

## OCENA POTENCJAŁU GEOMETRYCZNEGO ZDJĘĆ IKONOS I QUICKBIRD<sup>1</sup>

### ASSESSMENT OF GEOMETRICAL CAPACITY OF IKONOS AND QUICKBIRD IMAGES

Wiesław Wolniewicz

Instytut Fotogrametrii i Kartografii Politechniki Warszawskiej

**Słowa kluczowe: fotogrametria satelitarna, zdjęcia typu VHRS, ortorektyfikacja**  
Keywords: satellite photogrammetry, VHRS images, orthorectification

## Wprowadzenie

Obrazy satelitarne o bardzo dużej rozdzielczości, popularnie nazywane VHRS coraz powszechniej są wykorzystywane jako alternatywa dla zdjęć lotniczych.

Do niedawna informacja dostarczana z pułapu satelitarnego była wprawdzie wykorzystywana dla potrzeb różnych branż (geologia, hydrologia, leśnictwo, rolnictwo, ochrona środowiska, itp.) jednak z powodu małej rozdzielczości (wielkość piksela terenowego rzędu 15–80 m), użytkowników w małym stopniu interesowały aspekty kartometryczne, a bardziej interpretacyjne.

Pojawienie się w 2000 roku zdjęć satelitarnych generacji VHRS spowodowało nowe spojrzenie na potencjał dostarczanych obrazów. Zaczęto łączyć bogatą treść obrazów VHRS z ich właściwościami kartometrycznymi. Podjęto próby identyfikacji informacji opisanej przez pojedynczy piksel z jego odniesieniem geometrycznym w zadanym układzie kartograficznym. Z pomocą przyszły metody fotogrametryczne, odpowiednio opisujące związki geometryczne, pozwalające nadać wartości kartometryczne na poziomie zbliżonym do wielkości pojedynczych pikseli.

Prace badawcze prowadzone przez Toutina czy Jakobsena (2004) zainicjowały nowy nurt fotogrametrii satelitarnej. Na XX Kongresie ISPRS (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) w Istambule przedstawiono szereg wyników prowadzonych przez czołowe ośrodki naukowe badań w zakresie zarówno zagadnień dotyczących geometrii obrazów VHRS, jak i ich praktycznego wykorzystania dla potrzeb kartografii topograficznej. Następnie Komisja I/W3 ISPRS zorganizowała w 2005 roku w Hanowerze konferencję *High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*.

Uważnie śledząc współczesne trendy, można wyraźnie dostrzec integrację dotychczasowych doświadczeń z zakresu teledetekcji i fotogrametrii, wykorzystywanych w opracowa-

---

<sup>1</sup> Praca pt. „Korekcja geometryczna wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych i ich wykorzystanie dla tworzenia baz danych topograficznych” zrealizowana w ramach projektu badawczego 5T12E 00724.

niu nowej jakości informacji o powierzchni Ziemi pozyskiwanej przez systemy satelitarne charakteryzujące się bardzo wysoką rozdzielczością.

## Specyficzne cechy systemów VHRS

Podstawowe dane techniczne wysokorozdzielczych systemów satelitarnych, mimo iż różnią się one w szczegółach, mają jednak wiele cech wspólnych o zasadniczym znaczeniu dla ich użyteczności i odróżniających je od rozwiązań znanych wcześniej.

1. Satelity są umieszczane na kołowych orbitach heliosynchronicznych, tj. nachylonych do płaszczyzny równika pod kątem około  $98^\circ$ . Taka okołobiegunowa orbita zapewnia stały kąt między płaszczyzną orbity a kierunkiem na Słońce. Oznacza to przejście satelity przez dany obszar zawsze w tym samym czasie lokalnym, a w konsekwencji – obrazowanie w porównywalnych warunkach oświetleniowych (przy tym samym azymucie Słońca).

2. Trajektoria satelity oraz elementy orientacji kamery rejestrowane są z dużą częstotliwością i dokładnością. Uzyskiwana precyzja pomiaru tych elementów pozwala, dla mniejszych skal opracowywać obrazy bez znajomości punktów osnowy geodezyjnej (tzw. fotopunktów).

3. System obrazowania działa na zasadzie skanera elektrooptycznego. W płaszczyźnie ogniskowej układu optycznego umieszczona jest linijka detektorów (CCD) dająca linię obrazu poprzeczną do kierunku orbity; obraz w kierunku orbity tworzy się w sposób ciągły, w wyniku ruchu satelity. O zdolności rozdzielczej decyduje wysokość orbity, ogniskowa układu optycznego i wymiary samych pikseli (w tzw. systemie metrowym terenowy wymiar piksela jest bliski 1 m).

4. W płaszczyźnie ogniskowej znajduje się zwykle linijka detektorów rejestrująca w zakresie widzialnym (tryb panchromatyczny) oraz linijki rejestrujące w wąskich podzakresach spektrum, zwykle niebieskim, zielonym, czerwonym i podczerwonym (tryb wielospektralny). Regułą jest, że rozdzielczość w trybie wielospektralnym jest gorsza – piksel jest zwykle 4 razy większy.

5. Systemy charakteryzują się dużą rozdzielczością radiometryczną, tj. zdolnością różnicowania wielkości odbicia obiektów naziemnych. Zdolność tę opisuje tzw. zakres dynamiczny, np. 11-bitowy oznacza możliwość rozróżnienia  $2^{11} = 2048$  poziomów szarości (dla porównania, tradycyjne zdjęcia fotograficzne mają zakres około 6 bitów, co odpowiada rozróżnieniu  $2^6 = 64$  poziomów szarości).

