

PORÓWNANIE WYNIKÓW ORTOREKTYFIKACJI OBRAZÓW SATELITARNYCH O BARDZO DUŻEJ ROZDZIELCZOŚCI

Streszczenie. *Komercyjne zobrażenia satelitarne o bardzo dużej rozdzielczości (nazywane w literaturze angielskojęzycznej VHR -Very High Resolution) coraz powszechniej zastępują zdjęcia powierzchni Ziemi wykonywane tradycyjnymi metodami z pułapu lotniczego. O ile problematyka generowania ortofotomap ze zdjęć lotniczych jest powszechnie znana w środowisku fotogrametrycznym, to możliwości tworzenia tego produktu na bazie VHR wciąż są przedmiotem badań i czekają na odpowiedzi na liczne pytania. Jakie dokładności są możliwe do uzyskania przy tworzeniu ortofotomapy przy zastosowaniu różnorodnej metodyki korekcyjnej, jaki użyć typ oprogramowania, jaki jest wpływ liczby użytych fotopunktów do procesu rektyfikacji, jak jest wpływ samego DTM? Aby uzyskać odpowiedź na te pytania wykonano szereg testów. Do przeprowadzenia eksperymentu wybrano dwa pola testowe: obszar płaski odpowiadający terenowi zabudowanemu – Warszawa i podgórze – Nowy Targ. Zostały użyte obrazy z trzech platform: IKONOS, QuickBird i EROS. Przy pomocy techniki GPS zostały pomierzone współrzędne punktów terenowych, uprzednio wyznaczonych na zobrażeniach dla każdego pola testowego w liczbie 30-90 (GCP). Do generowania ortofotomap wykorzystywano powszechnie dostępny w kraju DTM (DTED Level 2) jak i przebadano wpływ dokładności DTM. Sam proces ortorektyfikacji był realizowany z pomocą powszechnie dostępnych oprogramowań komercyjnych: PCI Geomatica 9 i ERDAS, przy użyciu dwóch metod: nieparametrycznej RPC (iloraz wielomianowy) i ścisłej, bazującej na warunku kolinearności i znanym modelu kamery. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano ocenę dokładności generowania ortofotomap dla różnorodnych scenariuszy technologicznych. Otrzymane wyniki zaprezentowane w referacie pozwalają wybrać optymalne warunki tworzenia ortofotomap w zależności od potrzeb użytkownika i wymaganych aplikacji wykorzystujących VHR typu IKONOS, QuickBird i EROS.*

1. Wstęp

Ostatnie lata pozwalają zauważyć stale wzrastające w świecie zainteresowanie praktycznym zastosowaniem zobrażeń typu VHR. Powodem tego jest stale rosnące zapotrzebowanie na aktualną informację o powierzchni Ziemi oraz jej zapis w postaci cyfrowej w wielu zakresach widma. Jest to naturalny kierunek uzupełniający dotychczasowe techniki fotogrametryczne.

Polska jest doskonałym przykładem podejmowania wysiłków praktycznego wykorzystania zalet nowej technologii. Powszechnie wiadomo, iż w krótkim czasie powierzchnia całego kraju musi być pokryta ortofotomapą zarówno dla potrzeb LPIS jak i TBD. Właściwa koordynacja wzajemnie uzupełniającego się pokrywania obszarów zdjęciami lotniczymi jak i zobrażeniami VHR jest doskonałym przykładem trafnego wykorzystania nowych możliwości. To właśnie w Polsce zrealizowano największy w Europie projekt którego celem było wytworzenie ortofotomapy na bazie systemu IKONOS (dla powierzchni 50 000 tys km²) dla obszarów trudno dostępnych z punktu widzenia nalotów fotogrametrycznych. Należy

zaznaczyć, iż wspólnie pomiędzy Agencją Mienia Wojskowego i sektorem prywatnym ukończono prace powołujące jedno z najnowocześniejszych światowych Centrów Operacji Regionalnych (ROC) do bezpośredniego pozyskiwania obrazów VHR. Z drugiej strony administracja państwowa przewiduje praktyczne wykorzystanie obrazów typu QuickBird do tworzenia ortofotomapy na wybranych obszarach kraju.

