

Natalia Borowiec*

KOREKCJA GEOMETRYCZNA WYSOKOROZDZIELCZYCH OBRAZÓW SATELITARNYCH

1. Geometria wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych

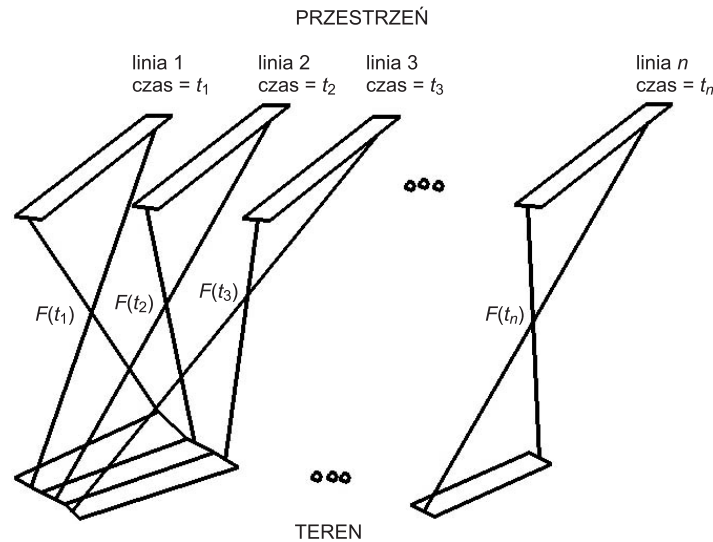
Od pojawienia się wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych wiele publikacji poświęconych jest ich korekcji geometrycznej. Istnieje duża dysproporcja między wysoką rozdzielczością a niską dokładnością pomiarową tych obrazów. Aby zlikwidować tę dysproporcję, obrazy trzeba poddać korekcji geometrycznej. Operatorzy systemów satelitarnych oferują nieprzetworzone obrazy oraz gotowe produkty o różnym stopniu korekcji, co znacząco wpływa na finalną cenę produktu. Dlatego można zadać pytanie, czy zwykły użytkownik jest w stanie dokonać samodzielnie korekcji obrazu tak, żeby uzyskać zadowalającą dokładność?

Zdecydowana większość systemów obrazowania satelitarnego opiera się na koncepcji skanera elektrooptycznego. W płaszczyźnie ogniskowej układu optycznego znajduje się linijka czujników CCD zorientowana w poprzek kierunku lotu, która dostarcza jedną linię obrazu (rys. 1). Obraz powstaje zgodnie z kierunkiem ruchu satelity i kolejne rejestracje sygnałów z linijki CCD. Tak powstały obraz zależy od czasu, dlatego często nazywany jest obrazem dynamicznym. Każda zeskanowana linia ma inne elementy orientacji zewnętrznej, tj. kąty θ , ϕ , κ oraz współrzędne środka rzutu. Elementy orientacji wewnętrznej (punkt główny, stała kamery, dystorsje) są takie same dla całego obrazu złożonego z poszczególnych linijek.

Obraz, który generowany jest w sposób ciągły, dodatkowo jest zniekształcony niestabilnym lotem (zmiany kątów nachylenia). Oznacza to w efekcie znaczne zniekształcenia obrazu, których wielkość wielokrotnie przewyższa rozmiary piksela.

Dotychczas wykształciły się dwa podejścia do opracowania zdjęć lotniczych i obrazów satelitarnych. Pierwszy jest to nurt „pomiarowy”, reprezentowany przez fotogrametrów, którzy skupiają uwagę na uzyskaniu ze zdjęć i obrazów informacji ilościowych w celu tworzenia precyzyjnych (w sensie geometrycznym) opracowań, tj. mapy, ortofotomapy czy numerycznej mapy terenu (NMT).

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej



Rys. 1. Sposób działania sensora skanującego. Poszczególne linijki detektorów rejestrują odpowiadające im pasy pokrycia terenu

Źródło: [8]

Natomiast drugim nurtem jest nurt „interpretacyjny”, reprezentowany przez specjalistów licznych branż, którzy chcą uzyskać informacje jakościowe dotyczące wykrywania i interpretacji obiektów i zjawisk na powierzchni Ziemi, przedstawianych w formie map tematycznych.