6. Układ optyczny może być wychylany w dużym przedziale kątowym w przód, wstecz oraz na boki. Oznacza to, że stosunkowo wąski pas obrazowania jest wybierany z szerokiego pasa terenu, nad którym przelatuje satelita. Ma to podstawowe znaczenie dla operatywności systemu, można bowiem zaprogramować seans obrazowania z danej orbity tak, aby wybrać tylko interesujące nas obszary, a spośród nich te, które w danym momencie nie są pokryte chmurami. Możliwość wychylenia układu optycznego na boki skraca okres rewizyty. Możliwość wychylenia układu w przód i wstecz umożliwia tzw. stereoskopię z jednej orbity. System obrazuje dany obszar dwa razy: wychylając układ do przodu i wstecz z opóźnieniem kilkudziesięciu sekund. W rezultacie otrzymuje się parę obrazów stereo o bardzo dobrych warunkach do pomiaru wysokości. Ten sposób ma zdecydowaną przewagę nad tzw. stereoskopią „z sąsiednich orbit” stosowaną w satelitach SPOT i IRS. W ich przypadku obrazy stereo otrzymuje się poprzez wychylenie układu w poprzek i obrazowanie z

sąsiednich orbit. Jednak przejście przez te orbity następuje w różnych terminach i w obu przypadkach muszą jednocześnie zaistnieć sprzyjające warunki pogodowe, co znacznie zmniejsza szanse na dobrą stereoskopię.

Alternatywą dla stereoskopii jest możliwość jednoczesnego obrazowania więcej niż jednego pasa terenu. Pozwala to istotnie zwiększyć szerokość obszaru obrazowanego podczas przejścia satelity.

7. Operatorzy komercyjni zakładają umieszczanie na orbitach kolejnych satelitów, co wydłuży żywotność tych systemów do wielu lat. Towarzyszy temu sprawna sieć dystrybucji obrazów radykalnie skracająca ich drogę do użytkownika. Bogata jest oferta przetwarzania obrazów na produkty kartograficzne o różnej skali i dokładności geometrycznej.

## Metody korekcji geometrycznych

W praktyce do korekcji zobrazowań satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości stosuje się dwa podstawowe podejścia (Ke, Wolniewicz, 2005).

Jedno jest oparte na metodzie wielomianowej, z wykorzystaniem współczynników dostarczanych wraz z obrazem, bądź wyznaczonych w procesie wyrównawczym. W pierwszym przypadku wartości współczynników są wtórnie wyznaczane na podstawie pomierzonych w locie elementów orientacji zewnętrznej obrazów. W drugim przypadku wartości te są wyznaczane w oparciu o grupę fotopunktów. Wyrazy wielomianu korekcyjnego nie mają bezpośredniej interpretacji geometrycznej.

Drugie podejście bazuje na fundamentalnym dla fotogrametrii warunku kolinearności wektora punktu terenowego i odpowiadającego mu wektora obrazowego – obrazu na linijce detektorów CCD. Relacje te są opisane jako funkcje parametrów kamery (elementów orientacji wewnętrznej) i – zmiennych w czasie – elementów orientacji zewnętrznej.

## Korekcja wysokorozdzielczych zobrazowań satelitarnych

Wytypowano dwa obiekty testowe, które są reprezentatywne pod względem pokrycia terenu i rzeźby dla większości obszarów Polski. Są to:

- Obiekt testowy „Warszawa” – teren płaski, bardzo silnie zurbanizowany.
- Obiekt testowy „Nowy Targ” – teren o bardzo dużych deniwelacjach (dochodzących do 600 m w obrębie pojedynczej sceny), bogatej rzeźbie i bogatej treści topograficznej.

Dla obszarów obiektów testowych zakupiono wysokorozdzielcze obrazy satelitarne ze wszystkich dostępnych systemów tzn: IKONOS (*Space Imaging*) i QuickBird (*Digital Globe*).

Z systemu IKONOS są to obrazy panchromatyczne z pikselem terenowym 1 m, a z systemu QuickBird obrazy panchromatyczne z pikselem terenowym 0,6 m oraz, dodatkowo dla obiektu „Warszawa” obraz wielospektralny z pikselem terenowym 2,4 m, pozyskany w zakresach: niebieskim, zielonym, czerwonym i podczerwonym.

**Tabela 1. Podstawowe parametry scen satelitarnych – obiekt testowy "Warszawa"**

Parametr	IKONOS-2	QuickBird-2
Numer sceny	20030429095543 10000011310489	1010010001 DE1101
Data pozyskania	29-04-2003	4-05-2003
Godzina pozyskania	9:55 GMT	9:35 GMT
Kąt wychylenia od nadiru [°]	10,5	5,1133
Typ danych	PAN/MSI	PAN
Produkt	Geo Ortho Kit	Basic Imagery 1B
Piksel terenowy [m]	1 m	0,61 m
Wielkość sceny [km]	11,5 x 21 km	16x16 km
Zachmurzenie	0%	2%

**Tabela 2. Podstawowe parametry scen satelitarnych – obiekt testowy "Nowy Targ"**

Parametr	IKONOS-2	QuickBird-2
Numer sceny	100317800000 111104058	1010001000 257FC01
Data pozyskania	17.06.2003	03.10.2003
Godzina pozyskania	10:03 GMT	9:22 GMT
Kąt wychylenia od nadiru [°]	14	12
Typ danych	PAN	PAN
Produkt	Geo Ortho Kit	Basic 1B
Piksel terenowy [m]	1.0	0.64
Wielkość sceny [km]	11,5 x 9	16 x 16
Zachmurzenie	0	0

## Ortorektyfikacja scen satelitarnych – metodyka i narzędzia

Ortorektyfikacja wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych wymaga stosowania odpowiednich danych początkowych i narzędzi. Danymi początkowymi są:

1. Źródłowy obraz satelitarny w formacie umożliwiającym jego dalsze opracowanie, uzupełniony zwykle o informacje o jego orientacji (w formie modelu parametrycznego lub współczynników RPC).

2. Numeryczny model terenu (NMT) o odpowiedniej dokładności.

3. Fotopunkty i fotopunkty kontrolne. Fotopunkty nazywane też punktami dostosowania (ang. *Ground Control Points* – GCP), tj. punkty o znanych współrzędnych terenowych, dające się jednoznacznie zidentyfikować i pomierzyć na obrazie, które biorą udział w procesie ortorektyfikacji. Dla kontroli procesu ortorektyfikacji i oceny jego dokładności stosowane są fotopunkty kontrolne (ang. *Independent Control Points* – ICP), tj. punkty o znanych współrzędnych terenowych, dające się jednoznacznie zidentyfikować i pomierzyć na obrazie, które nie biorą udziału w procesie ortorektyfikacji (nie są podstawą do obliczenia parametrów korekcji), a służą jedynie do oceny tego procesu.

