley. Podejmują oni głównie problem orientacji wysokorozdzielczych zobrażeń satelitarnych oraz wpływ *biasu* na jej wynik. W Polsce na temat ten napisano niewiele referatów, dlatego też nasz zespół zdecydował się na przeprowadzenie niezależnych badań i analiz.

Satelita GeoEye-1, po umieszczeniu na orbicie we wrześniu 2008 roku, osiągnął swoją pełną zdolność operacyjną już w lutym 2009 roku. Jako jeden z pierwszych dostarczał zobrażeń o półmetrowej rozdzielczości przestrzennej w zakresie panchromatycznym. Dlatego też przedmiotem badań były dwie panchromatyczne stereopary — jedna pozyskana właśnie z satelity GeoEye-1, a druga z Ikonos-2 wystrzelonego w 1999 roku. Zarówno Ikonos-2, jak i GeoEye-1 są reprezentatywnymi satelitami dostarczającymi wysokorozdzielczych danych obrazowych. Charakteryzują się podobnymi parametrami technicznymi, własnościami orbity, pozyskują zobrażenia w trybie panchromatycznym i wielospektralnym, a także dostarczają zobrażeń o rozdzielczości przestrzennej w zakresie panchromatycznym poniżej 1 metra.

Opracowane stereopary przedstawiają miasto Hobart (Australia) oraz jego okolice. Jest to teren zróżnicowany topograficznie, obejmujący zatokę, obszar silnie zurbanizowany oraz zalesione pasmo górskie. Zakres wysokości obejmuje przedział około od 0 do 1300 m. Zróżnicowanie wysokościowe opracowywanego terenu miało znaczący wpływ na jakość finalnych produktów fotogrametrycznych, co również zostało przeanalizowane.

Do opracowania wykorzystano część osnowy fotogrametrycznej pomierzonej w 2004 roku techniką GPS. Do orientacji użyto 19 fotopunktów. Istotą poniższych rozważań było porównanie wyników orientacji przeprowadzonej przy różnej liczbie fotopunktów, z zachowaniem stałej konfiguracji punktów kontrolnych. Na podstawie przeprowadzonej analizy określona została liczba fotopunktów właściwa dla orientacji każdej stereopary.

Kolejnym zagadnieniem była korekcja *biasu* w RPC. Przeprowadzona została analiza zależności zachodzących pomiędzy obrazem a terenem podczas orientacji zobrażeń oraz opisano równania poprawek służące eliminacji *biasu* przed i po orientacji zewnętrznej, przeprowadzonej na podstawie oryginalnych RPC. Istotną kwestią było określenie zależności między wartością błędu RMS (ang. *Root Mean Square*) wykonanej orientacji a odchyleniem standardowym *biasu* w kierunkach osi układu obrazowego (wiersza i kolumny — ang. *line i sample*).

Po określeniu liczby fotopunktów odpowiedniej do wykonania orientacji oraz najkorzystniejszych wartości odchylenia standardowego *biasu* w obu kierunkach, wygenerowane zostały numeryczne modele terenu. Zastosowano cyfrową korelację obrazów metodą ABM (ang. *Area Based Matching*). Wynikowy rozmiar pikseli numerycznych modeli terenu generowanych z obu stereopar wyniósł 10 m. Powstałe modele przebadano pod kątem dokładności pionowej położenia punktu, poprzez porównanie wysokości pomierzonych techniką GPS z tożsamymi wysokościami pomierzonymi na danym modelu wysokościowym.

Kolejnym etapem było wygenerowanie ortoobrazów z pojedynczych zdjęć ze stereopary oraz przeanalizowanie ich dokładności. Wymiar oczka generowanych produktów fotogrametrycznych wyniósł odpowiednio dla GeoEye-1 0,5 m i 1 m dla Ikonos-2. Analiza dokładności została przeprowadzona na podstawie porównania odległości między punktami kontrolnymi, pomierzonymi na ortoobrazach i niebiorącymi udziału w orientacji, a odległościami obliczonymi ze współrzędnych pomierzonych za pomocą techniki GPS.

Opracowanie to dotyczy wyżej wymienionych zagadnień. Całość została zakończona podsumowaniem oraz wnioskami wynikłymi w trakcie badań.

**Słowa kluczowe:** fotogrametria, GeoEye-1, Ikonos-2, RPC, korekcja *bias*, orientacja scen stereo, NMT, ortoobraz

## 1. Charakterystyka systemów obrazujących — Ikonos-2 i GeoEye-1

We wrześniu 1999 roku, tuż po nieudanym starcie satelity Ikonos-1, umieszczono na orbicie system Ikonos-2, który stał się pierwszym i przez dwa lata jedynym komercyjnym systemem dostarczającym obrazy z metrowym pikselem. Skaner Ikonosa może rejestrować obrazy powierzchni Ziemi z rozdzielczością przestrzenną 1 m (0,82 m w nadirze) w zakresie panchromatycznym oraz 4 m (3,28 m w nadirze) w przypadku rejestracji wielospektralnej. Możliwe jest wykonywanie zobrażeń przy zmiennym kącie obserwacji oraz z możliwością odchylenia osi optycznej skanera do 60 stopni od nadiru (w dowolnym kierunku) w celu zwiększenia częstości rejestracji oraz pozyskiwania obrazów stereoskopowych.

Satelita GeoEye-1 został wystrzelony we wrześniu 2008 roku i jest jednym z najnowszych komercyjnych satelitów wysokorozdzielczych pozyskujących zobrażenia Ziemi. GeoEye-1 dostarcza obrazy panchromatycznych o rozdzielczości 0,41 m (w nadirze) i wielospektralnych o rozdzielczości 1,65 m. Jednakże

ze względu na ograniczenia nałożone przez rząd Stanów Zjednoczonych, klienci komercyjni mają dostęp jedynie do zobrazowań przepróbkowanych do półmetrowej rozdzielczości terenowej. W trybie stereo tak wysoka rozdzielczość i dokładne efemerydy satelity umożliwiają określenie współrzędnych odofotografowanych obiektów z dokładnością 2 m (w poziomie) i 3 m (w pionie). Natomiast w trybie mono dokładność lokalizacji wynosi 2,5 m. W celu osiągnięcia takich dokładności nie ma potrzeby korzystania z punktów osnowy.

