

# Demistyfikacja IKONOS-a

THIERRY TOUTIN, PHILIP CHENG

**Produkt IKONOS Geo spełnia tylko wymagania dokładnościowe stawiane mapom w skali 1:100 000. Ponadto ani obrazy stereoskopowe odpowiadające produktowi IKONOS Geo, ani obrazy źródłowe preferowane przez fotogrametrów, nie są dostępne w sprzedaży. Produkt IKONOS Precision jest najdroższy, ale oferuje najwyższą dokładność (4 m CE90). Aby go otrzymać, zamawiający powinien dostarczyć do Space Imaging współrzędne punktów kontrolnych (GCP) i cyfrowy model wysokości (DEM) w celu wygenerowania ortoobrazu. Ponieważ większość obrazów jest rejestrowana w pozycji nachylonej, dokładność współrzędnych XY punktów GCP powinna być lepsza niż 1 m, a dokładność określenia wysokości na podstawie DEM nie gorsza niż 5 m. Dokładność subpikselowa, którą można uzyskać w przypadku satelitów SPOT i LANDSAT, nie będzie osiągalna dla IKONOS-a, nawet w terenach płaskich.**

IKONOS, komercyjny satelita dostarczający obrazów o najwyższej obecnie rozdzielczości geometrycznej dostępnej ogólnie użytkownikom, został pomyślnie umieszczony na orbicie we wrześniu 1999 roku. Skaner IKONOS-a może rejestrować obrazy powierzchni Ziemi z rozdzielczością przestrzenną 1 metra w zakresie panchromatycznym oraz 4 metrów w przypadku rejestracji wielospektralnej, przy zmiennym kącie obserwacji, z możliwością odchylenia osi optycznej skanera do 60 stopni od nadiru (w dowolnym kierunku) w celu zwiększenia częstości rejestracji oraz pozyskiwania obrazów stereoskopowych. Obrazy o wysokiej rozdzielczości dostarczane przez IKONOS-a będą miały teoretycznie nieograniczoną liczbę użytkowników reprezentujących wiele dziedzin, takich jak: kartografia, rolnictwo czy leśnictwo, oraz służb rządowych i samorządowych (administracja oraz służby ratownicze).

Dane z IKONOS-a mogą być wykorzystywane zamiast dotychczas stosowanych zdjęć lotniczych do wykonywania oraz późniejszego aktualizowania szczegółowych map całych krajów. Pozwolą one farmerom kontrolować stan zdrowotny upraw oraz szacować zbiory z większą dokładnością i w krótszym czasie. Dzięki nim naukowcy będą w stanie badać obszary zagrożone ekologicznie i z większą pewnością wyznaczać trendy zmian. Urzędnicy będą mogli monitorować i lepiej planować gospodarowanie przestrzenią, a urbanisci i planiści lepiej kształtować strefy zabudowy mieszkaniowej. Krótko mówiąc, gama zastosowań obrazów IKONOS-a zależy tylko od wyobraźni.

## Czego oczekujemy od IKONOS-a

Obrazy IKONOS-a, którego rozwiązania są wzorowane na podobnych systemach montowanych na samolotach lub promach kosmicznych, mają potencjalnie szerokie możliwości zastosowań kartograficznych. Ich głównym atutem, z perspektywy użytkowników, jest 1-metrowa rozdzielczość geometryczna (terenowa), która pozwala rozpoznać i „skartować” obiekty występujące na większości typowych cyfrowych opracowań kartograficznych. Użytkownicy mogą spodziewać się uzyskania dokładności subpikselowej (tak jak to było w przypadku wcześniejszych satelitów, na przykład SPOT czy LANDSAT), ale czy ich oczekiwania dokładnościowe nie są zbyt wygórowane? Możliwość rejestracji obrazów nachylonych (tj. rejestracji przy osi optycznej odchylonej od nadiru) jest również ważną cechą IKONOS-a, gdyż zwiększa częstotliwość obrazowania tego samego obszaru do dwóch, trzech dni, jak również (teoretycznie) umożliwia pozyskanie obrazów stereoskopowych. Tak więc użytkownicy mogliby stosować przy opracowywaniu tych obrazów tradycyjne technologie fotogrametryczne, aby uzyskać informacje dwu- i trójwymiarowe, takie jak np. cyfrowy model wysokości (DEM – *Digital Elevation Model*). Czy te dane stereoskopowe są dostępne?