Różnice obu nurtów widać wyraźnie w podejściu do zdjęć i obrazów satelitarnych. W dotychczasowej praktyce, przy opracowaniu tematycznym bazującym na obrazach satelitarnych, nie była konieczna nadmierna troska o korekcję geometryczną tych obrazów. Wystarczało płaskie przetworzenie (np. obrazów Landsat czy SPOT), często na punkty wzięte z mapy topograficznej. Rozwiązanie takie było wystarczające, ponieważ korzystano zwykle z obrazów „nadirowych”, a więc o relatywnie małych zniekształceniach (w porównaniu z rozmiarami piksela). Wraz ze wzrostem zdolności rozdzielczej obrazów satelitarnych i dodatkowo możliwości stereoskopii, fotogrametry zaczęli spoglądać na obrazy tak jak na pomiarowe zdjęcia lotnicze, przydatne np. podczas tworzenia czy aktualizacji mapy topograficznej.

Można więc powiedzieć, że dzięki wysokiej zdolności rozdzielczej obraz charakteryzuje się dużymi walorami interpretacyjnymi, ale stosunkowo niskimi walorami georeferencyjności. Korekcja geometryczna ma na celu zlikwidowanie tej dysproporcji.

2. Korekcje geometryczne: wielomiany i ilorazy wielomianów

Podstawą korekcji geometrycznej jest określenie matematycznego związku między współrzędnymi terenowymi punktów (X, Y, Z) a współrzędnymi łłowymi obrazu (l, s).

Istnieje kilka modeli geometrycznych pozwalających na określenie relacji teren – obraz. Do prostych należy zwykły model wielomianowy typu 2D:

$$\begin{aligned}x &= a_0 + a_1X + a_2Y + a_3XY + a_4X^2 + a_5Y^2 + \dots \\y &= b_0 + b_1X + b_2Y + b_3XY + b_4X^2 + b_5Y^2 + \dots\end{aligned}\quad (1)$$

oraz 3D:

$$\begin{aligned}x &= a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4XY + a_5XZ + a_6YZ + a_7X^2 + a_8Y^2 + a_9Z^2 + \dots \\y &= b_0 + b_1X + b_2Y + b_3Z + b_4XY + b_5XZ + b_6YZ + b_7X^2 + b_8Y^2 + b_9Z^2 + \dots\end{aligned}\quad (2)$$

Jednak takie opisy wielomianowe mają szereg wad: wymagają znacznej liczby punktów dostosowania, są czułe na nierównomierny rozkład tych punktów na obszarze oraz są niestabilne numerycznie [20]. Stosując zwykłe modele wielomianów, można dobrze wpasować obraz na punkty dostosowania, ale wówczas uzyskamy znaczne rozbieżności między tymi punktami. Z tych powodów opisy wielomianowe można zastosować tylko na niewielkim obszarze do korekcji obrazów o mniejszej rozdzielczości. Zauważono natomiast, że zastosowanie ilorazów tych wielomianów, które opisane zostaną dalej, znacznie podnosi dokładność.

Potwierdzeniem powyższych wniosków jest przeprowadzone badanie na obrazach Ikonos [21]. Do eksperymentu oprócz pozyskanych obrazów Ikonos pozyskano również 30 punktów kontrolnych równomiernie rozmieszczonych na obrazie, dla których współrzędne XY zostały zdjęte z cyfrowej ortofotomapy o wymiarach piksela 20×20 cm, a współrzędna Z – z NMT o wymiarach regularnej siatki 2×2 m. W tabeli 1 zamieszczono błędy średnie kwadratowe (RMS) i maksymalne odchyłki wpasowania na punkty dostosowania obliczone dwoma metodami: zwykłą (2D) i ilorazową metodą wielomianową, gdzie zastosowano wielomian II stopnia.

Tabela 1. Błędy RMS i odchyłki na punkt dostosowania

Metoda korekcji	RMS [m]		Odchyłki maksymalne [m]	
	X	Y	X	Y
Wielomianowa zwykła 2D	1,0	3,2	2,4	6,2
Wielomianowa ilorazowa	0,5	0,7	1,1	1,4

Jak widać w tabeli 1, metodą wielomianową ilorazową uzyskano mniejsze odchyłki. Dlatego dla wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych zaczęto stosować model typu 3D opisujący relacje teren – obraz w formie ilorazu wielomianów (ang. *Rational Function Model* – *RFM* lub *Rational Polynomial Coefficients* – *RPC*).