## 2. Charakterystyka dostępnych danych

Badania przeprowadzono na czterech scenach satelitarnych — jedna stereopara została pozyskana przez satelitę Ikonos-2, druga przez GeoEye-1. Obie stereopary obejmują znaczne fragmenty miasta Hobart w Australii. Zobrazowania obejmują teren o powierzchni około 120 km<sup>2</sup>, przy czym charakteryzuje się on zróżnicowaną topografią. Północno-wschodnia część obrazu to obszar wysokozurbanizowany o wysokości zbliżonej do poziomu morza, natomiast południowo-zachodnia część to obszar górzisty, pokryty lasami ze szczytem Mount Wellington o wysokości 1260 m n.p.m.

Dane pozyskane przez satelitę Ikonos-2 to panchromatyczna stereopara zarejestrowana w lutym 2004 roku. Charakteryzuje się ona rozdzielczością przestrzenną równą 1 m. Zobrazowania mają rozmiar 12 na 13 km. Obie sceny dostarczono w formacie GeoTiff (11 bitów) wraz z metadanymi i RPC. Na obu scenach, w ich południowo-zachodniej części, widoczna jest dość duża chmura. Nie stanowiła ona jednak przeszkody w procesie orientacji scen oraz generowaniu numerycznego modelu terenu i ortoobrazów.

Stereopara pozyskana przez satelitę GeoEye-1 to również 11-bitowe sceny panchromatyczne w formacie GeoTiff, zarejestrowane w lutym 2009 roku. Obejmują one obszar 13,5 km (w kierunku wschód–zachód) na 15,8 km (w kierunku północ–południe) i charakteryzują się półmetrową rozdzielczością przestrzenną. Producent dołączył do nich zarówno metadane i RPC.

Osnowę fotogrametryczną stanowią fotopunkty pomierzone sześć lat temu techniką GPS. Dostępnych jest 119 fotopunktów, jednak w wyniku wyboru tych, które mogą zostać zidentyfikowane zarówno na zobrazowaniach Ikonosa-2 jak i GeoEye-1, wyselekcjonowano 54 fotopunkty. Pozostałe fotopunkty nie były możliwe do zidentyfikowania na zobrazowaniach GeoEye-1 z powodu zmian sytuacji terenowej (krawędzie skrzyżowań, boiska i korty tenisowe zostały przebudowane, zatem punkty umieszczone na nich zostały przemieszczone lub były niemożliwe do określenia). Trzy spośród 54 fotopunktów znajdują się na szczycie góry Mount Wellington (na wysokości 1260 m), natomiast połowa fotopunktów zlokalizowana jest na rondach drogowych i okrągłych zbiornikach. Stanowiska pomiarowe na rondach zostały określone

z dokładnością pomiaru GPS 5 cm. Fotopunkty posiadają współrzędne w układzie UTM South strefa 55. Spośród 54 fotopunktów, po przeprowadzonej analizie, do orientacji stereopar przyjętych zostało 19 punktów.

### 3. Orientacja scen satelitarnych

Opracowanie ortofotomapy, a wcześniej NMT, z obrazów satelitarnych wymaga opisanie związków geometrycznych pomiędzy powierzchnią Ziemi a jej obrazem. Podstawą korekcji geometrycznej jest określenie matematycznego związku między współrzędnymi terenowymi punktów ( $\varphi, \lambda, h$ ) a współrzędnymi ich obrazów ( $l, s$ ).

Możemy wyróżnić i opisać kilka metod korekcji geometrycznej:

- transformacja rzutowa — określa zależność rzutową pomiędzy punktami układu pierwotnego i wtórnego. Do określenia wartości współczynników transformacji niezbędne są cztery punkty rozmieszczone tak, aby żadne trzy nie leżały na jednej prostej;
- zwykły model wielomianowy typu 2D — polega na „wpasowaniu” płaskiego obrazu w płasko potraktowaną powierzchnię terenu za pomocą transformacji wielomianowej odpowiedniego stopnia. Model ten nie uwzględnia rzeźby terenu [7];
- zwykły model wielomianowy typu 3D — od poprzedniego różni się uwzględnieniem rzeźby terenu (trzeciego wymiaru), jednak wymaga znacznej liczby punktów dostosowania i jest bardzo czuły na nierównomierny rozkład tych punktów na obszarze [7];
- ilorazowy model wielomianowy — jest to model typu 3D, opisujący relacje teren–obraz w postaci ilorazu wielomianów (ang. *Rational Functional Polynomial* — RFP lub *Rational Polynomial Coefficients* — RPC). Poszczególne wyrazy wielomianu nie mają prostej interpretacji fizycznej czy geometrycznej, związanej z parametrami kamery czy czynnikami zniekształcającymi obraz, dlatego mówi się, że jest to model „nieparametryczny”. Wartość współczynników wielomianów określa się w procesie wyrównawczym na podstawie fotopunktów [7];
- model parametryczny — opisuje ściśle geometryczne relacje między terenem i jego obrazem. Musi więc uwzględniać wieloźródłowe czynniki zniekształcające. Taki ścisły model opiera się na warunku kolinearności, który można odnieść nie do całego obrazu, a tylko do jego pojedynczej linii. Wartość elementów orientacji zmienia się w sposób ciągły, więc należy mówić o funkcji tych elementów zależnej od czasu. Modele takie zawierają szereg niewiadomych elementów — parametrów, których wartość dla konkretnego obrazu wyznacza się na podstawie fotopunktów o znanym położeniu terenowym, odwzorowanych na obrazie.

Model parametryczny opisuje rzeczywiste relacje geometryczne, tak więc poszczególne wyrazy modelu mają konkretną interpretację geometryczną. Modele parametryczne powinny dawać lepsze wyniki niż modele nieparametryczne, być bardziej odporne na rozkład fotopunktów i ewentualne błędy w danych oraz wymagać mniejszej liczby fotopunktów koniecznych do wyznaczenia niewiadomych parametrów [7].

#### 4. Model błędów Ikonosa-2 i GeoEye-1

W poniższym opracowaniu zajmiemy się szczegółowo wpływem korekcji *bias* na współczynniki wielomianów ilorazowych.