## Co otrzymujemy z IKONOS-a

Dane obrazowe z IKONOS-a są oferowane w postaci pięciu produktów o różnych poziomach przetworzenia, dostępnych dla końcowego odbiorcy w pięciu różnych cenach (stosownie do wybranego poziomu przetworzenia). Tabela numer 1 zawiera ceny podstawowych produktów uzyskiwanych na podstawie rejestracji w zakresie panchromatycznym. W przypadku niestandardowych, specjalnych produktów lub usług pobierane są dodatkowe opłaty. Produkty IKONOS-a są rozpowszechniane

Kod produktu	Dokładność CE90	Cena dla klientów z Ameryki Płn. (USD/km <sup>2</sup> )	Cena dla pozostałych klientów (USD/km <sup>2</sup> )
Geo	50 m	12	29
Reference	25 m	29	73
Map	12 m	39	98
Pro	10 m	49	122
Precision	4 m	66	149

CE90 – dokładność położenia piksela, określona promieniem okręgu, w jakim środek piksela powinien się znaleźć z prawdopodobieństwem 90%.

Tabela 1. Ceny detaliczne podstawowych produktów panchromatycznych na podstawie informacji umieszczonych na stronie WWW Space Imaging (<http://www.spaceimaging.com>)

w postaci 8- lub 11-bitowych obrazów cyfrowych GeoTiff wraz z tekstowymi plikami metadanych (zawierającymi specyfikację szczegółów zamówienia oraz opis danych źródłowych i produktu). Minimalny koszt zamówienia ustalono na poziomie 1000 USD dla klientów z Ameryki Północnej i 2000 USD – dla pozostałych. Zgodnie z zapewnieniami Space Imaging, po potwierdzeniu przyjęcia zamówienia produkty dostępne w archiwum dostarczane są w ciągu kilku dni (do około tygodnia). Dostarczenie produktów opracowywanych na podstawie nowo gromadzonych danych zwykle zajmuje dwa lub więcej tygodni, w zależności od wielkości zamówienia, warunków pogodowych, żądanej dokładności oraz czasu potrzebnego na pozyskanie i dostarczenie do Space Imaging współrzędnych terenowych punktów kontrolnych (GCP – *Ground Control Points*) i cyfrowego modelu wysokości terenu DEM. Produkt *IKONOS Geo*, najbardziej dostępny ze względu na cenę, charakteryzuje się najmniejszą dokładnością, ponieważ nie jest skorygowany ze względu na deniwelację terenu, a więc nie jest ortoobrazem. Ma dokładność 50 m (CE90) w płaszczyźnie XY, co oznacza, że w dziewięciu przypadkach na dziesięć dowolny punkt obrazu może być przesunięty w stosunku do jego właściwej pozycji maksymalnie o 50 metrów w terenie. Dokładność pogarsza się dla terenów górzystych, jeśli obrazy są rejestrowane w pozycji nachylonej, co jest dość powszechne, jeśli chodzi o dane z *IKONOS*-a. Wskutek tego produkt *IKONOS Geo* spełnia tylko wymagania dokładnościowe stawiane mapom w skali 1:100 000. Ponadto ani obrazy stereoskopowe odpowiadające produktowi *IKONOS Geo*, ani obrazy źródłowe (*raw* – surowe, pierwotne) preferowane przez fotogrametrów, nie są dostępne w sprzedaży. Produkt *IKONOS Precision* jest najdroższy, ale oferuje najwyższą dokładność (4 m CE90). Aby go otrzymać, zamawiający powinien dostarczyć do Space Imaging współrzędne punktów kontrolnych (GCP) i cyfrowy model wysokości (DEM) w celu wygenerowania ortoobrazu. Ponieważ większość obrazów jest rejestrowana w pozycji nachylonej, dokładność współrzędnych XY punktów GCP powinna być lepsza niż 1 m, a dokładność określenia wysokości na podstawie DEM nie gorsza niż 5 m. Dokładność subpikselowa, którą można uzyskać w przypadku satelitów SPOT i LANDSAT, nie będzie osiągalna dla *IKONOS*-a, nawet w terenach płaskich.