3. Ilorazowy model wielomianowy

RFM określa matematyczny związek pomiędzy terenem a obrazem. Jest to model typu 3D. Poszczególnym wyrazom wielomianu nie przypisuje się prostej interpretacji fizycznej

czy geometrycznej związanej z parametrami czy czynnikami zniekształcającymi obraz, stąd mówi się, że jest to model „nieparametryczny”. RFM jest to rodzaj równań należących do rodziny równań kolinearności oraz DLT (ang. *Direct Linear Transformation*).

Równania RFM mają następującą postać:

$$\begin{aligned} r &= \frac{p_1(X, Y, Z)}{p_3(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^j a_m X^{i-j} Y^{j-k} Z^k}{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^j c_m X^{i-j} Y^{j-k} Z^k} \\ c &= \frac{p_2(X, Y, Z)}{p_3(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^j b_m X^{i-j} Y^{j-k} Z^k}{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^j c_m X^{i-j} Y^{j-k} Z^k} \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} a_m, b_m, c_m &- \text{współczynniki wielomianu,} \\ c_0 &= 1, \\ m &= \frac{i(i+1)(i+2)}{6} + \frac{j(i+1)}{2} + k. \end{aligned}$$

Dla obrazów satelitarnych stosuje się zwykle stopień wielomianu niższy od III (dalsze zwiększanie stopnia wprowadza do rozwiązania zbyt wiele stopni swobody i nie poprawia wyników). Poniżej rozpisano wielomian III stopnia dla licznika; w przypadku mianownika postać wielomianu jest taka sama, przy czym współczynnik c_0 równy jest 1 z założenia

$$\begin{aligned} p_1 &= a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4XY + a_5XZ + a_6YZ + a_7X^2 + a_8Y^2 + a_9Z^2 + a_{10}XYZ + \\ &+ a_{11}X^2Y + a_{12}X^2Z + a_{13}Y^2X + a_{14}Y^2Z + a_{15}Z^2X + a_{16}Z^2Y + a_{17}X^3 + a_{18}Y^3 + a_{19}Z^3 \end{aligned} \quad (4)$$

Równanie wielomianu ilorazowego III stopnia zawiera 39 zmiennych współczynników: 20 w liczniku i 19 w mianowniku. Odpowiednio wielomian ilorazowy I stopnia zawiera 7 współczynników, a wielomian II stopnia 19.

Wartość współczynników określa się w procesie wyrównawczym na podstawie fotopunktów. Każdy fotopunkt pozwala ułożyć jedną parę związków typu (3). Tak więc do wyznaczenia współczynników wielomianu ilorazowego III stopnia (zawierającego 59 współczynników) konieczne będzie minimum 30 fotopunktów. W praktyce, dla wiarygodnego i dokładniejszego rozwiązania, stosuje się większą liczbę fotopunktów.

4. Metody określania współczynników RFM

Istnieją dwa podejścia pozwalające na uzyskanie współczynników wielomianów:

- 1) Podejście niezależne od terenu (ang. *terrain-independent approach*)

Współczynniki wielomianu oblicza się niezależnie od terenu, ale wymagana jest znajomość położenia satelity na orbicie oraz orientacja sensorów (skanera) w prze-

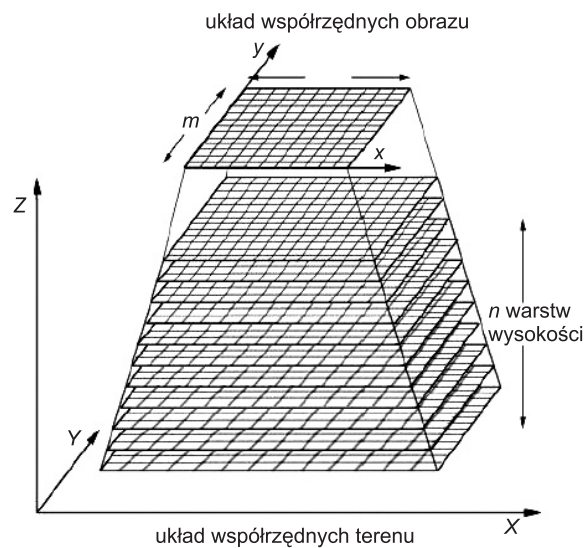
strzeni. Mowa tutaj o rozwiązaniu ścisłym. Rozwiązane ściśle prezentowane jest jako model matematyczny, który wiernie odzwierciedla charakter złożonej geometrii obrazowania oraz deformacji obrazu spowodowanych nieregularnością zmian orientacji i pozycji skanera, oraz ruchem Ziemi. Model taki uwzględnia informacje o położeniu satelity i sensorów w przestrzeni.