W wyniku tak wyraźnych trendów coraz powszechniejszego wykorzystania tego typu obrazów, zostały podjęte badania mające na celu porównanie metod generowania ortofotomapy na bazie VHR z pomocą dostępnych narzędzi przy różnorodnych scenariuszach technologicznych dla wybranych obszarów testowych, pokrytych przez najbardziej powszechne zobrazowania VHR: IKONOS-2, QuickBird2, EROS-1A.

Celem badań było porównanie procedur i technik generowania ortofotomapy ze zobrazowań o bardzo dużej rozdzielczości dla wytypowanych pól testowych, jakim był obszar płaski - aglomeracja Warszawa, jak i o znacznych deniwelacjach terenowych - Nowy Targ. Jednym z zasadniczych zadań prowadzonych prac była ocena dokładności wytworzonych ortofotomapy przy różnorodnych metodach korekcji. W referacie opisana jest szczegółowa ocena planimetrycznej dokładności otrzymanych ortofotomapy, wygenerowanych z panchromatycznych obrazów satelitarnych VHR.

2. Prace wstępne

Wykorzystywane sceny do prowadzonych badań pochodziły z systemów IKONOS, QuickBird, EROS i charakteryzowały się różnymi datami pozyskania jak i różnym wychyleniem układu optycznego od linii pionu przy ich pozyskiwaniu. I tak, dla pola testowego charakteryzującego się małymi deniwelacjami (Warszawa) kąt wychylenia osi względem linii pionu wynosi 5 stopni dla obrazowania z systemu QuickBird a 6.5 stopnia dla obrazowania IKONOS. Dla obszaru o zwiększonych deniwelacjach (Nowy Targ) wychylenia wynosiły odpowiednio 9.5 stopnia dla obrazu z QuickBirda i 12 stopni dla IKONOS. Szczegółowa charakterystyka wykorzystywanych obrazów jest przedstawiona w tablicy nr 1. W celu wykonania ortorektyfikacji zostały starannie zaprojektowane fotopunkty na poszczególnych obrazowaniach, które pomierzono następnie w terenie przy pomocy techniki GPS. W celu bardzo dokładnego pomiaru tych punktów wykorzystywano dwuczęstotliwościowe odbiorniki TRIMBLE 4700 i metodę „fast-static”. Ocenia się dokładność planimetryczną fotopunktów na 0.1 m a wysokościową 0.2 m. W czasie pomiarów terenowych była robiona fotograficzna dokumentacja każdego mierzonego fotopunktu zaprojektowanego uprzednio na zdjęciu satelitarnym

Charakterystyki wykorzystywanych zobrażeń

Dane zobrażenia	Typ zobrażenia			
	QuickBird		Ikonos	
	Warszawa	Nowy Targ	Warszawa	Nowy Targ
Data pozyskania	04.05.2003	03.10.2003	29.04.2003	17.06.2003
Czas	9:35	9:22	10:01	10:03
Rodzaj formatu	Basic 1B		Geo Ortho Kit	
Kąt wychylenia	5	12	10	14
Rozdzielczość radiometryczna	11 bit		11bit	
Rozdzielczość terenowa [m]	0.61		1.0	
Wymiar sceny [km]	16x16	16x16	11x21	11x11

Należy szczególnie podkreślić znaczenie wstępnego planowania doboru typów i jakości fotopunktów na oryginalnym zdjęciu satelitarnym. Proces ten ma zasadnicze znaczenia dla jakości wynikowej ortofotomapy. W każdym przypadku podejmowano próbę identyfikacji GCP na zdjęciu z dokładnością poniżej jednego piksela a pomiar tym samym instrumentem gwarantował jednorodną dokładność całego procesu ortorektyfikacji. Do generowania ortofotomapy były wykorzystywane cztery typy DEM:

- a. DTED Level 0 - wygenerowany przez NIMA (National Imagery and Mapping Agency)
- b. DTED Level 1x - wygenerowany przez SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)
- c. DTED Level 2 - powstały w wyniku digitalizacji map 1: 50 000 (siatka 25 m)
- d. DTED Level 2A - powstały w wyniku digitalizacji map 1: 25 000 (siatka 10 m)