## W czym tkwią problemy

W odróżnieniu od innych satelitów komercyjnych *IKONOS* nie udostępnia szczegółowych danych o swojej orbicie. Dodatkowo, konieczność dostarczenia do Space Imaging punktów kontrolnych (GCP) oraz DEM w celu uzyskania produktu *IKONOS Precision* może powodować opóźnienie w realizacji zamówienia. Fakt ten stanowi również problem dla użytkowników, którzy nie mają uprawnień do udostępniania, publikowania i rozpowszechniania danych kartograficznych swoich krajów. Ceny produktu *IKONOS Precision* są bardzo wysokie w porównaniu z cenami produktu *IKONOS Geo*. Wszystko to może zniechęcać potencjalnych użytkowników do kupowania produktów *IKONOS*-a lub do poprawnego i właściwego ich użytkowania. Czy jednakże z punktu widzenia użytkownika możliwe jest zakupienie produktu *IKONOS Geo* (około 5,5 razy tańszego niż *IKONOS Precision*) i skorygowanie go do postaci ortoobrazu we własnym zakresie? Krótka odpowiedź brzmi: „Tak”. Użytkownicy zaoszczędzą czas i pieniądze. Pozbędą się problemów administracyjnych związanych z przekazywaniem danych GCP i DEM za granicę i będą w stanie poprawnie wykorzystać to nowe źródło danych.



Fot. 1a. Fragment obrazu *IKONOS*-a z obszaru Richmond Hill, Ontario, Kanada

Fot. 1b. Fragment zdjęcia lotniczego w skali 1:8000 tego samego obszaru

## Jakie są rozwiązania

Do skorygowania produktu *IKONOS Geo* można zastosować trzy różne rozwiązania:

- zwykłą metodę wielomianową,
- ilorazową\* metodę wielomianową,
- precyzyjny (rygorystyczny), matematyczny model korekcji.

Celem badań opisanych w niniejszym artykule było zastosowanie tych trzech metod do korekcji produktu *IKONOS Geo* i porównanie uzyskanych wyników.

Zwykła metoda wielomianowa, choć często uważana za przestarzałą, jest bardzo prostą metodą korekcji obrazów. Pozwala ona dokonać korekcji zniekształceń planimetrycznych (tylko w pla-



Rys. 2a. Fragment obrazu IKONOS-az obszaru Richmond Hill, Ontario, Kanada

Rys. 2b. Fragment zdjęcia lotniczego wskałi 1:8000 tego samego obszaru

szczyźnie  $X, Y$ ) przy zastosowaniu punktów GCP. Ponieważ metoda ta nie uwzględnia wpływu wysokości punktu na jego położenie na obrazie (przesunięcie radialne pikseli spowodowane deniwelacją terenu) jej stosowanie powinno być ograniczone do niewielkich i płaskich obszarów.

Ilorazowa metoda wielomianowa 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 (GCP). Metoda ta może być stosowana dla obszarów charakteryzujących się umiarkowanym zróżnicowaniem rzeźby terenu i łagodnością form terenowych. Zarówno ta metoda, jak i zwykła metoda wielomianowa nie wymagają znajomości położenia sa-

telity na orbicie oraz orientacji sensorów (skanera) w przestrzeni. Ponieważ żadna z tych metod nie należy do rozwiązań ścisłych (nie jest matematycznym modelem opisującym precyzyjnie proces fizycznej rejestracji obrazu przy przemieszczaniu się urządzenia rejestrującego), dlatego wymaga dużej liczby punktów GCP i poprawna jest właściwie tylko na tych punktach. Dystorsje (zniekształcenia obrazu) między punktami GCP nie są całkowicie eliminowane w procesie korekcji.