2) Podejście związane z terenem (ang. *terrain-dependent approach*)

Metoda ta nie należy do rozwiązań ścisłych, ponieważ nie jest matematycznym modelem opisującym precyzyjnie proces fizycznej rejestracji obrazu przy przemieszczaniu się urządzenia rejestrującego. Natomiast jest podobna do zwykłej metody wielomianowej, z tą różnicą, że jej formuła zawiera iloraz przekształceń wielomianowych, co pozwala uwzględnić w obliczeniach współrzędną Z (wysokość) punktów terenowych. Dlatego do rozwiązania wymagane są punkty kontrolne.

4.1. Metoda niezależna od terenu

W przypadku metody niezależnej od terenu RFM przedstawia się jako funkcję wpasowującą siatkę obrazu do odpowiadającej jej siatki przestrzennej [17]. Siatka 3D składa się z kilku warstw „tnących”, leżących w płaszczyźnie poziomej, na całej wysokości powierzchni (rys. 2). Współrzędne płaskie (X, Y) punktu siatki w przestrzeni obiektu wylicza się ze współrzędnych obrazowych (l, s) przy użyciu równania kolinearności dla określonej wysokości Z .



Rys. 2. Wpasowanie siatki obrazu do siatki przestrzennej, w celu znalezienia relacji pomiędzy obrazem a terenem. Siatka 3D przedstawiona jest jako szereg warstw oddalonych od siebie o stałą wielkość, na całej wysokości powierzchni

Źródło: [13]

Warunek kolinearności, tak samo jak w przypadku klasycznego zdjęcia fotogrametrycznego, stanowi podstawę zbudowania ścisłego modelu obrazów satelitarnych. W tym jednak przypadku można odnieść go nie do całego obrazu, a tylko do pojedynczej linii. Nie można mówić o elementach orientacji obrazów satelitarnych w takim sensie jak dla zdjęcia lotniczego. Wartość elementów orientacji zmienia się w sposób ciągły, należy więc mówić raczej o funkcji tych elementów zależnej od czasu.

4.2. Metoda zależna od terenu

Jeżeli nie posiadamy żadnych informacji dotyczących elementów orientacji skanera, wówczas nie możemy zastosować równania kolinearności do rozwiązania modelu. W takim przypadku, współczynniki wielomianów RFM określa się w ramach modelu nieparametrycznego. W modelu nieparametrycznym poszczególne wyrazy wielomianu nie mają prostej interpretacji fizycznej czy geometrycznej związanej z parametrami kamery i czynnikami zniekształcającymi obraz. Dlatego do obliczenia parametrów wielomianów potrzebna jest znaczna liczba fotopunktów. Część punktów pełni funkcje punktów dostosowania, które wykorzystywane są w procesie wyrównania, wyznaczając wartości niewiadomych. Podobnie jak w innych metodach, pozostałe punkty traktowane są jako punkty kontrolne, nie biorące udziału w procesie wyrównawczym. Ich położenie obliczane jest po wyrównaniu. Porównanie ze współrzędnymi wyznaczonymi wcześniej inną metodą daje wiarygodną ocenę dokładności korekcji. Ważne jest, aby takie punkty kontrolne występowały w procesie korekcji i aby na nich dokonywać oceny jakości korekcji, a nie na podstawie rozbieżności na fotopunktach otrzymanych w procesie wyrównawczym.