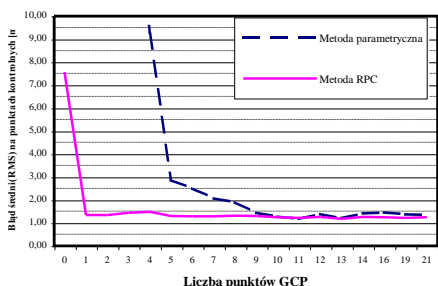
3. Stosowana metoda

Proces generowania ortofotomap był realizowany przy pomocy powszechnie dostępne komercyjnego oprogramowania: PCI Geomatica 9 z modułem OrthoEngin i ERDAS z modułem OrthoBase. Do samego procesu ortorektyfikacji zastosowano dwa podstawowe podejścia stosowane przy rektyfikacji zobrażeń VHR: tzw. metodę RPC i metodę parametryczną. Rational Polinomial Coeficient (RPC) jest metodą uwzględniającą modelowanie 3D opisujące matematyczne zależności pomiędzy terenem i zobrażeniem w postaci wielomianowej. Wartości współczynników wielomianów dostarczane są wraz z zamawianymi obrazami satelitarnymi. Same wartości współczynników nie mają fizycznej bądź geometrycznej

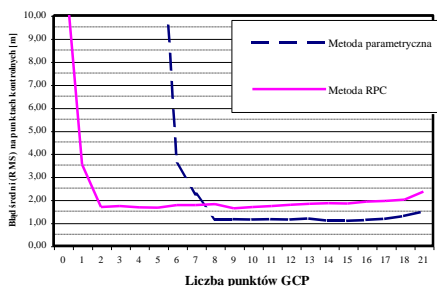
interpretacji związanej z parametrami optycznymi kamery i jej orientacją w przestrzeni, stąd metoda korekcji RPC jest często określana jako oparta na modelu 'nie-parametrycznym'. Model ten w procesie rektyfikacji wykorzystuje wartości przewyższeń terenowych odczytywanych bezpośrednio z DTM dla całej powierzchni obrazu.

Model parametryczny opisuje rzeczywiste relacje matematyczne pomiędzy terenem a obrazem, a jego parametry mają geometryczną interpretację. Podstawą ścisłego modelu matematycznego opisującego obraz satelitarny jest fotogrametryczny warunek kolinearności. Jednocześnie należy zaznaczyć, iż w przypadku obrazów satelitarnych związki matematyczne odnoszą się nie do całej powierzchni a jedynie do pojedynczej linii. Jest to wynik dynamicznego charakteru procesu obrazowania satelitarnego. Niedoskonałością tej metody jest konieczność stosowania względnie dużej liczby fotopunktów, oraz czułość metody na ich rozkład i błędy w danych. Do prowadzonych badań użyto oprogramowanie PCI, w którym model parametryczny jest opracowany przez dr T. Toutin'a z CCRS.

Generowanie produktów końcowych było realizowane w jednolitym układzie „PUWG1992” a co za tym idzie pomiary terenowe GCP jak i używane DTED zostały uprzednio przetransformowane do tego układu. Wszystkie prace dotyczące analiz dokładnościowych prowadzone były na obrazach zakresie panchromatycznym.



Rys. 1. Dokładność ortorektyfikacji obrazu IKONOS – obszar Warszawa (wartości „Z” z pomiaru GPS)



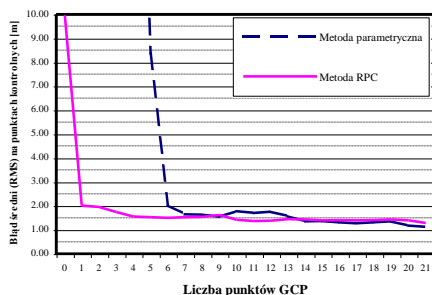
Rys. 2. Dokładność ortorektyfikacji obrazu QuickBird – obszar Warszawa (wartości „Z” z pomiaru GPS)

Tabela nr 2
Porównanie błędów średnich i błędów maksymalnych na 35 punktach kontrolnych, dla korekcji przy 10 punktach GCP