Narzędziem jest oprogramowany algorytm, umożliwiający przeprowadzenie procesu pomiaru fotopunktów na obrazie, wyrównanie jedną z metod korekcji, ocenę dokładności procesu, a następnie przetransformowanie (przepróbkowanie) całego obrazu satelitarnego na ortoobraz. Ortorektyfikację przeprowadzono z zastosowaniem oprogramowania PCI Geomatica 9.0 wykorzystując dwie podstawowe metody:

- opartą na modelu parametrycznym,
- opartą na ilorazowym modelu wielomianowym (RPC).

### Terenowy pomiar współrzędnych fotopunktów

Podczas projektowania fotopunktów starano się wybierać takie szczegóły terenowe, które pozwolą na identyfikację ich na zdjęciu z dokładnością subpikselową. Oznaczało to pomiar w terenie metodą pozwalającą na uzyskanie ich współrzędnych z co najmniej równie dobrą dokładnością. Do tego celu wybrano metodę pomiaru techniką GPS FastStatic. Metoda ta umożliwiła na pozyskanie współrzędnych wszystkich fotopunktów z jednakową, wysoką dokładnością w stosunkowo krótkim czasie. Dodatkowym atutem tej metody jest stosunkowo mała pracochłonność konieczna do uzyskania danych z wymaganą precyzją.

Dodatkowo, aby zapewnić bezbłędną identyfikację mierzonych punktów na obrazie, ich wybór był potwierdzany na fotoszkicu oraz wykonywane były aparatem cyfrowym zdjęcia anteny na statywie i samego fotopunktu. Tak sporządzona dokumentacja gwarantowała jednoznaczność pomiaru w terenie i na obrazie.

### Numeryczne modele terenu wykorzystane do ortorektyfikacji

Ścisła ortorektyfikacja obrazów satelitarnych wymaga informacji o ukształtowaniu powierzchni terenu danego w formie NMT. Od jakości (dokładności wysokościowej) NMT zależy dokładność wygenerowanego ortoobrazu. Wymagania co do NMT zależą od wymaganej dokładności ortorektyfikacji oraz od kąta wychylenia układu optycznego kamery od linii pionu. Im większe wychylenie, tym większy wpływ błędów NMT na dokładność ortorektyfikacji, a tym samym większe wymagania co do dokładności NMT. Z tych powodów dla opracowań pomiarowych używa się obrazów pozyskanych przy wychyleniu kamery optycznej nieprzekraczającej 15°–20° od linii pionu.

Użyte do prac eksperymentalnych na obszarze obiektów testowych „Warszawa” i „Nowy Targ” NMT poddano ocenie dokładności, wykorzystując w tym celu fotopunkty pomierzone techniką GPS. Zbiorcze wyniki tej oceny ilustruje tabela 3.

Tabela 3. Parametry dokładnościowe użytych NMT

Standard NMT	Wielkość oczka NMT	Warszawa		Nowy Targ	
		liczba fotopunktów	błąd średni [m]	liczba fotopunktów	błąd średni [m]
DTED 0	30'' x 30'' (około 900 m x 900 m)	39	10,56	–	–
DTED 1X	3'' x 3'' (około 90 m x 90 m)	39	2,41	101	5,54
DTED 2	1'' x 1'' (około 30 m x 30 m)	39	0,66	101	3,87
DTED 2X	10 m x 10 m	–	–	101	4,21

## Badanie wpływu modeli korekcyjnych na dokładność ortorektyfikacji

Celem przeprowadzonego eksperymentu było ustalenie procedur i technologii generowania ortofotomap na wybranych polach testowych, uwzględniających wpływ poszczególnych modeli geometrycznych: wielomianowego i ścisłego, oferowanych w komercyjnych oprogramowaniach tj. PCI Geomatica. Analizy dokładności planimetrycznej wykonano na panchromatycznych obrazach IKONOS i QuickBird.

Po zaprojektowaniu i precyzyjnym zidentyfikowaniu tych samych fotopunktów na obrazach IKONOS i QuickBird dla danego obszaru testowego, pomierzono je techniką DGPS gwarantującą pomiar z dokładnością 20 cm. Następnie przetransformowano współrzędne i NMT do jednolitego układu współrzędnych.

W ramach tego eksperymentu sprawdzono wpływ rzędnych używanych do procesu ortorektyfikacji wyznaczanych z pomiaru GPS oraz określanych na podstawie NMT.

Na wykresach (rys. 1 i 2) przedstawiono wyniki korekcji obrazów IKONOS i QuickBird z pól testowych „Warszawa” i „Nowy Targ” uzyskane w środowisku PCI Geomatica. Wykresy ilustrują dokładność korekcji w formie średnich błędów położenia (tj. wypadkowej błędów X i Y) w funkcji liczby fotopunktów użytych do procesu korekcji oraz zastosowanego modelu korekcyjnego. Ponadto w tabelach 4 i 5 prezentowane są błędy średnie i błędy maksymalne korekcji, oddzielnie dla każdej ze współrzędnych X i Y przy stosowanej metodzie korekcji.

Wyniki dotyczące tego zagadnienia wraz z analizą autor przedstawił na XX Kongresie ISPRS w Istambule (Wolniewicz, 2004).