W tym przypadku rozwiązanie zależy od formy terenu, liczby punktów kontrolnych oraz ich rozmieszczenia, dlatego metoda nieparametryczna może być stosowana tylko dla obszarów charakteryzujących się umiarkowanym zróżnicowaniem rzeźby terenu i łagodnością form terenowych. Stosując tę metodę, możemy otrzymać niezadowalające wyniki, jeżeli powyższe wymagania nie zostaną spełnione.

5. Korygowanie obrazów satelitarnych

Przy znajomości elementów orientacji wewnętrznej oraz sześciu elementów orientacji zewnętrznej linijki sensorów (tj. położenie w przestrzeni i trzy kąty nachylenia) można uzyskać wysoką dokładność geometryczną obrazów satelitarnych. Tymczasem dystrybutorzy nie chcą udostępniać powyższych parametrów w jawnej postaci, tylko obliczają – dla danej sceny obrazowej – odpowiadające im wartości współczynników wielomianu w modelu ilorazowym i te załączają do obrazów udostępnianych użytkownikom. Jednak wyznaczone przez producentów współczynniki charakteryzują się niską dokładnością, ponieważ nie są skorygowane ze względu na deniwelacje terenu, w przypadku modelu ścisłego, albo wykorzystane zostały fotopunkty o niskiej dokładności. Wprawdzie można nabyć obrazy już przetworzone (ortorektyfikowane), jednak cena takich produktów jest wysoka. Nie tylko cena stanowi problem, ale też fakt, że producenci wymagają od użytkownika fotopunktów

albo NMT danego terenu, w celu ortorektyfikacji obrazu. Dlatego zaczęto zastanawiać się, czy użytkownik ma możliwość ortorektyfikacji lub generowania NMT z obrazów stereoskopowych we własnym zakresie.

Okazało się, że istnieje możliwość korekcji jakości obrazu dwoma sposobami:

- 1) bezpośrednio,
- 2) pośrednio.

W metodzie bezpośredniej otrzymane współczynniki wielomianu są nadpisywane nowo wyznaczonymi współczynnikami, które obliczono na podstawie punktów kontrolnych o wyższej dokładności. Natomiast w metodzie pośredniej nie są zmieniane współczynniki RPC, ale wykonywana jest dodatkowa transformacja w układzie obrazu [22].

Do obrazów Ikonosa dostarczane są dane korekcyjne w formie ilorazowego modelu wielomianowego. Natomiast dla obrazów QuickBirda dostępny jest model zarówno w formie modelu ścisłego, jak i współczynników modelu ilorazowego.

5.1. Korekcja obrazów satelitarnych metodą bezpośrednią

Stosując metodę bezpośrednią, nadpisujemy współczynniki RPC. Nowe współczynniki zostają określone w procesie wyrównawczym na podstawie grupy fotopunktów, których współrzędne przestrzenne określono z większą dokładnością, np. stosując do pomiaru technikę GPS.

W wymienionych pracach zawarto przegląd wyników korekcji metodą bezpośrednią obrazów: Ikonosa [3, 19] i QuickBirda [18, 20].

Tabela 2. Wyniki korekcji obrazów metodą bezpośrednią

Pozycja literatury	Metoda korekcji	Ocena dokładności na pkt. kontrolnych				Uwagi
		błąd średni [m]		błąd maksymalny [m]		
		m_x	m_y	m_x	m_y	
[20]	RFM I stopnia	2,2	5,2	5,1	10,4	7 fotopkt. 23 pkt. kontrolnych
	model ścisły	1,3	1,3	3,0	3,0	
[2]	RFM I stopnia	1,6÷2,1				NMT
	model ścisły	2,2÷2,9				
[19]	RFM I stopnia	4,0	2,1	9,5	4,3	10 fotopkt. 12 pkt. kontrolnych
	model ścisły	1,4	1,3	2,5	2,8	
[21]	model ścisły	1,1	1,0	2,0	2,0	teren płaski
	model ścisły	5,1	6,0	12,0	16,0	teren górzysty

Tabela 2 przedstawia przegląd wyników korekcji obrazów satelitarnych realizowanej w ostatnich latach przez różnych autorów. Korygowane są nieprzetworzone obrazy, tj. produkty Ikonos Geo i Basic Imagery (QuickBird). Podane są stosowane metody korekcji,

średnie i maksymalne błędy po korekcji, oceniane na podstawie punktów kontrolnych oraz liczby użytych fotopunktów i punktów kontrolnych.