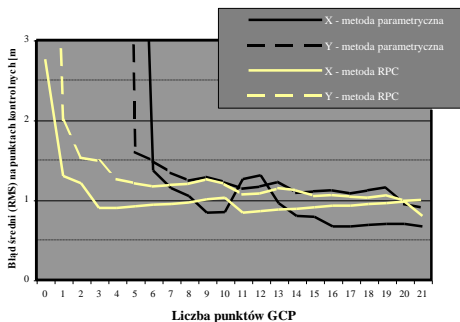
Metoda korekcji	RMS (m)		Błąd max. (m)	
	X	Y	X	Y
Parametr.	0,96	0,84	1,77	2,02
RPC	0,89	0,86	2,00	2,40

Tabela nr 3
Porównanie błędów średnich i błędów maksymalnych na 17 punktach kontrolnych, dla korekcji przy 10 punktach GCP

Metoda korekcji	RMS (m)		Błąd max. (m)	
	X	Y	X	Y
Parametr.	0,94	0,64	2,25	1,44
RPC	1,31	1,05	3,93	1,94



Rys. 3. Dokładność ortorektyfikacji obrazu IKONOS – obszar Nowy Targ (wartości „Z” z pomiaru GPS)



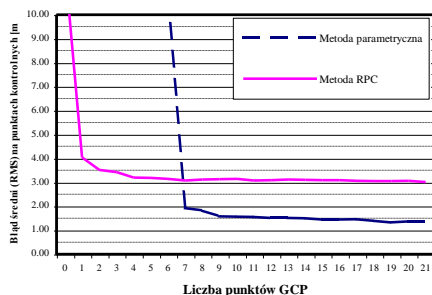
Rys. 4. Dokładność ortorektyfikacji obrazu IKONOS – obszar Nowy Targ (wartości „Z” z pomiaru GPS)

Wyniki ortorektyfikacji obrazu IKONOS przy zastosowaniu różnych modeli korekcyjnych dla obszaru Nowy Targ pokazano na Rys 3 i 4. Rys 4 pokazuje rozbite składowe X i Y otrzymanych dokładności przedstawionych na rys 3.

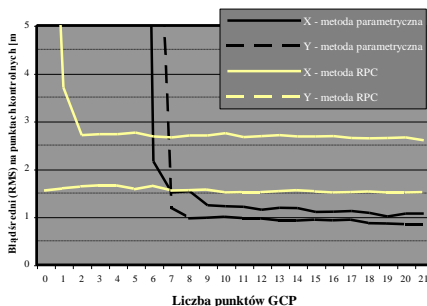
Tabela nr 4

Porównanie błędów średnich i błędów maksymalnych na 27 punktach kontrolnych, dla korekcji przy 10 punktach GCP

Metoda korekcji	RMSE (m)		Błąd max. (m)	
	X	Y	X	Y
Parametr.	0,85	1,22	1,62	3,23
RPC	1,03	1,20	2,92	2,05



Rys. 5. Dokładność ortorektyfikacji obrazu QuickBird – obszar Nowy Targ (wartości „Z” z pomiaru GPS)

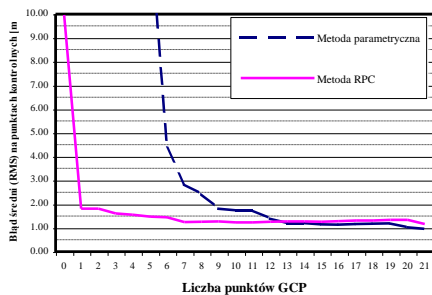


Rys. 6. Dokładność ortorektyfikacji obrazu QuickBird – obszar Nowy Targ (wartości „Z” z pomiaru GPS)

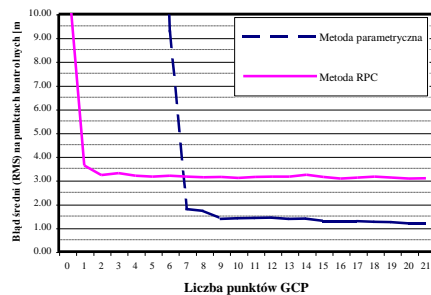
Tabela nr 5

Porównanie błędów średnich i błędów maksymalnych na 91 punktach kontrolnych, dla korekcji przy 10 punktach GCP