Rozwiązania ścisłe (precyzyjne, rygorystyczne), tj. modele matematyczne, powinny wiernie odzwierciedlać charakter złożonej geometrii obrazowania oraz deformacji obrazu spowodowanych orientacją i pozycją skanera, ruchem Ziemi, a niekiedy i zniekształcenia właściwe odwzorowaniom kartograficznym. Powinny uwzględniać informacje o położeniu satelity i sensorów w przestrzeni. W porównaniu ze zwykłą i ilorazową metodą wielomianową precyzyjna metoda modelowania daje najbardziej dokładne wyniki, przy relatywnie małej liczbie punktów GCP.

Faktem jest, że szczegółowe informacje o orientacji i pozycji sensorów satelity IKONOS nie są jeszcze udostępniane. Mimo to autor niniejszego artykułu (główny specjalista w Canada Centre for Remote Sensing – CCRS, Natural Resources Canada) z powodzeniem opracował dokładny model orbitalny dla IKONOS-a, wykorzystując podstawowe informacje zawarte w plikach metadanych i nagłówkach plików obrazowych. Na przykład przybliżony kąt nachylenia można obliczyć przy wykorzystaniu nominalnej wartości wysokości satelity nad Ziemią w chwili rejestracji oraz nominalnej rozdzielczości terenowej w kierunku równoległym i prostopadłym do kierunku skanowania. Model opracowany w CCRS jest oparty na zasadach ruchu orbitalnego satelitów, fotogrametrii, geodezji i kartografii. Został pomyślnie zastosowany przy użyciu tylko kilku (3-6) punktów kontrolnych (GCP) dla skanerów pracujących w widmie widzialnym i podczerwieni („optycznych”), takich jak LANDSAT 5 i 7, SPOT, IRS, ASTER oraz KOMPSAT, a także systemów radarowych SAR (ERS, JERS, SIR-C i Radarsat). Przy dobrej jakości GCP, tj. precyzyjnie wyznaczonym położeniu punktów GCP, uzyskano dokładność tego modelu w granicach  $1/3$  piksela dla skanerów optycznych i 1 interwału próbkowania (*resolution cell*) dla obrazów SAR.

## Eksperyment

W celu przetestowania wspomnianych trzech metod korekcji, w kwietniu 2000 r. zamówiono produkt *IKONOS Geo* dla obszaru miasta Richmond Hill, położonego na północ od Toronto w Kanadzie. Różnica wysokości na tym obszarze zawiera się w granicach od 180 do 240 metrów. Space Imaging dostarczyło dane po 30 dniach od daty potwierdzenia zamówienia. Z pliku metadanych zostały odczytane informacje potrzebne do obliczenia parametrów orientacji i położenia satelity, niezbędnych w konstrukcji precyzyjnego modelu. Do przeprowadzenia eksperymentu pozyskano również 30 GCP równomiernie rozmieszczonych na obrazie, dla których współrzędne  $XY$  zostały zdjęte z cyfrowej ortofotomapy o wymiarach piksela  $20 \times 20$  cm, a współrzędna  $Z$  – z DEM o wymiarach regularnej siatki  $2 \times 2$  m. Do wykonania procesu korekcji geometrycznej użyto oprogramowania PCI OrthoEngine Satellite Edition V 7.0 (zawiera ono wszystkie trzy wymienione metody korekcji). PCI OrthoEngine Satellite Edition V 7.0 umożliwia również odczyt różnych formatów danych satelitarnych, ustalanie współrzędnych obrazowych punktów kontrolnych GCP, tworzenie modeli geometrycznych, tworzenie ortobrazów oraz zarówno automatyczne, jak i manualne mozaikowanie.