RPC (ang. *Rational Polynomial Coefficient*) jest matematycznym modelem przedstawiającym zależność między współrzędnymi przestrzennymi ( $\varphi$  — szerokość geograficzna,  $\lambda$  — długość geograficzna,  $h$  — wysokość) a obrazowymi ( $l$  — nr wiersza,  $s$  — nr kolumny obrazu w pikselach). RPC jest modelem opierającym się na ilorazie dwóch wielomianów stopnia trzeciego zależnych od współrzędnych przestrzennych.

Współrzędne obrazowe dowolnego punktu obrazu  $l, s$  mogą zostać znormalizowane — przesunięte i przeskalowane (ang. *offset* i *scaled*) do  $l_n$  i  $s_n$ , jak przedstawia równanie (1) i (2) [3-5]

$$l_n = \frac{l - \text{LineOffset}}{\text{LineScale}}, \quad (1)$$

$$s_n = \frac{s - \text{SampleOffset}}{\text{SampleScale}}, \quad (2)$$

gdzie:  $l_n, s_n$  — znormalizowane współrzędne obrazowe  $l$  i  $s$ ;  
 $l, s$  — współrzędne obrazowe pomierzonego punktu.

Wartości współrzędnych przesuniętych (ang. *offset*) są wyznaczane dla wszystkich punktów siatki pikseli i obliczane jako średnie wyrażone w równaniach (3) i (4) [2]

$$\text{LineOffset} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Line}_i, \quad (3)$$

$$\text{SampleOffset} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Sample}_i, \quad (4)$$

gdzie  $n$  to liczba wszystkich punktów siatki pikseli.

Wartości przeskalowane (ang. *scale*) są wyznaczone z zależności (5) i (6) [2].

$$\text{LineScale} = \max(|\text{Line}_{\max} - \text{LineOffset}|, |\text{Line}_{\min} - \text{LineOffset}|), \quad (5)$$

$$\text{SampleScale} = \max(|\text{Sample}_{\max} - \text{SampleOffset}|, |\text{Sample}_{\min} - \text{SampleOffset}|) \quad (6)$$

W ten sam sposób, co współrzędne obrazowe, możemy znormalizować współrzędne przestrzenne dowolnego punktu terenu do  $X, Y, Z$ . Możemy wyrazić je poprzez zależności (7)-(9) [2].

$$X = \frac{\varphi - \text{LatitudeOffset}}{\text{LatitudeScale}}, \quad (7)$$

$$Y = \frac{\lambda - \text{LongitudeOffset}}{\text{LongitudeScale}}, \quad (8)$$

$$Z = \frac{h - \text{HeightOffset}}{\text{HeightScale}}, \quad (9)$$

gdzie:  $X, Y, Z$  — znormalizowane współrzędne przestrzenne;  
— współrzędne geograficzne punktu terenowego.

Podobnie, jak w przypadku wierszy i kolumn, wartości współrzędnych przesuniętych (ang. *offset*) dla współrzędnych geograficznych są wyznaczone jako średnie wyrażone w równaniach (10), (11) i (12) [2].

$$\text{LatitudeOffset} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Latitude}_i, \quad (10)$$

$$\text{LongitudeOffset} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Longitude}_i, \quad (11)$$

$$\text{HeightOffset} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Height}_i, \quad (12)$$

gdzie  $n$  to liczba wszystkich punktów siatki pikseli.

Natomiast odpowiednio wartości współrzędnych przeskalowanych są wyznaczone z zależności (13), (14) i (15) [2].

$$\text{LatitudeScale} = \max(|\text{Latitude}_{\max} - \text{LatitudeOffset}|, |\text{Latitude}_{\min} - \text{LatitudeOffset}|), \quad (13)$$

$$\text{LongitudeScale} = \max(|\text{Longitude}_{\max} - \text{LongitudeOffset}|, |\text{Longitude}_{\min} - \text{LongitudeOffset}|), \quad (14)$$

$$\text{HeightScale} = \max(|\text{Height}_{\max} - \text{HeightOffset}|, |\text{Height}_{\min} - \text{HeightOffset}|). \quad (15)$$

Znormalizowane wartości  $l_n$  i  $s_n$  możemy powiązać ze znormalizowanymi wartościami  $X, Y, Z$  poprzez równania (16) i (17), gdzie  $Num$  oznacza licznik, a  $Den$  — mianownik [2].

$$F_1 = l_n = \frac{Num_L(X, Y, Z)}{Den_L(X, Y, Z)}, \quad (16)$$

$$F_2 = s_n = \frac{Num_S(X, Y, Z)}{Den_S(X, Y, Z)}. \quad (17)$$

Poszczególne wyrażenia mają wartości przedstawione w równaniach (18)-(21), gdzie  $a, b, c$  i  $d$  to współczynniki wielomianów [2].

$$\begin{aligned} Num_L(X, Y, Z)_j = & a_1 + a_2X + a_3Y + a_4Z + a_5XY + a_6XZ + a_7YZ + a_8X^2 + \\ & + a_9Y^2 + a_{10}Z^2 + a_{11}XYZ + a_{12}X^3 + a_{13}XY^2 + a_{14}XZ^2 + \\ & + a_{15}X^2Y + a_{16}Y^3 + a_{17}YZ^2 + a_{18}X^2Z + a_{19}Y^2Z + a_{20}Z^3. \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} Den_L(X, Y, Z)_j = & b_1 + b_2X + b_3Y + b_4Z + b_5XY + b_6XZ + b_7YZ + b_8X^2 + \\ & + b_9Y^2 + b_{10}Z^2 + b_{11}XYZ + b_{12}X^3 + b_{13}XY^2 + b_{14}XZ^2 + \\ & + b_{15}X^2Y + b_{16}Y^3 + b_{17}YZ^2 + b_{18}X^2Z + b_{19}Y^2Z + b_{20}Z^3. \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} Num_S(X, Y, Z)_j = & c_1 + c_2X + c_3Y + c_4Z + c_5XY + c_6XZ + c_7YZ + c_8X^2 + \\ & + c_9Y^2 + c_{10}Z^2 + c_{11}XYZ + c_{12}X^3 + c_{13}XY^2 + c_{14}XZ^2 + \\ & + c_{15}X^2Y + c_{16}Y^3 + c_{17}YZ^2 + c_{18}X^2Z + c_{19}Y^2Z + c_{20}Z^3. \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} Den_S(X, Y, Z)_j = & d_1 + d_2X + d_3Y + d_4Z + d_5XY + d_6XZ + d_7YZ + d_8X^2 + \\ & + d_9Y^2 + d_{10}Z^2 + d_{11}XYZ + d_{12}X^3 + d_{13}XY^2 + d_{14}XZ^2 + \\ & + d_{15}X^2Y + d_{16}Y^3 + d_{17}YZ^2 + d_{18}X^2Z + d_{19}Y^2Z + d_{20}Z^3. \end{aligned} \quad (21)$$