Metoda korekcji	RMS (m)		Błąd max. (m)	
	X	Y	X	Y
Parametr.	1,22	1,00	5,89	3,03
RPC	2,75	1,51	6,47	3,21



Rys. 7. Dokładność ortorektyfikacji obrazu IKONOS – obszar Nowy Targ (wartości „Z” z DTM)



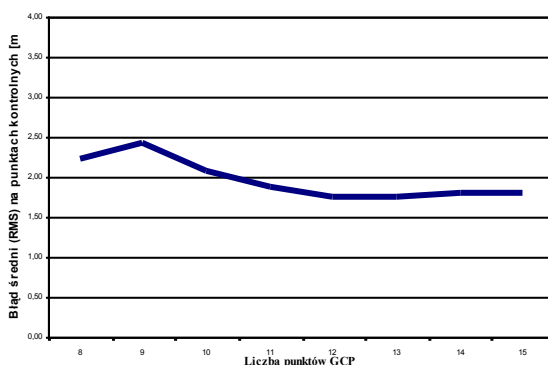
Rys. 8. Dokładność ortorektyfikacji obrazu QuickBird – obszar Nowy Targ (wartości „Z” z DTM)

Tabela nr 6
Porównanie błędów średnich i błędów maksymalnych na 27 punktach kontrolnych, dla korekcji przy 10 punktach GCP

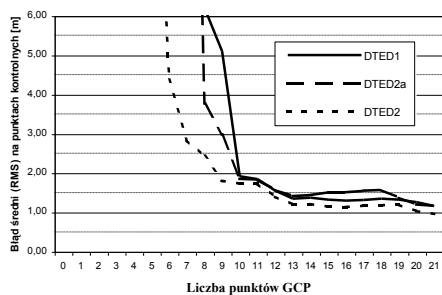
Metoda korekcji	RMS (m)		Błąd max. (m)	
	X	Y	X	Y
Parametr.	1,44	0,95	2,94	2,09
RPC	0,90	0,83	2,90	2,68

Tabela nr 7
Porównanie błędów średnich i błędów maksymalnych na 91 punktach kontrolnych, dla korekcji przy 10 punktach GCP

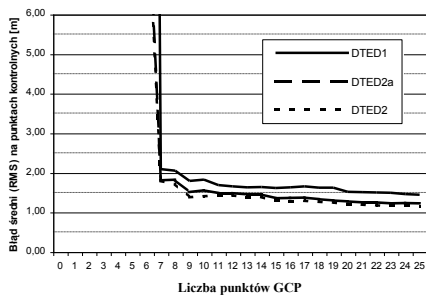
Metoda korekcji	RMS (m)		Błąd max. (m)	
	X	Y	X	Y
Parametr.	1,05	1,94	3,45	6,08
RPC	2,70	1,52	5,84	3,14



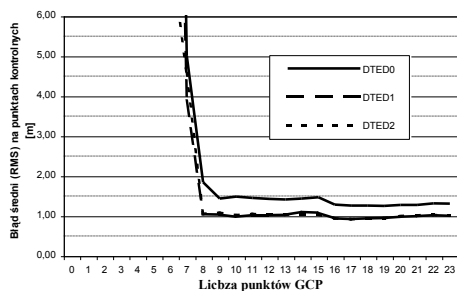
Rys. 9. Dokładność ortorektyfikacji metoda parametryczną obrazu EROS w zależności od liczby punktów GCP – obszar Nowy Targ



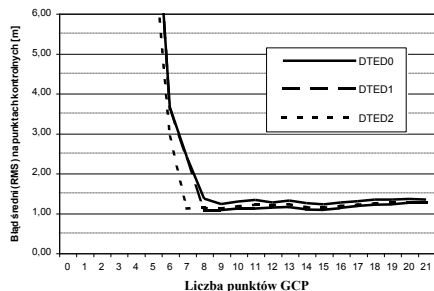
Rys. 10. Dokładność ortorektifikacji metodą parametryczną obrazu IKONOS – obszar Nowy Targ w zależności od liczby GCP i zastosowanego DTED