Na podstawie analizy wyników i opracowań dotyczących korekcji geometrycznej wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych metodą bezpośrednią można sformułować następujące wnioski:

- Jeżeli wykorzystamy do ortorektyfikacji NMT o małym oczku siatki (3 m), powstają zniekształcenia na elementach linowych. Te zniekształcenia znikają przy zastosowaniu NMT o większym rozmiarze oczka od 10 m do 30 m [2].
- Stosowanie ścisłych modeli fotopunktów o wysokiej dokładności (błąd położenia ok. 0,5 m) oraz odpowiednio dokładnego NMT pozwala uzyskać dokładność korekcji obrazów Ikonosa na poziomie 1÷2 m i QuickBirda około 1 m [19, 20].

5.2. Korekcja obrazów satelitarnych metodą pośrednią

Drugą metodą korygującą jest metoda pośrednia. W metodzie tej konieczne jest zastosowanie tzw. transformacji dopełniającej na obrazie. Metodę pośrednią stosuje się najczęściej w celu wyrównania bloku obrazów. Stosując metodę korygującą, opieramy się na współczynnikach RPC określonych na podstawie modelu ścisłego bez wykorzystania jakichkolwiek punktów dostosowania. Dlatego głównie występują błędy liniowe w postaci przesunięcia wierszy i kolumn w płaszczyźnie obrazu.

Wykonywana transformacja na obrazie oparta jest na dwóch uzupełniających się wielomianach pierwszego stopnia, czyli transformacja afiniczna:

$$\begin{aligned}\Delta l &= a_0 + a_l l + a_s s \\ \Delta s &= b_0 + b_l l + b_s s\end{aligned}\tag{5}$$

gdzie:

- $\Delta l, \Delta s$ — parametry wyrażające rozbieżność współrzędnych fotopunktów lub punktów wiążących pomiędzy pomierzonymi współrzędnymi w układzie pikselowym na zdjęciu (l, s) a współrzędnymi (l', s') wyznaczonymi przez RFM,
- $a_0, a_l, a_s, b_0, b_l, b_s$ — parametry wyrównujące, inne dla każdego obrazu.

Współczynnik a_0 określa błędy powstające podczas skanowania powodujące przesunięcia kolumn i wierszy, błędy orientacji zewnętrznej oraz błąd położenia detektora. Podobnie działa parametr b_0 , z tym że określa błędy występujące w poprzek lotu. Parametry a_l, b_l określają błędy dryfu żyroskopu występujące podczas skaningu obrazu. Natomiast a_s, b_s określają radialne błędy oraz błędy elementów orientacji wewnętrznej [3].

Korekcję metodą pośrednią przeprowadzono na obrazach satelitarnych, złożonych z pasów o różnej długości. Do obrazów tych dołączono wartości współczynników wielomianu w modelu ilorazowym. Współczynniki zostały obliczone na podstawie elementów orientacji detektora, bez wykorzystania punktów dostosowania. Aby dokonać korekcji obrazów, zastosowano matematyczny model wyrównujący blok, oparty na transformacji

dopełniającej na obrazie. Dla każdego bloku obliczono wszystkie parametry transformacji dopełniającej (a_0 , a_l , a_s , b_0 , b_l , b_s) metodą najmniejszych kwadratów. Na potrzeby przeprowadzenia eksperymentu wyprodukowano obrazy przyjmując konkretne wartości azymutu (0° , 45° , 90° , 135° , ..., 315°), kątów wychylenia i nachylenia sensora (0° , 10° , 20° , 30°) oraz lokalizację geograficzną (0° , 30° , 60°). Pasy poszczególnych bloków wynosiły od 10 km do 100 km (tab. 3).