**Tabela 4. Obszar testowy "Warszawa" – dokładność korekcji obrazu QuickBird i IKONOS przy 10 fotopunktach, (błędy średnie i maksymalne na 17 punktach kontrolnych) dla metody parametrycznej (MP) i wielomianowej (RPC)**

Metoda korekcji	IKONOS				QuickBird			
	błąd średni $m_0$ [m]		błąd maks. [m]		błąd średni $m_0$ [m]		błąd maks. [m]	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
MP	0,96	0,84	1,77	2,02	0,94	0,64	2,35	1,44
RPC	0,89	0,86	2,00	2,40	1,31	1,05	3,93	1,94

**Tabela 5. Obszar testowy "Nowy Targ" – dokładność korekcji obrazu QuickBird i IKONOS przy 10 fotopunktach, (błędy średnie i maksymalne na 27 punktach kontrolnych) dla metody parametrycznej (MP) i wielomianowej (RPC)**

Metoda korekcji	IKONOS				QuickBird			
	błąd średni $m_0$ [m]		błąd maks. [m]		błąd średni $m_0$ [m]		błąd maks. [m]	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
MP	0,85	1,22	1,62	3,23	1,22	1,00	5,89	3,03
RPC	1,03	1,20	2,93	2,05	2,74	1,51	6,47	3,21

## Badanie wpływu jakości NMT na dokładność ortorektyfikacji

Jakość NMT jest – obok fotopunktów – czynnikiem decydującym o możliwej do osiągnięcia dokładności ortorektyfikacji obrazów. Praktyczny wpływ NMT przebadano wykonując ortorektyfikację obrazów IKONOS i QuickBird dla obu pól testowych, przy zastosowaniu NMT o różnej dokładności wysokościowej. Wpływ NMT na wyniki ortorektyfikacji oceniono na podstawie błędów szcztkowych obrazów po korekcji.

Odpowiednio w tabelach 6, 7, 8 i 9 przedstawiono wyniki korekcji obrazów IKONOS i QuickBird z pól testowych „Warszawa” i „Nowy Targ” uzyskane w środowisku PCI Geomatica. W tabelach prezentowane są błędy średnie i błędy maksymalne korekcji oddzielnie dla każdej ze współrzędnych X i Y, przy stosowaniu różnych NMT i metod korekcji. Błędy zostały oszacowane z użyciem 9 fotopunktów kontrolnych.

**Tabela 6. Obszar testowy "Warszawa" – dokładność korekcji obrazu IKONOS przy 9 fotopunktach, (błędy średnie i maksymalne na punktach kontrolnych) dla metody parametrycznej i wielomianowej (RPC) oraz różnych NMT**

NMT	Metoda parametryczna				Metoda wielomianowa (RPC)			
	błąd średni $m_0$ [m]		błąd maks. [m]		błąd średni $m_0$ [m]		błąd maks. [m]	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
DTED 0	0,78	1,20	1,32	2,16	0,65	1,18	1,36	3,52
DTED 1X	0,66	0,80	1,56	1,92	0,55	0,93	1,08	2,31
DTED 2	0,65	0,86	1,41	1,75	0,54	0,88	1,13	2,30

**Tabela 7. Obszar testowy "Warszawa" – dokładność korekcji obrazu QuickBird przy 9 fotopunktach (błędy średnie i maksymalne na punktach kontrolnych) dla metody parametrycznej i wielomianowej (RPC) oraz różnych NMT**

NMT	Metoda parametryczna				Metoda wielomianowa (RPC)			
	błąd średni $m_0$ [m]		błąd maks. [m]		błąd średni $m_0$ [m]		błąd maks. [m]	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
DTED 0	1,03	0,66	2,21	1,30	1,10	1,14	3,37	2,16
DTED 1X	0,88	0,60	2,32	1,42	1,29	1,07	4,02	2,06
DTED 2	0,92	0,62	2,35	1,42	1,33	1,05	4,04	2,03

**Tabela 8. Obszar testowy "Nowy Targ" – dokładność korekcji obrazu IKONOS (błędy średnie i maksymalne na punktach kontrolnych) dla metody parametrycznej (przy 13 fotopunktach) i wielomianowej – RPC (przy 9 fotopunktach) oraz różnych NMT**

NMT	Metoda parametryczna				Metoda wielomianowa (RPC)			
	błąd średni $m_0$ [m]		błąd maks. [m]		błąd średni $m_0$ [m]		błąd maks. [m]	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
DTED 1X	0,88	1,01	2,12	2,85	1,03	1,27	2,84	3,15
DTED 2	0,75	0,93	1,42	2,50	0,96	0,83	2,64	2,50
DTED 2X	0,88	1,10	1,60	2,47	1,08	1,21	2,91	2,97

**Tabela 9. Obszar testowy "Nowy Targ" – dokładność korekcji obrazu QuickBird przy 9 fotopunktach (błędy średnie i maksymalne na punktach kontrolnych) dla metody parametrycznej i wielomianowej (RPC) oraz różnych NMT**

NMT	Metoda parametryczna				Metoda wielomianowa (RPC)			
	błąd średni $m_0$ [m]		błąd maks. [m]		błąd średni $m_0$ [m]		błąd maks. [m]	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
DTED 1X	1,31	1,21	3,16	3,57	2,93	1,57	6,28	3,06
DTED 2	1,00	0,94	3,14	2,60	2,72	1,58	5,63	2,85
DTED 2X	1,18	0,93	3,14	2,87	2,79	1,57	6,19	2,92

Wykresy (rys. 3, 4, 5 i 6) ilustrują dokładność korekcji w formie średnich błędów położenia (tj. wypadkowej błędów X i Y) w funkcji liczby fotopunktów użytych do korekcji oraz stosowanego NMT.

Wyniki dotyczące tego zagadnienia wraz z analizą autor przedstawił na XXV ACRS, Thailand (Wolniewicz, Jaszczak, 2004).

## **Badanie możliwości wytworzenia ortofotomap z obrazów o dużym kącie wychylenia układu optycznego**

Duże wychylenie układu optycznego kamery od linii pionu stanowi istotne ograniczenie właściwości pomiarowych pozyskiwanych obrazów. Przy dużym kącie wychylenia dają o sobie znać błędy wysokościowe NMT użytego do ortorektyfikacji, obniżając dokładność generowanej ortofotomapy. Z tych powodów obrazy pozyskiwane do opracowań pomiarowych pozyskuje się przy wychyleniu układu optycznego od linii pionu do  $15^0$ – $20^0$ . Z drugiej strony, dopuszczając większe wychylenie, zwiększa się wydajność obrazowania i szanse na wykonanie obrazu w zaplanowanym terminie. Podjęto więc próbę praktycznego przebadania możliwości wytworzenia ortofotomapy z obrazów o dużym kącie wychylenia układu optycznego.