Rys. 11. Dokładność ortorektifikacji metodą parametryczną obrazu QuickBird – obszar Nowy Targ w zależności od liczby GCP i zastosowanego DTED



Rys. 12. Dokładność ortorektifikacji metodą parametryczną obrazu IKONOS – obszar Warszawa w zależności od liczby GCP i zastosowanego DTED



Rys. 13. Dokładność ortorektifikacji metodą parametryczną obrazu QuickBird – obszar Warszawa w zależności od liczby GCP i zastosowanego DTED

4. Analiza wyników

Proces generowania ortofotomap ze zdjęć IKONOS, QuickBird i EROS był realizowany metodą parametryczną z wykorzystaniem oprogramowania PCI a metodą RPC zarówno PCI jak i ERDAS. Liczba wykorzystywanych punktów (GCP) jak i otrzymywane dokładności samego procesu ortorektifikacji przedstawiono na rys 1-13. Każdy rysunek przedstawia otrzymane dla danego pola testowego i typu sensora dokładności generowanych ortofotomap przy różnej zadanej liczbie GCP. Prezentowana ocena dokładności jest oparta na punktach kontrolnych (ICP), które to punkty nie brały udziału w procesie generowania ortofotomapy. W obrębie każdej ze scen były uprzednio pomierzone punkty w liczbie 20-30 które służyły do oceny dokładności realizowanego procesu. Punkty te nie biorące udziału w samym procesie ortorektifikacji mogły jednak służyć do wzmocnienia dokładnościowego numerycznego modelu terenu. Przedstawione rysunki 1-9 zawierają następujące scenariusze procesu ortorektifikacji:

- wykorzystanie wysokości Z fotopunktów użytych w procesie generowania wzięte z pomiaru GPS.

- Wykorzystanie wysokości Z fotopunktów użytych w procesie generowania ortofotomapy wyinterpolowane z DTM.
1. Dla płaskich obszarów (rys. 1) przy zastosowanym DTED 2 o dokładności wysokościowej 3-5 m i wykorzystywanych uzupełniających wysokościowych punktach z pomiaru GPS, metoda RPC pozwoliła uzyskać dokładność na punktach kontrolnych dla obrazu IKONOS około 1.5 m, prawie niezależnie od liczby użytych fotopunktów GCP. Nawet przy zastosowaniu jednego fotopunktu uzyskano względnie dobrą dokładność ortofotomapy. Metoda parametryczna dla uzyskania podobnego rezultatu wymaga użycia min 9 GCP.
 2. W przypadku obrazu QuickBird (rys. 2), dla tych samych uwarunkowań, metoda RPC dała dokładność około 2 m, lecz przy minimum dwóch fotopunktach. Stosując metodę ścisłą przy 8 fotopunktach osiągnięto dokładność zbliżoną do 1 m.
 3. Dla terenów o znacznych deniwelacjach (przekraczających 500m) dla obrazu IKONOS, metoda RPC dała błąd ok. 1.5 m, natomiast metoda ścisła, dała podobną dokładność przy 7 fotopunktach GCP.
 4. Dla obrazów QuickBird, stosując metodę typu RPC przy 2 fotopunktach GCP, uzyskano błąd średni ponad 3 m. Prawie dwukrotną poprawę dokładności uzyskano stosując metodę ścisłą przy 9 GCP.
 5. Stosując metodę parametryczną do korekcji obrazu typu EROS, uzyskano średni błąd w granicach jednego piksela przy 10 fotopunktach GCP (rys. nr 9).
 6. Przeprowadzone testy nad wpływem dostępnych DTED, na proces ortorektyfikacji VHR wykazały bardzo zbliżone dokładności przy stosowaniu zarówno DTED 2 jak i DTED SRTM (rys. nr 10-13).