## Wyniki i analizy

W tabeli 2 zamieszczono błędy średnie kwadratowe ( $RMS$ ) i maksymalne odchyłki obliczone trzema różnymi metodami. W przypadku zwykłej i ilorazowej metody wielomianowej zastosowano wielomian drugiego stopnia. Jak widać w tabeli nr 2, metoda wielomianowa ilorazowa wykazała najmniejsze odchyłki (błędy szcztątkowe). Jednak ocena dokładności tylko na podstawie odchyłek na punktach GCP jest niewłaściwa i tendencyjna, ponieważ obie metody wielomianowe korygują obraz lokalnie (na GCP).

Metoda korekcji	RMS (m)		Odchyłki maksymalne (m)	
	X	Y	X	Y
Wielomianowa zwykła	1,0	3,2	2,4	6,2
Wielomianowa ilorazowa	0,5	0,7	1,1	1,4
Model precyzyjny	0,8	1,1	1,9	2,8

Tabela 2. Porównanie odchyłek dla 30 GCP po korekcji metodą: wielomianową zwykłą, wielomianową ilorazową i precyzyjną

W trakcie pozyskiwania jednego z GCP popełniono błąd grubo, który wynosił około 20 m wzdłuż osi Y. Oczywiście żadna z metod wielomianowych nie była w stanie wykryć tego błędnego punktu. Tabela 3 zawiera  $RMS$  i odchyłki na błędnie wskazanym punkcie. Odchyłka Y na błędnie wskazanym punkcie według modelu ścisłego była 4 razy większa niż  $RMS$  i została wykryta wraz z wartością błędu i jego kierunkiem.

Metoda korekcji	RMS (m)		Punkt obarczony błędem grubym (m)	
	X	Y	X	Y
Wielomianowa zwykła	1,2	3,9	2,2	6,7
Wielomianowa ilorazowa	0,6	1,3	0,3	1,4
Model precyzyjny	1,1	3,0	2,2	11,8

Tabela 3. Porównanie błędów i odchyłek na 30 GCP wraz z punktem obarczonym błędem grubym po korekcji metodą: wielomianową zwykłą, wielomianową ilorazową i precyzyjną

Obiektywną ocenę dokładności transformacji należy przeprowadzić na podstawie zbioru niezależnych punktów kontrolnych (*Independent Check Points – ICP*), nie wykorzystywanych do obliczeń parametrów modelu. W konsekwencji 23 z 30 GCP zostały zamienione na *ICP* w kolejnej kontroli.

Dla zwykłej metody wielomianowej zastosowano drugi stopień wielomianu, a dla metody ilorazowej – stopień pierwszy ze względu na ograniczoną liczbę GCP. Tabela 4 przedstawia  $RMS$  i błędy maksymalne dla zbioru 23 punktów kontrolnych (*ICP*) w przypadku zastosowania trzech różnych metod. Błędy są mniejsze dla metody precyzyjnej niż dla obu metod wielomianowych i zbliżone do odchyłek z tabel 2 i 3. Pokazuje to, że opracowany model precyzyjny (rygorystyczny) jest zarówno

Metoda korekcji	RMS (m)		Odchyłki maksymalne (m)	
	X	Y	X	Y
Wielomianowa zwykła	1,7	4,1	4,1	7,5
Wielomianowa ilorazowa	2,2	5,2	5,1	10,4
Model precyzyjny	1,3	1,3	3,0	3,0

Tabela 4. Porównanie wartości błędów przy 23 punktach *ICP* i 7 punktach GCP dla zwykłej metody wielomianowej, ilorazowej metody wielomianowej oraz modelu precyzyjnego

stabilny, jak i odporny na błędy grube. Analiza wyliczonych z tego modelu parametrów obrazowania, takich jak np. kąty nachylenia osi skanera w chwili rejestracji, potwierdziła przyjęte podstawowe założenia i wartości przybliżone tych parametrów uzyskane na podstawie metadanych.