W ramach eksperymentu badającego wpływ wychylenia układu optycznego na dokładność

procesu ortorektyfikacji obrazów o bardzo dużej rozdzielczości wykorzystano dwie sceny IKONOS. Jedną charakteryzowała się wychyleniem o punktu nadirowego  $10,5^0$ , a druga  $43^0$ . Dane techniczne tych zobrażeń przedstawiono w tabeli 10.

**Tabela 10. Charakterystyka użytych zobrażeń**

IKONOS		
Data zobrażenia	29-04-2003	12-01-2005
Czas zobrażenia	09:55	10:25
Kąt wychylenia [°]	10.59	43.07
Format użyty	PAN	PAN
Antena ROC	EUSI	SCOR
Rozdzielczość radiometryczna	11 bit	11 bit
Rozdzielczość terenowa [m]	0.85x0.84	1.48x1.09
Wielkość sceny [km]	21x11	17x21

Do generowania ortofotomapy w środowisku PCI wykorzystano NMT DETED Level 2. Wcześniejsze badania wykazały, że średni błąd wysokościowy tego modelu dla terenu War-



szawy zawiera się w granicach 1–2 m. Dla obu badanych obrazów wykorzystano 35 tych samych fotopunktów pomierzonych techniką GPS. Służyły one jako punkty użyte do procesu generowania ortofotomapy i jej kontroli. Przy użyciu metody wielomianowej i parametrycznej przebadano dokładność produktu, uwzględniając jedynie czynnik wpływu kąta wychylenia układu optycznego satelity IKONOS (tab. 11, rys. 7). W przypadku wychylenia o kąt 43°, punkt nadirowy znajdował się 630 km na zachód od zobrazowywanego terenu tj. od Warszawy.

Wyniki dotyczące tego zagadnienia wraz z analizą autor przedstawił na Konferencji ISPRS, Hanower (Wolniewicz, 2005).

**Tablica 11. Obszar testowy "Warszawa" – dokładność korekcji obrazu QuickBird i IKONOS przy 10 fotopunktach (błędy średnie i maksymalne na punktach kontrolnych – 15) dla metody parametrycznej i wielomianowej (RPC) przy wychyleniu układu optycznego 43 i 10 stopni**

Kąt wychylenia	Metoda parametryczna				Metoda wielomianowa (RPC)			
	błąd średni $m_0$ [m]		błąd maks. [m]		błąd średni $m_0$ [m]		błąd maks. [m]	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
43 °	2,06	1,94	2,77	2,92	1,86	1,64	2,77	3,02
10.5 °	1,09	1,02	2,03	2,11	1,11	1,09	1,80	1,99

## Analiza otrzymanych wyników oceny korekcji geometrycznej IKONOS i QuickBird

Prowadzone badania miały na celu analizę różnych czynników wpływających na dokładność ortorektyfikacji obrazów Ikonos i QuickBird. Szczegółowej analizie poddano wpływ:

- modeli korekcyjnych, z rozróżnieniem na przypadki wykorzystania parametrów modeli dostarczanych wraz z obrazem i wyznaczanych w oparciu o osnowę,
- liczby i rozkładu fotopunktów – wykorzystano fotopunkty naturalne wyznaczone techniką GPS i pozyskane z map topograficznych w skali 1:10 000,
- numerycznego modelu terenu – prowadzono korekcję z wykorzystaniem różnych NMT
- kąta wychylenia układu optycznego kamery.

Przebadano również możliwość korekcji obrazu z bardzo dużym wychyleniem kamery.

W badaniach zastosowano różne scenariusze techniczne i technologiczne korekcji, uwzględniające powyższe uwarunkowania. Skuteczność korekcji każdorazowo oceniano na dużej liczbie fotopunktów kontrolnych (tj. punktów nie biorących udziału w procesie wyrównawczym). Dało to wiarygodną ocenę skuteczności korekcji prowadzonej według różnych scenariuszy.

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie poniższych wniosków.

1. Zasadniczym czynnikiem wpływającym na wielkość szczytkowych zniekształceń geometrycznych generowanej ortofotomapy z obrazów VHRS jest dobór i dokładność używanych fotopunktów GCP. Wykorzystywane fotopunkty należy bardzo precyzyjnie wybierać, mierzyć i interpretować w procesie ortorektyfikacji.

2. Dla terenów płaskich, przy wykorzystaniu NMT o dokładności wysokościowej 1–3 m i użyciu jednego fotopunktu z pomiarów DGPS (o dokładności planimetrycznej ok. 20–40 cm), wykonując proces ortorektyfikacji obrazu IKONOS metodą wielomianową (RPC), uzyskano średni błąd rzędu 1,5 m. Zauważono, iż już przy użyciu tylko jednego fotopunktu uzyskano zdecydowaną poprawę dokładności ortofotomapy, w porównaniu z przypadkiem bez użycia fotopunktów (opartym o dane pokładowe). Zwiększając liczbę wykorzystywanych fotopunktów (GCP) w metodzie wielomianowej nie zauważono znacznej poprawy dokładności generowanej ortofotomapy. Natomiast przy stosowaniu modelu parametrycznego do korekcji tego zobrazowania (na tych samych fotopunktach) stwierdzono, iż istnieje potrzeba użycia 9 fotopunktów, aby osiągnąć taką samą dokładność jak przy zastosowaniu modelu wielomianowego.

3. W przypadku prowadzonych badań nad obrazem QuickBird (przy zastosowaniu tych samych warunków), model wielomianowy daje dokładność na punktach kontrolnych ok. 2 m, lecz przy zastosowaniu min. 2 GCP. Model parametryczny przy 9 GCP daje dokładność na poziomie 1 m. Stwierdzono gorszą skuteczność korekcji wielomianowej (RPC) obrazów QuickBird w porównaniu z obrazami IKONOS, przy tej samej liczbie fotopunktów, zarówno dla obszaru płaskiego jak i podgórskiego. **Wskazuje to na mniejszą stabilność wewnętrzną systemu QuickBird, a co za tym idzie dostarczany do użytkowników zapis współczynników RPC cechuje gorsza dokładność.** Po raz pierwszy opisane wnioski autor przedstawił na konferencji w Rzymie w 2004 roku.