Do badań wykorzystano zobrazenia stereoskopowe, w których to wyznaczanie współrzędnych terenowych punktów z RPC odbywa się poprzez wcięcie przestrzenne,

a wyrównanie (równanie poprawek (22)) przeprowadzone jest metodą najmniejszych kwadratów [3-5]:

$$\begin{pmatrix} v_l \\ v_s \end{pmatrix}_{ij} = A_{ij} \begin{pmatrix} \delta\varphi \\ \delta\lambda \\ \delta h \end{pmatrix}_j + \begin{pmatrix} l^0 - l \\ s^0 - s \end{pmatrix}_{ij}, \quad (22)$$

gdzie:  $v_l$  i  $v_s$  — obserwowane odchyłki w pikselach;  
 $\delta\varphi$ ,  $\delta\lambda$  i  $\delta h$  — poprawki do aproksymowanych wartości współrzędnych geograficznych;  
 $l^0$  i  $s^0$  — współrzędne obrazowe odpowiadające aproksymowanym współrzędnym obiektu;  
 $A_{ij}$  — macierz pochodnych cząstkowych funkcji  $l_n$  i  $s_n$ ;  
 $l$  i  $s$  — zaobserwowane współrzędne obrazowe.

Równanie (22) daje nam możliwość wyznaczenia współrzędnych terenowych dowolnego punktu dzięki RPC, aczkolwiek nie uwzględnia ono znaczenia *biasu* w orientacji zewnętrznej, gdzie jest nieodłącznym elementem zobrazowań dostarczanych bez dodatkowych fotopunktów.

W statystyce pojęcie *biasu* stosuje się w przypadku estymatorów nieobciążonych. Aby oszacować np. nieznaną wartość średnią populacji  $\mu$ , przy danej próbie losowej  $X_1, \dots, X_n$ , możemy użyć estymatora wyrażonego równaniem (23).

$$\hat{\mu}(X_1, \dots, X_n) = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (23)$$

gdzie:  $\hat{\mu}$  — estymator wartości oczekiwanej;  
 $X_1, \dots, X_n$  — próba losowa;  
 $n$  — liczebność próby.

Wartość oczekiwaną estymatora  $\hat{\mu}$  można obliczyć z równania (24).

$$E\hat{\mu}(X_1, \dots, X_n) = E \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n EX_i}{n} = \frac{n\mu}{n} = \mu. \quad (24)$$

Z równania (24) wynika, że wartością oczekiwaną tego estymatora jest wartość estymowanej wielkości, tj.  $\mu$ , czyli  $\hat{\mu}$  jest nieobciążonym estymatorem  $\mu$ .

W ogólnym przypadku mówi się, że  $\hat{\mu}$  jest nieobciążonym (ang. *unbiased*) estymatorem  $\mu$ , jeśli  $E\hat{\mu} = \mu$ . Różnicę  $E\hat{\mu} - \mu$  nazywamy obciążeniem (ang. *bias*) estymatora, a w przypadku estymatorów nieobciążonych jest ona równa 0. Nieobciążoność jest bardzo naturalną i pożądaną własnością estymatora, gdyż gwarantuje



ona, że oceny otrzymywane za jego pomocą są wolne od błędu systematycznego [6].

*Bias* we współrzędnych obrazowych może być wyznaczony poprzez bezpośrednie porównanie pomierzonych współrzędnych obrazowych z ich odpowiednikami wyznaczonymi z pomierzonych GCP, jak w równaniach (16) i (17).

Model korekcji *biasu*, na który składa się jeden parametr offset przypadający na jedno zdjęcie, może być wyznaczony z zależności wyrażonej równaniem (25) [3-5].

$$\begin{pmatrix} v_l \\ v_s \end{pmatrix}_{i_j} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_1}{\partial \lambda} & \frac{\partial F_1}{\partial h} & 1 & 0 \\ \frac{\partial F_2}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_2}{\partial \lambda} & \frac{\partial F_2}{\partial h} & 0 & 1 \end{pmatrix}_{ij} \begin{pmatrix} \partial \varphi_j \\ \partial \lambda_j \\ \partial h_j \\ A_{0i} \\ B_{0i} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l^0 - l \\ s^0 - s \end{pmatrix}_{ij}. \quad (25)$$

W równaniu (26)  $A_{0i}$  i  $B_{0i}$  są odchyłkami współrzędnych obrazowych, które są wspólne dla zdjęcia  $i$ . W przypadku gdy pod uwagę bierze się również wpływ dryftu, do wyrażenia (25) wprowadzamy dodatkowo parametry  $A_{1i}$  i  $B_{1i}$ . Finalnie otrzymujemy równanie (26) [3-5].

$$\begin{pmatrix} v_l \\ v_s \end{pmatrix}_{i_j} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_1}{\partial \lambda} & \frac{\partial F_1}{\partial h} & 1 & 0 & l & 0 \\ \frac{\partial F_2}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_2}{\partial \lambda} & \frac{\partial F_2}{\partial h} & 0 & 1 & 0 & s \end{pmatrix}_{ij} \begin{pmatrix} \partial \varphi_j \\ \partial \lambda_j \\ \partial h_j \\ A_{0i} \\ B_{0i} \\ A_{1i} \\ B_{1i} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l^0 - l \\ s^0 - s \end{pmatrix}_{ij}. \quad (26)$$

Aby przeprowadzić powyższe wyrównanie, potrzebne są co najmniej 2 fotopunkty.