Ostateczna ocena dokładności została wykonana na podstawie ilościowego i jakościowego porównania ortoobrazu wygenerowanego za pomocą modelu precyzyjnego oraz DEM w stosunku do ortofoto wykonanego na podstawie zdjęć lotniczych o wielkości piksela 0,2 m w mierze terenowej. Potwierdza ona wyniki uzyskane uprzednio na podstawie *ICP*, że błąd nie jest większy niż 4 do 5 metrów. Oznacza to w konsekwencji, że dokładność uzyskana z modelu precyzyjnego mieści się w granicach dokładności oferowanej przez produkt *IKONOS Precision*.

## Wnioski

Produkt *IKONOS Geo* charakteryzuje się dokładnością, która jest stosunkowo niska i odbiega od jakości treści jego obrazu oraz dokładności map wielkoskalowych. Wygenerowanie produktów precyzyjnych może okazać się trudne w przypadku niektórych krajów, a jeśli nawet się uda, to pociągnie za sobą wysokie koszty. W rezultacie jedną z poważnych przeszkód w skutecznym i właściwym wykorzystaniu produktów *IKONOS-a* jest niemożność przetwarzania i wykonywania ortoobrazów przez użytkownika we własnym zakresie.

Obecnie użytkownicy mogą zastosować model precyzyjny (jeden z nich jest dostępny w oprogramowaniu komercyjnym) do korekcji „taniego” produktu *IKONOS Geo*. Użytkownik, jeżeli tylko dysponuje dokładnymi danymi terenowymi, może wytwarzać poprawny ortoobraz, który będzie tak dokładny, jak drogi produkt *IKONOS Precision*. Technologia ta mogłaby zatem promować pozyskiwanie i zastosowanie (wykorzystywanie) tego nowego źródła danych do licznych zastosowań. Nadal prowadzi się badania w *CCRS* na podstawie innych obrazów *IKONOS-a* dla obszarów o różnej topografii (głównie tereny o dużych deniwelacjach) i różnych zastosowań (kartografia, leśnictwo, rolnictwo itd.). Najnowsze wyniki dla obszarów górzystych są obiecujące w przypadku kartografii małoskalowej.

Dr **Thierry Toutin** jest głównym specjalistą w Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario, Kanada.

Dr **Philip Cheng** jest starszym specjalistą w PCI Enterprises, Richmond Hill, Ontario, Kanada.

\*Przyp. tłum.: Metoda nazywana przez autorów „ilorazową metodą wielomianową” jest opisywana jako iloraz dwu wielomianów realizujący przekształcenie współrzędnych punktów terenowych XYZ do współrzędnych obrazowych x, y. W przypadku pierwszego stopnia tych wielomianów wzory transformujące stają się znanymi w fotogrametrii wzorami przekształcenia rzutowego przestrzeni na płaszczyznę.

Tłumaczenie z jęz. angielskiego dr inż. **Marek Mróz** (Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji Wydziału Geodezji i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego), weryfikacja lingwistyczna mgr **Aleksandra Poprawska**.

Artykuł został przetłumaczony bez zmian i skrótów z wersji anglojęzycznej opublikowanej w „Earth Observation Magazine” (Vol. 9, No. 7, pp. 17-21, July 2000) pod tytułem *Demystification of IKONOS!* autorstwa dr. T. Toutin i dr. Ph. Cheng.

Canada Centre for Remote Sensing (*CCRS*) zezwoliło na przetłumaczenie tego artykułu przez dr. Marka Mroza jako materiału powstałego na podstawie publikacji objętej prawem autorskim. *CCRS* zachowuje wszystkie prawa autorskie. *CCRS* nie zatwierdza tłumaczenia i nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek błędy lub błędne interpretacje występujące w tym tłumaczeniu oryginalnego tekstu angielskiego.