4. Dla terenu płaskiego, wykorzystanie NMT o dokładności wysokościowej 3–5 m i zastosowanie modelu wielomianowego, już przy użyciu jednego fotopunktu daje średni błąd korekcji obrazu IKONOS na poziomie ok. 1,5 m. Uzyskanie podobnej dokładności dla obrazu QuickBird wymaga użycia modelu parametrycznego i od 8 do 10 fotopunktów.

5. Dobre wyniki uzyskano wykorzystując fotopunkty identyfikowane na mapach topograficznych w skali 1:10 000. Główną korzyścią takiego podejścia jest zdecydowanie niższy koszt pozyskania fotopunktów z map aniżeli pomiar terenowy techniką GPS. Jeśli dokładność ortofotomapy na poziomie 2–3 piksele jest wystarczająca, to w terenach płaskich można zalecać pozyskiwanie fotopunktów z map topograficznych w skali 1:10 000.

6. Dla obszaru podgórskiego (obiekt testowy „Nowy Targ”) metoda wielomianowa (RPC) pozwala skorygować obraz IKONOS z dokładnością około 1,5 m, prawie niezależnie od użytej liczby fotopunktów. Użycie metody parametrycznej i powyżej 10 fotopunktów daje podobny rezultat.

7. Numeryczny model terenu DTED Level 1X pochodzący z SRTM jest wystarczający dla ortorektyfikacji wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych. Nawet dla obszarów silnie pofałdowanych NMTu DTED Level 2 i DTED Level 1X (SRTM) dają podobne rezultaty dla obu obrazów i obu metod korekcji.

8. Pomimo znacznego zwiększenia się wymiarów piksela, przy obrazowaniu o dużym wychyleniu (30–45°) stosunkowo łatwe jest uzyskanie ortofotomapy o średnim błędzie poniżej 2 m, przy stosowaniu zarówno modelu wielomianowego jak i parametrycznego. Ortorektyfikacja zobrazowań o dużym wychyleniu, dla obu modeli korekcji wymaga użycia większej liczby fotopunktów.

9. Duże wychylenie układu optycznego daje zdecydowany wzrost obszaru widzenia w ramach pojedynczej sceny, ale z drugiej strony spada rozdzielczość (rosną wymiary pikseli terenowych) i następuje spadek jakości radiometrycznej obrazu.

### Literatura

- Baran E, Jakubowicz D, Jaszczak P, Różycki S., 2004: Wolniewicz W. (opiekun naukowy), Zastosowanie zdjęć satelitarnych o bardzo wysokiej rozdzielczości do tworzenia Baz Danych Topograficznych. Sympozjum PTFiT, Białobrzegi.
- Follehr S., Piskorz M., Jaszczak P., Zieliński R., 2003: Wolniewicz W. (opiekun naukowy), Analiza porównawcza wartości informacyjnej wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych i zdjęć lotniczych. Grant Rektorski. Politechnika Warszawska.
- Follehr S., Piskorz M., Jaszczak P., Zieliński R., 2003: Wolniewicz W. (opiekun naukowy), Porównanie zobrazowań VHRS, Ogólnopolskie Sympozjum Geoinformatyczne, Wrocław.
- Jacobsen K. 2004: Potential Application of Very High Resolution Satellite Imagery, Seminarium Naukowe, Zakład Fotogrametrii PW.
- Ke L. Ch., Wolniewicz W., 2005: Geometrical models for very high resolution satellite sensors. *Kwartalnik Geodezja i Kartografia* (artykuł złożony do druku 08/2005).
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2002a: Wysokorozdzielcze systemy obrazowania satelitarnego, cz. I – Pksel schodzi poniżej metra, *Magazyn Geoinformacyjny Geodeta* nr 7(86).
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2002b: Wysokorozdzielcze systemy obrazowania satelitarnego, cz. II – Co oznacza piksel poniżej metra?, *Magazyn Geoinformacyjny Geodeta* nr 8(87).
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2002c: Korekcja geometryczna wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych. Zrób to sam, *Magazyn Geoinformacyjny Geodeta* nr 11(90).
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2003: Nowa jakość obrazowania satelitarnego SPOT5, *Magazyn Geoinformacyjny Geodeta* nr 7(98).
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2005a: Assessment of very high resolution satellite image (VHR) for the development of topographic database. 6<sup>th</sup> Geomatic Week, Barcelona.
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2005b: Ocena przydatności obrazów satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości (VHRS) do tworzenia bazy danych topograficznych. *Przegląd Geodezyjny*. 05/2005.
- Wojtynek R., Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2004: Assessment of Very High Resolution Images (VHR) Utilization For the Needs of the Polish National Geodesy Authorities. Int. Geographical Information Systems Conference and Exhibition "GIS Odyssey 2004" Croatia.
- Wojtynek R., Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2005: Evaluation of usefulness of the VHRS images for elaboration of the topographic data base (TBD) "GIS Odyssey 2005", Croatia.
- Wolniewicz W., 2003: Potrzeba uzupełnienia technologii tworzenia TBD o wysokorozdzielcze obrazy satelitarne VHRS, Ogólnopolskie Sympozjum Geoinformatyczne, Wrocław.
- Wolniewicz W., 2004a: Assessment of Geometric Accuracy of VHR Satellite Images. ISPRS Congress, Istanbul.
- Wolniewicz W., 2004b: Przykłady wykorzystania wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych dla potrzeb obszarów wiejskich, Jubileuszowa Konferencja Naukowa, Falenty.
- Wolniewicz W., 2004c: Porównanie wyników ortorektyfikacji obrazów satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości. Sympozjum PTFiT, Białobrzegi.
- Wolniewicz W., 2004d: Rozwój systemów satelitarnych VHR, *Roczniki Geomatyki* t. II, z.2.
- Wolniewicz W., 2004e: Assessment of VHR Satellite Images. Annual EURIMAGE Users Conference. Rzym.
- Wolniewicz W., Jaszczak P., 2004: Orthorectification of Very High Resolution Satellite Images. XXV<sup>th</sup> Asian Conference of Remote Sensing, Thailand.
- Wolniewicz W., 2005: Geometrical capacity of the VHRS images collected with significant off nadir angle, ISPRS, Hanower.
- Wolniewicz W., Follehr S., Piskorz M., Jaszczak P., Zieliński R., 2005: Analiza porównawcza wartości informacyjnej wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych i zdjęć lotniczych. *Przegląd Geodezyjny*. 02/2005.
- Wolniewicz W. Jakubowicz, D. Jaszczak, P., 2005: GCP accuracy requirements for QuickBird orthorectification., 6<sup>th</sup> Geomatic Week, Barcelona.