Tabela 3. Wyniki korekcji obrazów metodą pośrednią

Pozycja literatury	Model wyrównujący	Błąd średni [piksel]		Błąd maksymalny [piksel]		Uwagi: długości pasa zdjęć
		m_l	m_s	m_l	m_s	
[3]	$\Delta l = a_0$ $\Delta s = b_0$	0,09	0,10	0,21		20 km
	$\Delta l = a_0 + a_1 l$ $\Delta s = b_0 + b_1 l$	0,08	0,10	0,12	0,15	
	$\Delta l = a_0 + a_s s$ $\Delta s = b_0 + b_s s$	0,07	0,06	0,10	0,09	
	$\Delta l = a_0 + a_1 l + a_s s$ $\Delta s = b_0 + b_1 l + b_s s$	0,001	0,001	0,001	0,004	
[3]	$\Delta l = a_0$ $\Delta s = b_0$	0,34	0,29	0,66	0,57	50 km
	$\Delta l = a_0 + a_1 l$ $\Delta s = b_0 + b_1 l$	0,08	0,10	0,13	0,16	
	$\Delta l = a_0 + a_s s$ $\Delta s = b_0 + b_s s$	0,33	0,28	0,58	0,50	
	$\Delta l = a_0 + a_1 l + a_s s$ $\Delta s = b_0 + b_1 l + b_s s$	0,01		0,02		
[3]	$\Delta l = a_0$ $\Delta s = b_0$	0,66	0,51	1,25	1,00	100 km
	$\Delta l = a_0 + a_1 l$ $\Delta s = b_0 + b_1 l$	0,08	0,10	0,17		
	$\Delta l = a_0 + a_s s$ $\Delta s = b_0 + b_s s$	0,65	0,50	1,17	0,93	
	$\Delta l = a_0 + a_1 l + a_s s$ $\Delta s = b_0 + b_1 l + b_s s$	0,03		0,06	0,07	
[10]	$\Delta l = a_0 + a_s s$ $\Delta s = b_0 + b_s s$	0,12	0,15	0,08	0,09	10 km
	$\Delta l = a_0 + a_1 l$ $\Delta s = b_0 + b_1 l$	0,16	0,09	0,07	0,06	
	$\Delta l = a_0 + a_1 l + a_s s$ $\Delta s = b_0 + b_1 l + b_s s$	0,002		0,001		
[12]	$\Delta l = a_0 + a_s s$ $\Delta s = b_0 + b_s s$	0,63÷1,02		-		100 km
	$\Delta l = a_0 + a_1 l$ $\Delta s = b_0 + b_1 l$	0,83÷1,29		-		

Prezentowane w literaturze badania wykazały, że w zależności od długości pasa obrazów można niektóre współczynniki pominąć. Na przykład dryfy żyroskopu występujące podczas skanowania obrazu mogą być zaniedbane dla pasów krótszych od 50 km, podobnie jak parametry a_s , b_s odpowiadające za błędy elementów orientacji wewnętrznej. Dlatego transformacje dopełniająca dla tych pasów krótszych od 50 km można skrócić do następującej postaci:

$$\begin{aligned}\Delta l &= a_0 \\ \Delta s &= b_0\end{aligned}\tag{6}$$

6. Podsumowanie

Na podstawie analizy wyników prac eksperymentalnych prowadzonych w różnych ośrodkach widać, że modele RFM znalazły zastosowanie w przypadku wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych. Dotychczasowe badania wykazały, że nie jest konieczne stosowanie tak drogiego produktu, jak Ikonos czy QuickBird. Wystarczy, aby użytkownik dysponował dokładnymi danymi terenowymi, a wówczas może wytworzyć poprawny ortoobraz, stosując równania RFM.

Stosując do korekcji wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych ilorazowy model wielomianowy, można uzyskać wysoką dokładność. Najlepsze wyniki osiągane są, gdy korekcja obrazu odbywa się w oparciu o ściśle modele parametryczne. Modele takie łatwiej niż inne pozwalają wykryć błędy w danych, są mniej czułe na rozkład fotopunktów, a do korekcji wymagają relatywnie mało fotopunktów. Dokładność położenia punktów kontrolnych w metodzie ścisłej jest średnio o 2,5 m lepsza niż w przypadku modelu RFM I stopnia.

Przy znajomości elementów orientacji zewnętrznej i wewnętrznej użytkownik może zwiększyć dokładność obrazów przez wykonanie transformacji dopełniającej na obrazie lub wyrównać blok, uzyskując średni błąd wpasowania rzędu 0,1 piksela dla pasów obrazów o długości 20 km. Wartość błędu średniego zwiększa się do 0,8 piksela w przypadku pasów obrazów o długości 100 km.