## 5. Model korekcji *bias*

Jedną z możliwości korekcji *biasu* jest dodatkowy pomiar fotopunktów na zobrazowaniach już po przeprowadzeniu orientacji zewnętrznej na podstawie oryginalnych RPC. Możliwość wyznaczenia parametrów *biasu*  $A_0$  i  $B_0$  jest bardzo użyteczna, jednak głównym celem jest eliminacja jego wpływu poprzez ingerencję w oryginalne współczynniki, a następnie generowanie RPC już wolnych od *biasu*. Pozwoliłoby to na wyznaczenie współrzędnych terenowych dowolnego punktu na

zobrazowaniu bez dodatkowych równań poprawek. Wolne od *biasu* RPC możemy pozyskać w sposób przedstawiony w równaniach (27) i (28) [3-5].

$$l_n + A_{0n} = \frac{Num_L(X, Y, Z)}{Den_L(X, Y, Z)}, \quad (27)$$

$$s_n + B_{0n} = \frac{Num_S(X, Y, Z)}{Den_S(X, Y, Z)}. \quad (28)$$

W równaniach (27) i (28)  $A_{0n}$  i  $B_{0n}$  są powiązane z  $A_0$  i  $B_0$  zależnościami (29) i (30) [3-5].

$$A_{0n} = \frac{A_0}{LineScale}, \quad (29)$$

$$B_{0n} = \frac{B_0}{SampleScale}. \quad (30)$$

Wtedy zależności (27) i (28) mogą być zapisane w postaci równań (31) i (32) [3-5].

$$\begin{aligned} l_n &= \frac{Num_L(X, Y, Z)}{Den_L(X, Y, Z)} - A_{0n} = \frac{Num_L(X, Y, Z) - A_{0n} \cdot Den_L(X, Y, Z)}{Den_L(X, Y, Z)} = \\ &= \frac{Num_L^C(X, Y, Z)}{Den_L(X, Y, Z)}, \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} s_n &= \frac{Num_S(X, Y, Z)}{Den_S(X, Y, Z)} - B_{0n} = \frac{Num_S(X, Y, Z) - B_{0n} \cdot Den_S(X, Y, Z)}{Den_S(X, Y, Z)} = \\ &= \frac{Num_S^C(X, Y, Z)}{Den_S(X, Y, Z)}. \end{aligned} \quad (32)$$

gdzie:

$$Num_L^C(X, Y, Z) = (a_1 - b_1 A_{0n}) + (a_2 - b_2 A_{0n}) \cdot X + \dots + (a_{20} - b_{20} A_{0n}) \cdot Z^3, \quad (33)$$

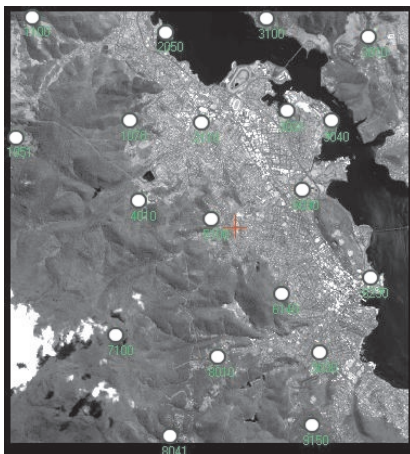
$$Num_S^C(X, Y, Z) = (c_1 - d_1 B_{0n}) + (c_2 - d_2 B_{0n}) \cdot X + \dots + (c_{20} - d_{20} B_{0n}) \cdot Z^3. \quad (34)$$

W sposób wyrażony w równaniach (33) i (34) możemy wyeliminować wpływ *biasu* poprzez ingerencję w oryginalne RPC.

## 6. Analiza wartości błędu RMS w zależności od liczby fotopunktów

Prace badawcze zostały wykonane w programie *Leica Photogrammetry Suite 9.2* w jednolitym układzie współrzędnych UTM South, strefa 55.

Pierwszym etapem było wykonanie orientacji obu stereopar przy wykorzystaniu różnej liczby fotopunktów oraz porównanie wyników przeprowadzonych badań. Do orientacji zostało wykorzystanych 19 punktów o znanych współrzędnych terenowych. Ich lokalizacja została przedstawiona na rysunku 1. Badanie polegało na przeprowadzeniu wyrównania dla różnej liczby fotopunktów, przy stałej liczbie i konfiguracji punktów kontrolnych.



Rys. 1. Lokalizacja punktów na scenie GeoEye-1

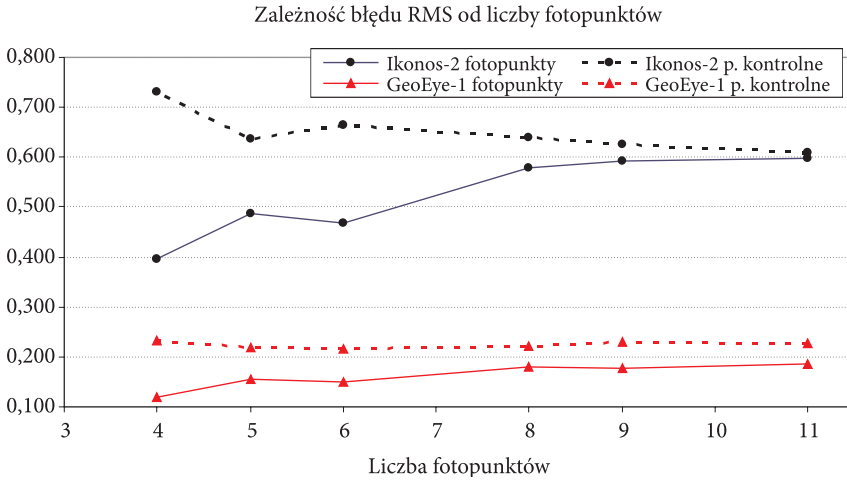
Dla obu stereopar zastosowano identyczny schemat konfiguracji fotopunktów względem punktów kontrolnych. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Wyniki orientacji scen dla różnej liczby fotopunktów

Liczba fotopunktów		4	5	6	8	9	11
Liczba punktów kontrolnych		8	8	8	8	8	8
RMS [m] Ikonos-2	fotopunkty	0,396	0,488	0,469	0,579	0,593	0,598
	p. kontrolne	0,732	0,636	0,664	0,641	0,625	0,609
RMS [m] GeoEye-1	fotopunkty	0,118	0,154	0,149	0,180	0,178	0,186
	p. kontrolne	0,233	0,219	0,216	0,222	0,230	0,228

Zależność pomiędzy błędem RMS a liczbą fotopunktów na analizowanych stereoparach przedstawiona została na rysunku 2.