### **Summary**

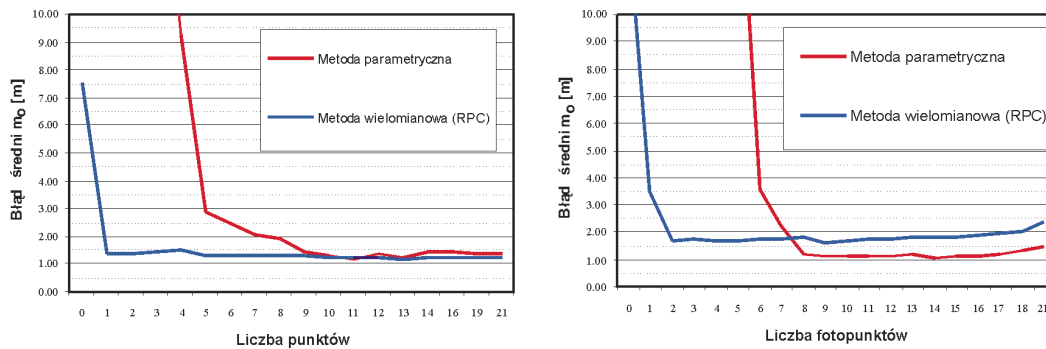
*Commercial VHRS images of earth surface more and more frequently replace and supplement aerial photographs. Both the interest in these images and the scope of their use are on the rise.*

*While principles and geometry of creation of orthophoto maps based on aerial photos are well known, the possibilities of their creation with the use of VHR are still at the stage of research. Such research is carried out by various scientific and research centers, among others a research project of the Ministry of Scientific Research and Information Technology conducted at the Warsaw Technical University and completed in 2005. Results of this project are presented in this paper, covering the comparison of accuracy of orthorectification processes of IKONOS and QuickBird images and the description of basic differences between the geometry of aerial photos and satellite images of the VHRS type.*

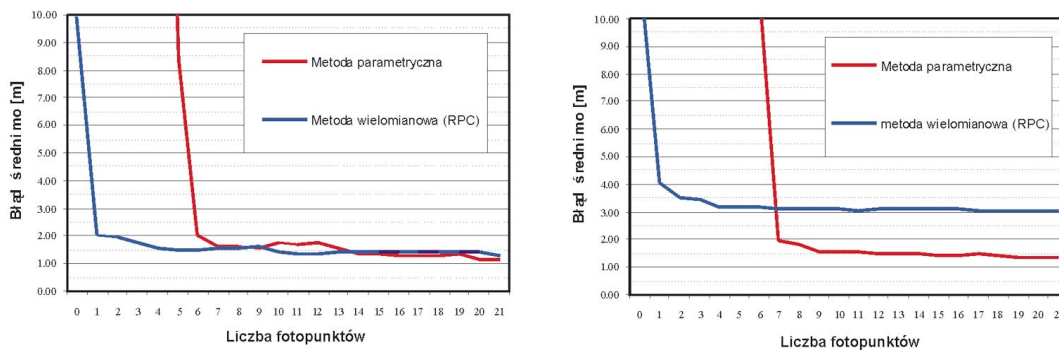
*Two test fields have been selected for this project (Warsaw as flat area representing built-up terrain and Nowy Targ representing foothills terrain). For these test fields, images from IKONOS and QuickBird were ordered. On the VHRS images of each test field area, 30–50 GCPs were designated and then measured with GPS in planimetric accuracy of 10 cm. For creation of orthophoto maps available DTM models were used featured with various accuracy (Level 0, Level 1, Level 2 and SRTM). Orthorectification process was performed with the aid of generally available commercial software PCI Geomatica. In the orthorectification process the accuracy of the following elements was investigated: correction methods, distribution, designation of GCP, different type of DEM used and the influence of significant off-nadir angle on the final accuracy of orthophoto maps.*

*The research conducted allowed to formulate principles of creating orthophoto maps with the use of satellite photogrammetry. The results obtained allow to promote VHRS images for wide use for purposes of GIS, cartography and various thematic analyses of the earth surface.*

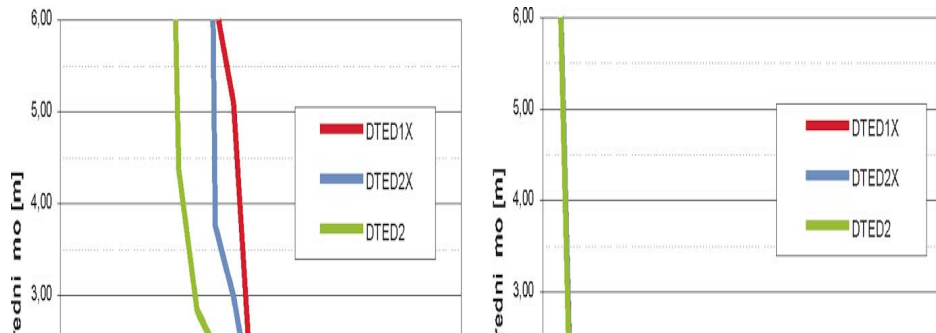
dr inż. Wiesław Wolniewicz  
w.wolniewicz@gik.pw.edu.pl