5. Wnioski końcowe

Komercyjne oprogramowanie PCI pozwala dokonać ortorektyfikacji zobrażeń VHR zarówno metodami typu RPC jak i ścisłą, przy zastosowaniu różnej liczby fotopunktów GCP jak i dowolnie dostępnego DTM. Stosując proces ortorektyfikacji dla tego typu danych można uzyskać dokładność zbliżoną do 1 m (błąd średni). Uzyskanie takiego wyniku uwarunkowane jest spełnieniem szeregu wymogów:

- a. Fotopunkty GCP powinny być bardzo starannie zaplanowane, wybierane, mierzone i interpretowane w procesie ortorektyfikacji.
- b. Przeprowadzony eksperyment wykazał że dla zobrażeń QuickBird przy zastosowaniu metody ścisłej ortorektyfikacji, przy min. 8-10 GCP uzyskuje się stały błąd dokładności. Natomiast przy zastosowaniu metody RPC do procesu rektyfikacji uzyskano zdecydowanie gorszą dokładność. Wydaje się iż „stabilność” dostarczanych współczynników przez DigitalGlobe jest bardzo nie stabilna, co odzwierciedla się w uzyskiwanych wynikach przy zastosowaniu danej metody korekcji zobrażeń.
- c. Dla obrazów IKONOS metoda rektyfikacji typu RPC wykazuje lepszą stabilność i wymaga mniejszej liczby fotopunktów GCP.

- d. Różne źródło wykorzystywanych wysokości Z na fotopunktach użytych do procesu ortorektyfikacji, (DTM bądź pomiar terenowy GPS), daje bardzo podobne dokładności samego generowania ortofotomapy. Dla terenów o małej deniwelacji dla obrazów IKONOS zadawalające jest wykorzystanie DTM o średniej dokładności 3-5 m. Przy minimalnej ilości GCP możliwe jest uzyskanie dokładności ortofotomapy rzędu 1.5 m. Natomiast dla obrazów QuickBird, przy zastosowaniu metody parametrycznej, można uzyskać lepsze dokładności.
- e. Bardzo dobre wyniki ortorektyfikacji dla terenów płaskich uzyskano stosując DTED 0 (błąd ortorektyfikacji 1.5-2 m).
- f. Wydaje się w pełni dopuszczalne dla terenów górskich zastosowanie w procesie ortorektyfikacji NMT o jakości DTED 2 lub DTED pochodzącego z SRTM.
- g. Należy szczególnie podkreślić zasadnicze znaczenie doboru i jakości fotopunktów na jakość procesu ortorektyfikacji obrazów VHR.

Literatura

- Jacobson K., Passini R., 2003, Accuracy of Digital Orthophotos From High Resolution Space Imagery, ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space 2003, Hannover.
- Toutin Th., 2001, Geometric processing of IKONOS Geo images with DEM, ISPRS Joint Workshop "High Resolution Mapping from Space", Hannover, Germany, September 19-21, CD-ROM, pp. 264-271.
- Toutin Th., Chénier R., Carbonneau Y., 2001, 3D Geometric modelling of IKONOS Geo images, ISPRS Joint Workshop "High Resolution Mapping from Space", Hannover, Germany, September 19-21, CD-ROM, pp. 272-280.
- Toutin Th., Chénier R., Carbonneau Y., Alcañde N., 2002, 3D mapping with high-resolution images, 22nd EARSeL Symposium "Geoinformation for European wide integration", Prague, Czech Republic, June 4-6, CD-ROM.
- Toutin Th., Chénier R., Carbonneau Y., Alcañde N., 2002, 3D Models for High-resolution Images: Examples with EROS, IKONOS and QuickBird, Int. Archives of ISPRS Symposium, Comm. IV, Ottawa, Ontario, Canada, July 8-12, Vol. 34, Part 4, pp. 547-551.
- Toutin Th., 2002, Error tracking in IKONOS geometric processing using a 3D parametric modelling, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 68, 9p.
- Wolniewicz W., 2003, "Assessment of VHR Satellite Data - IKONOS, Quick Bird, EROS, SPOT 5" ISPRS Workshop, High Resolution mapping from Space, University of Hannover.
- Wolniewicz W., 2004, "Assessment of VHRS images" EuroImage Meeting, Invited Paper (presentation) Rzym.
- Wolniewicz W., 2004, "Assessment of Geometric Accuracy of VHR Satellite Images", 20 Congress ISPRS, Istanbuł. CD-ROM

Recenzował: prof. dr hab. Józef Jachimski