Rys. 2. Zależność błędu RMS od zastosowanej liczby fotopunktów

Jak widać na rysunku 2, w przypadku stereopary pozyskanej przez GeoEye-1 i Ikonosa-2 następuje wzrost wartości błędu RMS dla punktów kontrolnych, a spadek dla fotopunktów. Pozornie można stwierdzić, że najwłaściwsze byłoby wykorzystanie 4 fotopunktów, ponieważ dla obu przypadków błąd RMS dla fotopunktów jest najmniejszy. Jednakże po zaobserwowaniu błędów średniokwadratowych dla punktów kontrolnych widać, że ich wartość wzrasta podczas zmniejszania liczby fotopunktów. Dlatego też najkorzystniej będzie wykorzystać 8 fotopunktów do przeprowadzenia orientacji scen stereo pozyskanych przez Ikonos-2 i GeoEye-1.

Zastosowanie mniejszej liczby fotopunktów niż 4 i większej niż 11 byłoby nieuzasadnione, gdyż błędy nie ulegały już zmianom, natomiast równomierność pokrycia sceny była niedostateczna dla mniejszej liczby fotopunktów niż 4 i nadmierna dla większej niż 11. Na podstawie porównania można stwierdzić, że do przeprowadzenia orientacji badanych zobrażeń z wystarczającą dokładnością należy wykorzystać 8 fotopunktów.

## 7. Analiza błędu orientacji w zależności od wartości odchylenia standardowego składowych korekcji *bias*

Na podstawie poprzedniego porównania można stwierdzić, że odpowiednią liczbą fotopunktów do przeprowadzenia wyrównania obu stereopar jest 8 fotopunktów. Dla tej właśnie liczby wykonano analizę wyników orientacji w zależności

od zmiany odchylenia standardowego składowych korekcji *bias*. Jej celem było określenie, jakie wartości będzie przyjmował błąd RMS na fotopunktach przy zmianie odchylen standardowych składowych *biasu* w kierunkach osi *l* i *s* (ang. *line* i *sample*). Parametry  $\sigma_{Line}$  i  $\sigma_{Sample}$  zmieniano o tę samą wartość pikseli. Wyniki analizy zamieszczono w tabeli 2 oraz na rysunkach 3 i 4.

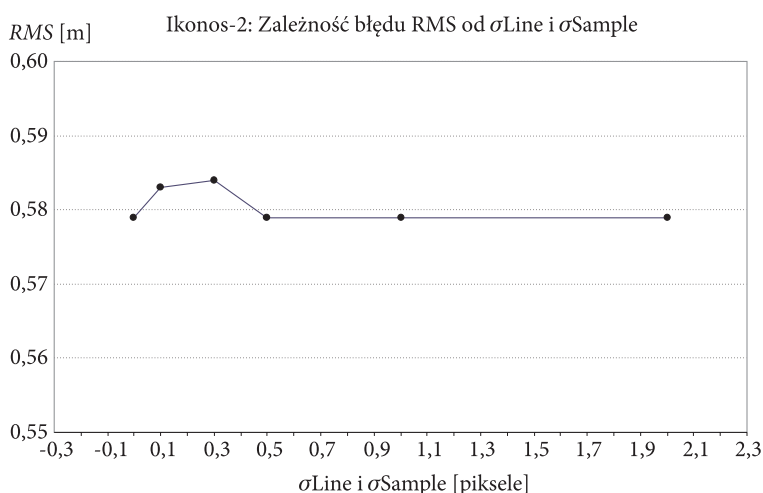
TABELA 2

Wyniki wyrównania dla różnych wartości odchylenia standardowego składowych korekcji *bias* w kierunkach *line* i *sample*

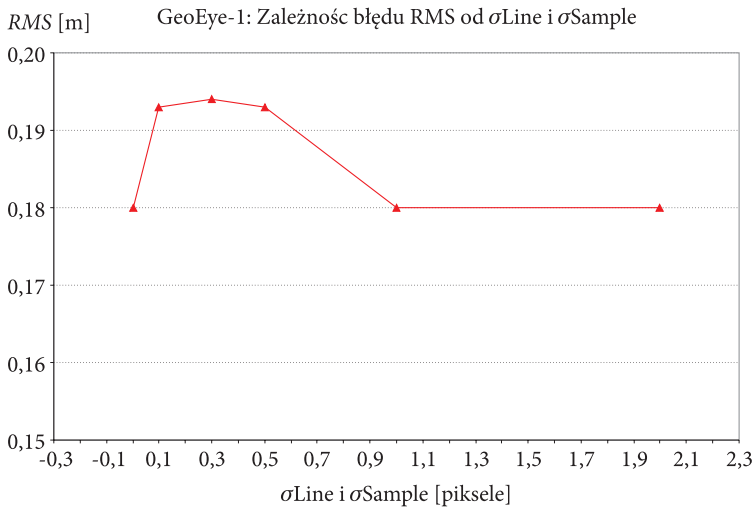
$\sigma_{Line} / \sigma_{Sample}$ [piksele]	0,0	0,1	0,3	0,5	1,0	2,0	3,0	5,0
RMS [m] Ikonos-2	0,579	0,583	0,584	0,579	0,579	0,579	0,579	0,579
RMS [m] GeoEye-1	0,180	0,193	0,194	0,193	0,180	0,180	0,180	0,180

Jak widać na rysunkach 3 i 4, początkowo przy zwiększaniu parametrów  $\sigma_{Line}$  i  $\sigma_{Sample}$  błąd RMS rośnie. Następnie przy pewnym poziomie odchylen standardowych składowych ( $\sigma_{Line}/\sigma_{Sample} = 0,5$  piksela dla Ikonosa-2 oraz  $\sigma_{Line}/\sigma_{Sample} = 1$  piksel dla GeoEye-1) osiąga swą początkową wartość i nie zmienia się przy kolejnych wzrostach  $\sigma_{Line}$  i  $\sigma_{Sample}$ .

Na podstawie powyższej analizy można stwierdzić, jaki jest przedział wartości odchylen standardowych składowych korekcji *bias* powodujący wzrost błędów RMS na fotopunktach (negatywnie wpływający na wyniki orientacji stereopar). Dla stereopary Ikonosa-2 jest on równy (0-0,5) piksela, natomiast dla zobrazowań GeoEye-1 (0-1,0) piksela.