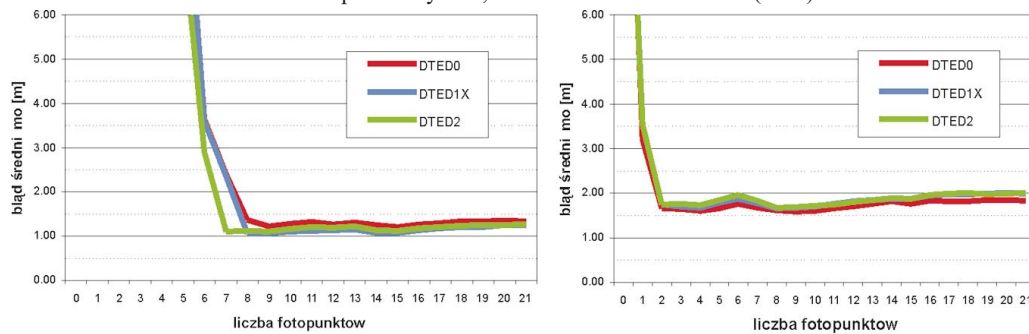
Rys. 1. Obszar testowy „Warszawa” – dokładność korekcji obrazu: a – IKONOS, b – QuickBird; wartości Z z pomiaru DGPS



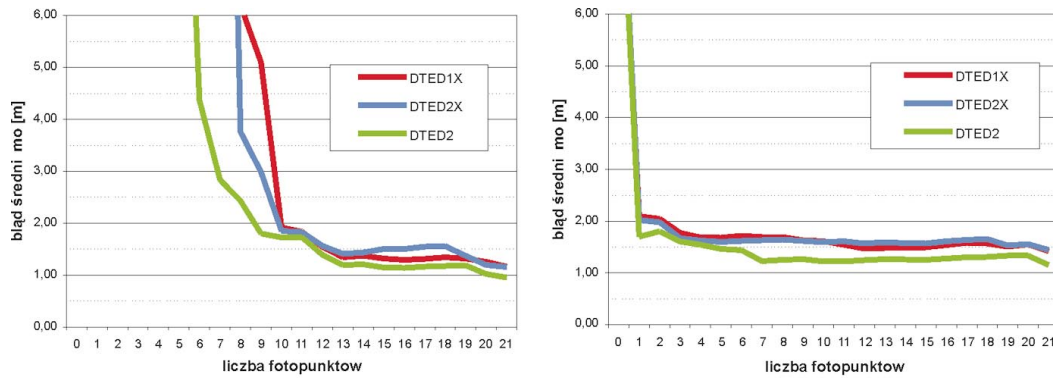
Rys. 2. Obszar testowy „Nowy Targ” – dokładności korekcji obrazu: a – IKONOS, b – QuickBird; wartości Z z pomiaru DGPS



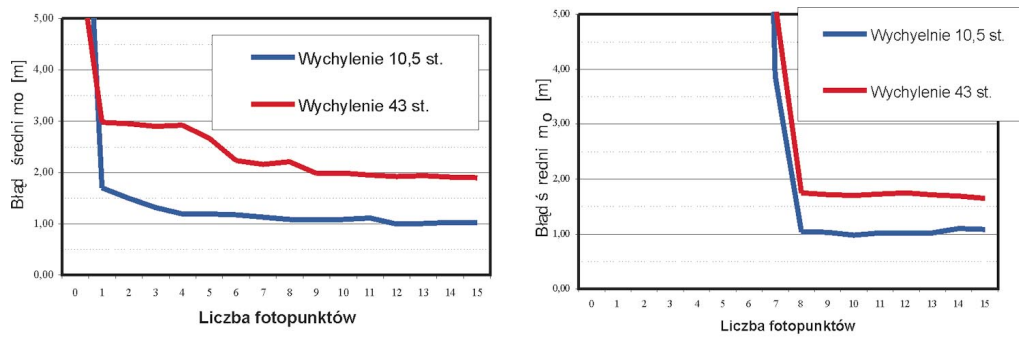
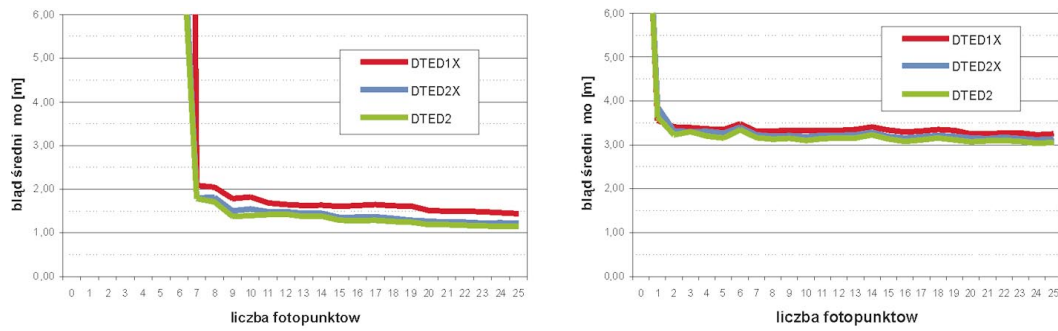
Rys. 3. Obszar testowy „Warszawa” – dokładność korekcji obrazu IKONOS: a – metoda parametryczna, b – metoda wielomianowa (RPC)



Rys. 4. Obszar testowy „Warszawa” – dokładność korekcji obrazu QuickBird: a – metoda parametryczna, b – metoda wielomianowa (RPC)



Rys. 5. Obszar testowy „Nowy Targ” – dokładność korekcji obrazu IKONOS:  
 a – metoda parametryczna, b – metoda wielomianowa (RPC)



Rys. 7. Obszar testowy „Warszawa” – dokładności korekcji obrazów IKONOS przy wychyleniu układu optycznego 43° i 10° dla modelu: a – wielomianowego, b – ścisłego