Zastosowanie RFM jest ekonomiczną i szybką drogą do wygenerowania map o wysokiej dokładności, na podstawie wysokorozdzielczych obrazów.

Literatura

- [1] Ager T.P.: *Evaluation of the geometric accuracy of Ikonos imagery*. SPIE 2003 AeroSense Conference, Orlando
- [2] Davis C.H., Wang X.: *Planimetric accuracy of Ikonos 1-m panchromatic image products*. Proceedings of the 2001 ASPRS Annual Conference, St. Louis, MI, USA, April 2, 2001, 3-27

- [3] Dial G., Grodecki J.: *Block adjustment with rational polynomial camera models*. ACSM – ASPRS 2002 Annual Conference Proceedings
- [4] Dial G., Grodecki J.: *Satellite Image Block Adjustment Simulations*. Proceedings of ASPRS 2004 Conference, Denver, May 23–28, 2004
- [5] Fraser C.: *High-resolution satellite imagery: A review of metric aspects*. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII, part B7, Amsterdam 2000
- [6] Fraser C.S., Hanley H.B.: *Bias Compensation in Rational Functions for Ikonos Satellite Imagery*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 69(1), 2003, 53–57.
- [7] Fraser C.S., Hanley H.B.: *Bias Compensated RPCs for Sensor Orientation of High-Resolution Satellite Imagery*. Proceedings of ASPRS 2004 Conference, Denver, May 23–28, 2004
- [8] Grodecki J.: *IKONOS Stereo Feature Extraction – RPC Approach*. Proceedings of ASPRS 2001 Conference, St. Louis, April 23–27, 2001
- [9] Grodecki J., Dial G.: *IKONOS Geometric Accuracy*. Proceedings of Joint Workshop of ISPRS, High Resolution Mapping from Space 2001, Hannover, Germany, September 19–21, 2001
- [10] Grodecki J., Dial G.: *Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 69(1), 2003, 59–68
- [11] Grodecki J., Dial G., Lutes J.: *Error propagation in block adjustment of high-resolution satellite images*. Proceedings of ASPRS 2003 Conference, Anchorage, May 5–9, 2003
- [12] Hanley H.B., Yamakawa T., Fraser C.S.: *Sensor orientation for high – resolution satellite imagery*. Pecora IV/ISPRS Commission I 2002
- [13] Hye-jin Kim, Dae-sung Kim, Hyo-sung Lee, Young-il Kim: *A Study on the Generation of the Komsat-1 RPC Model*. ISPRS – Commission III Symposium, Graz, Austria September 9–13, 2002
- [14] Kurczyński Z., Wolniewicz W.: *Korekcja geometryczna wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych*. Geodeta, nr 11 (90), listopad 2002
- [15] Kurczyński Z., Wolniewicz W.: *Co oznacza piksel poniżej metra?* Geodeta, nr 8 (87), sierpień 2002
- [16] Lutes J.: *Accuracy Analysis of Rational Polynomial Coefficients for IKONOS Imagery*. Proceedings of ASPRS 2004 Conference, Denver, May 23–28, 2004
- [17] Tao C.V., Yong Hu: *A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 67(12), 1347–1357
- [18] Tao C.V., Yong Hu: *3D Reconstruction of the Rational Function Models for Photogrammetric Processing*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 68 (7), 2002, 705–714
- [19] Toutin T., Cheng P.: *QuickBird – A Milestone for High Resolution Mapping*. Earth Observation Magazine, vol. 11, No. 4, 2002, 14–18
- [20] Toutin T., Chenier R., Carbonneau Y.: *3D models for high resolution images: examples with QuickBird, Ikonos and Eros*. Int. Archives of ISPRS Symposium, Comm. IV, Ottawa, Ontario, Canada, July 8–12, 2002, vol. 43, part 4, 547–551

-
- [21] Toutin T., Cheng P.: *Demystification of Ikonos*. Earth Observation Magazine, vol. 9, No. 7, 17–21, July 2000 (tłumaczenie polskie: *Demistyfikacja IKONOSA*, Geodeta, nr 10, 2000)
 - [22] Yong Hu, Tao C.V., Croitoru A.: *Understanding the Rational Function Model: Methods and Applications*. ISPRS 2004 Conference, Instabul 2004