Rys. 3. Zależność błędu RMS na fotopunktach od odchylenia standardowego korekcji *bias* w kierunkach *Line* i *Sample* dla stereopary Ikonos-2



Rys. 4. Zależność błędu RMS na fotopunktach od odchylenia standardowego korekcji *bias* w kierunkach *Line* i *Sample* dla stereopary GeoEye-1

## 8. Generowanie numerycznych modeli terenu

Na podstawie zorientowanych scen stereoskopowych wygenerowano numeryczne modele terenu, które powstały w wyniku automatycznego pomiaru punktów siatki wysokościowej metodą korelacji obrazów cyfrowych. Stosowaną metodą korelacji obrazów była metoda ABM (ang. *Area Based Matching*), bazująca na algorytmach analizy sygnału, poszukująca charakterystycznych wartości bądź różnic sygnałów, którymi są np. gęstości optyczne pikseli. W wykorzystanej metodzie korelacji krzyżowej miarą podobieństwa pomiędzy obrazami jest obliczany maksymalny współczynnik korelacji. Obszar, któremu przypisany jest współczynnik o największej wartości, zostaje uznany za odpowiednik wzorca. Metoda ta ma dwie zasadnicze zalety: jest szybka i niezależna od różnic jasności między zdjęciami. Jednak nie nadaje się do korelacji obrazów, które mają różne skale lub deformacje spowodowane różnicami wysokości, z jakich wykonywane były zobrazowania [1].

Podczas generowania NMT należało uwzględnić typ terenu podlegającego opracowaniu. Stereopary obejmują zróżnicowany pod względem topograficznym obszar — od płaskiego i wysoce zurbanizowanego na wysokości poziomu morza, aż do górskiego pokrytego lasem, z najwyższym szczytem na wysokości 1260 m. W związku z tym wyodrębniono dwa jednorodne morfologicznie podobszary: płaski, wysoko zurbanizowany oraz górzysty i pokryty lasem. Dla obszaru płaskiego okno poszukiwawcze miało rozmiar  $19 \times 3$  piksele, natomiast okno korelacji  $7 \times 7$  pikseli. Dla obszaru górzystego okno poszukiwawcze miało  $21 \times 3$  pikseli, a okno korelacji też  $7 \times 7$  pikseli. Współczynnik korelacji przyjęto na poziomie na 0,85.

TABELA 3

Ocena dokładności wygenerowanych numerycznych modeli terenu

Nr fotopunktu	Teren	GeoEye-1	Ikonos-2	$Z_T - Z_G$	$Z_T - Z_I$
	$Z_T$	$Z_G$	$Z_I$		
	[m]			[m]	
1010	94,46	94,34	95,65	0,13	-1,19
1020	59,03	58,80	59,43	0,23	-0,40
1030	129,69	125,66	127,89	4,03	1,79
1080	367,13	365,94	365,32	1,18	1,81
3020	9,07	7,52	3,64	1,56	5,43
3050	21,02	20,69	23,44	0,33	-2,42
4030	114,22	112,88	113,80	1,34	0,42
6174	4,94	4,89	5,14	0,05	-0,20
7020	1256,76	1256,39	1256,23	0,37	0,52
9110	-2,49	-0,69	-0,27	-1,81	-2,22
9170	232,20	232,94	233,00	-0,75	-0,81
2090	41,62	41,12	42,21	0,51	-0,58
6210	102,87	101,69	99,78	1,18	3,09
9050	224,88	225,03	225,69	-0,15	-0,81
			RMSE [m]	5,26	7,75

Następnym uwzględnianym parametrem była gęstość punktów pomiarowych, na podstawie których interpolowana była właściwa siatka punktów NMT. Gęstość ta uzależniona była od zróżnicowanej topografii terenu oraz wysokiej rozdzielczości wykorzystanych zobrażeń. Wymiar piksela numerycznego modelu terenu w przypadku obu stereopar został ustalony na 10 m.

Do oceny dokładności wygenerowanych modeli wykorzystano fotopunkty, które nie brały udziału w orientacji scen. Porównane zostały wysokości fotopunktów wyznaczone w terenie z wysokościami pomierzonymi na odpowiednich numerycznych modelach terenu. Wyniki porównania przedstawiono w tabeli 3. Jak widać, błąd RMS dla numerycznego modelu terenu wygenerowanego ze stereopary GeoEye-1 jest mniejszy niż w przypadku Ikonosa-2. Dla GeoEye-1 wynosi on 5,26 metra, natomiast dla Ikonosa-2 — 7,75 m.

## 9. Generowanie ortoobrazów

Po utworzeniu numerycznych modeli terenu wygenerowano ortoobrazy. Wykorzystano do tego te sceny ze stereopar, które zostały pozyskane przy wychyleniu sensora w przód. Ortoobraz ze sceny GeoEye-1 został wygenerowany z oczkiem równym 0,5 m, a z obrazowania Ikonos — 1 m. Wykorzystana metoda przepróbkowania to transformacja biliniowa.

TABELA 4

Wyniki porównania odległości pomierzonych na ortoobrazach

Odległość między punktami		Odległość ze współrzędnych	Odległość pomierzona na ortoobrazie		Odchyłki	
			GeoEye-1	Ikonos-2		
		$D_T$	$D_G$	$D_I$	$D_T - D_G$	$D_T - D_I$
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
Kierunek W-E						
1080	3050	8951,75	8949,68	8948,16	2,08	3,59
1030	3020	7304,07	7304,99	7304,85	-0,92	-0,78
4030	6174	5421,37	5421,10	5420,74	0,28	0,63
7120	9110	7819,50	7820,14	7818,27	-0,63	1,24
7020	9140	6533,39	6534,89	6535,08	-1,49	-1,68
				RMSE [m]	2,81	4,27
Kierunek N-S						
3020	9110	8459,95	8458,64	8457,92	1,31	2,03
3110	9140	12054,44	12055,16	12055,67	-0,72	-1,23
1020	9170	13034,27	13033,82	13033,16	0,45	1,11
1030	8060	12114,42	12115,49	12115,91	-1,07	-1,49
1080	7120	7908,35	7907,06	7907,27	1,29	1,08
				RMSE [m]	2,29	3,20

Analiza dokładności została przeprowadzona na podstawie porównania odległości pomierzonych na wygenerowanych ortoobrazach, a ich odpowiedników wyliczonych na podstawie współrzędnych. Odległości mierzone były w kierunku północ-południe oraz wschód-zachód. Wyniki pomiarów zostały przedstawione w tabeli 4.

Jak widać w tabeli 4, błąd RMS dla odległości pomierzonych na ortoobrazie wygenerowanym z obrazowania pozyskanego przez satelitę GeoEye-1 wynosi



około 2,5 m (5,0 pikseli), natomiast dla Ikonos-2 oscyluje wokół 3,7 m (3,7 pikse-la). Świadczy to o wyższej dokładności produktu fotogrametrycznego, jakim jest ortoobraz wygenerowany z zobrazenia pozyskanego przez GeoEye-1.

## Podsumowanie

Podsumowując powyższe rozważania, można dojść do wniosku, że korekcja *bias* jest bardzo istotnym czynnikiem w procesie orientacji wysokorozdzielczych scen satelitarnych. Uwzględnienie jej w oryginalnych współczynnikach skutkuje krótszym czasem wykonania opracowania, a przede wszystkim mniejszym błędem orientacji scen (co również niejednokrotnie udowodnili w swych referatach C. S. Fraser, H. B. Hanley i J. Grodecki).

Istotą powyższych rozważań było ustalenie liczby fotopunktów optymalnej do orientacji zobrażeń pozyskanych z satelitów Ikonos-2 i GeoEye-1, a także zbadanie wpływu wartości odchyłeń standardowych składowych korekcji *bias* na wyniki orientacji. Po przeprowadzeniu badań stwierdzono, że do zorientowania obu stereopar odpowiednią liczbą fotopunktów jest 8, natomiast przedziały wartości odchyłeń standardowych składowych korekcji *bias*, które powodują wzrost błędów RMS na fotopunktach, są równe: 0-0,5 piksela dla Ikonos-2 oraz 0-1 piksela dla GeoEye-1.

Wygenerowane numeryczne modele terenu oraz ortoobrazy charakteryzują się wysoką dokładnością, dzięki czemu stanowią cenny materiał kartometryczny.

Artykuł wpłynął do redakcji 5.07.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w styczniu 2011 r.

## LITERATURA

- [1] J. BUTOWTT, R. KACZYŃSKI, *Fotogrametria*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2003, 228-230.
- [2] O. E. DIAL, J. GRODECKI, United States Patent, nr 6, 735, 348 B2, 2004.
- [3] C. S. FRASER, G. DIAL, J. GRODECKI, *Sensor Orientation via RPCs*, ISPRS Photogrammetry and Remote Sensing, 60, 2006, 182-194.
- [4] C. S. FRASER, H. B. HANLEY, *Bias-Compensated RPCs for Sensor Orientation of High-Resolution Satellite Imagery*, PERS, 71, 8, 2005, 909-915.
- [5] C. S. FRASER, H. B. HANLEY, T. YAMAKAWA, *Sensor Orientation for high-resolution satellite imagery*, ISPRS Photogrammetry and Remote Sensing, 2002.
- [6] J. KORONACKI, J. MIELNICZUK, *Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych*, WNT, Warszawa, 2006.
- [7] Z. KURCZYŃSKI, W. WOLNIEWICZ, *Korekcja geometryczna wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych*, Geodeta, 11, 90, 2002.

M. WILIŃSKA, M. KĘDZIERSKI, R. DĄBROWSKI

**The analysis of the effect of bias correction on the accuracy of photogrammetric products derived from high resolution satellite data**

**Abstract.** The major purpose of this paper is to analyse stereopair orientation and bias compensation in rational polynomial coefficients. Moreover, the accuracy of digital terrain models and orthoimages generated from high-resolution satellite images acquired by GeoEye-1 and Ikonos-2 was evaluated. Bias, so the correction caused by increasing the accuracy of the RPC (*Rational Polynomial Coefficient*) correction, had been mentioned in a number of English articles by C. S. Fraser and H. B. Hanley. They discuss the problem of orientation with regards to high resolution satellite imagery and the influence of bias on the results of this orientation. In Poland, there are not many publications concerning this topic, which is why our research team had decided to conduct the necessary research and analyses.

GeoEye-1, launched in September 2008, commenced full commercial operations in February, 2009. As one of the first satellites it develops panchromatic images in a half-meter resolution.

That is why the subject of this research are two panchromatic stereoscenes — one acquired by GeoEye-1, and second by Ikonos-2, launched in 1999. Both of them are representative satellites acquiring high-resolution image data. They have similar technique parameters, orbit characteristics, get images in panchromatic and multispectral modes and develop panchromatic scenes in less than 1-meter resolution.

Used stereoscenes show the city of Hobart (Australia) and its neighbourhood. This area has varied topography and includes the bay, strongly urban terrain and mountains covered with forest. The heights reach around from 0 to 1300 meters. This height variety can have significant impact on final photogrammetric products, what also was studied.

In the project we used the part of the test field measured in 2004 by GPS, consisting of 19 control points which were used for orientation. The issue of this paper will be comparison of orientation effects carried on the different number of control points without changes in check point configuration. Depending on the analysis, the accurate number of control points to orientation of each stereoscenes was chosen.

The next problem was bias compensation in RPC (*Rational Polynomial Coefficients*). An analysis of the relation had been conducted during scene orientation. Moreover, the correction equations of bias compensation before and after orientation depending on original RPC will be described. The important problem will be indication of relation between RMS error of orientation and standard deviation of line and sample in bias correction.

After indication of the number of control points accurate to orientation and the most profitable parameters of line and sample, we generated digital terrain models. We used ABM correlation method. Output cell size for both of stereopairs was equal to 10 meters. Generated digital terrain models were studied in the aspect of point height accuracy by the comparison of heights measured by GPS with elevations measured on explored terrain models.

The next stage was generation of orthoimages from single scenes of stereopairs and analysis of their accuracy. The output cell size of generated photogrammetric products was equal to 0.5 and 1 meter for GeoEye-1 and Ikonos-2. Analysis of accuracy was provided in dependence on comparison of distances between check points not used in bundle adjustment and measured on generated orthoimages and distances computed from coordinates measured by GPS.

The paper concerns the above problems and it is ended by summary and proposals coming from the research.

**Keywords:** photogrammetry, GeoEye-1, Ikonos-2, bias compensation, sensor orientation, DTM, orthoimage