

## ROSYJSKIE DANE SATELITARNE WOBEC WSPÓŁCZESNYCH SYSTEMÓW KOMERCYJNYCH

### RUSSIAN SATELLITE DATA VS. CONTEMPORARY COMMERCIAL SYSTEMS

Ireneusz Ewiak

Instytut Geodezji i Kartografii

SŁOWA KLUCZOWE: fotogrametria satelitarna, obrazy stereoskopowe, systemy wysoko-  
rozdzielcze, analiza dokładnościowa, analiza ekonomiczna

STRESZCZENIE: W artykule zaprezentowano analizy porównawcze wyników badań, przeprowadzonych w Zakładzie Fotogrametrii Instytutu Geodezji i Kartografii w ramach realizacji projektów badawczych finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2004-2007, których integralnym celem było dokonanie przeglądu współczesnego rynku danych satelitarnych oraz określenie zakresu ich wykorzystania w procesie generowania podstawowych produktów fotogrametrycznych. W obszarze zainteresowania badań znalazły się rosyjskie oraz europejskie i amerykańskie satelitarne systemy komercyjne. W niniejszym artykule zamieszczono porównania techniczno-ekonomiczne procesów fotogrametrycznego przetwarzania danych stereoskopowych TK-350 oraz SPOT 4 w zakresie korekcji geometrycznej, generowania numerycznego modelu terenu oraz generowania ortoobrazów w skali 1:25000 i skalach mniejszych. Przytoczone w artykule analizy uwzględniające czynniki determinujące dokładność procesu ortorektyfikacji scen źródłowych potwierdzają, iż na korzyść dokładności ortoobrazów TK-350 przemawiają mniejsze błędy ich korekcji geometrycznej oraz mniejszy kąt wychylenia sensora obrazującego. W artykule zamieszczono również wyniki analizy porównawczej wysokorozdzielczych systemów satelitarnych Resurs-DK oraz Ikonos-2 obejmującej aspekty techniczne oraz ekonomiczne towarzyszące procesowi generowania cyfrowych ortoobrazów w skali 1:10000. Uwzględniając wszystkie czynniki porównawcze stwierdzono, iż wyższe koszty pozyskania, zbliżone wyniki oraz czasochłonność opracowania fotogrametrycznego scen Ikonos w stosunku do scen Resurs-DK przemawiają za koniecznością zainteresowania się nowymi rosyjskimi obrazami satelitarnymi oraz, że w miarę rozwoju systemu Resurs-DK zobrazowania te będą wyznacznikiem nowych standardów opracowań fotogrametrycznych.

## 1. ANALIZA TECHNICZNA OPRACOWAŃ SPOT-4 ORAZ TK-350

### 1.1. Zakres analizy porównawczej

Opracowania fotogrametryczne TK-350 oraz SPOT 4 bazują na danych źródłowych o jednakowej rozdzielczości przestrzennej. Ponieważ technologia opracowania obrazów SPOT 4 różni się zasadniczo od technologii opracowania danych TK-350 należy spodziewać się różnych rezultatów tych opracowań. Porównanie tych rezultatów ma na celu utwierdzenie potencjalnego użytkownika stereoskopowych danych satelitarnych w słuszności poszukiwania alternatywnych rozwiązań w zakresie pozyskiwania produktów

fotogrametrycznych. Rezultaty opracowania fotogrametrycznego danych stereoskopowych SPOT 4 zaczerpnięte zostały z rozprawy doktorskiej autora „Metodyka generowania numerycznego modelu terenu na podstawie danych SPOT P Stereo dla opracowań ortofotomap cyfrowych w skalach średnich”.

Porównania techniczno-ekonomiczne procesów fotogrametrycznego przetwarzania danych stereoskopowych TK-350 oraz SPOT 4 w zakresie korekcji geometrycznej, generowania numerycznego modelu terenu oraz generowania ortoobrazów w skali 1:25000 dotyczy dwóch obszarów testowych. W każdym obszarze wydzielone zostały 4 podobszary charakteryzujące tereny płaskie, pofałdowane, pagórkowate oraz górzyste.

Scena stereoskopowa TK-350 o stosunku bazowym B/H = 0.52 pokrywała obszar o powierzchni 2500 km<sup>2</sup>, położony w południowo wschodniej Polsce z centrum w rejonie Rzeszowa, charakteryzujący się rozpiętością wysokości terenowych od 150 m do 600 m.

Obszar pokrycia sceny stereoskopowej SPOT o stosunku bazowym B/H = 0.84 zajmował powierzchnię 3600 km<sup>2</sup> i rozciągał się od Kielc na zachodzie po Opatów na wschodzie oraz południowych granic Skarżyska-Kamiennej na północy po Chmielnik na południu. Obszar ten charakteryzował się średnią wysokością 300 m oraz maksymalnymi deniwelacjami 500 m.

## 1.2. Korekcja geometryczna scen stereoskopowych TK-350 oraz SPOT-4

W procesie korekcji geometrycznej sceny stereoskopowej TK-350 optymalny rezultat opisany błędem średnim wyznaczenia współrzędnych 18 punktów kontrolnych na poziomie  $m_x = m_y = 3.6$  m,  $m_z = 3.9$  m uzyskuje się przy pomiarze 12 fotopunktów. Przy podobnej konfiguracji punktów osnowy fotogrametrycznej scenę stereoskopową SPOT 4 można zorientować przestrzennie z dokładnością  $m_x = 5.1$  m,  $m_y = 2.9$  m oraz  $m_z = 4.7$  m. Wyniki korekcji geometrycznej sceny stereoskopowej SPOT 4, przy założeniu pomiaru takiej samej ilości fotopunktów, są zatem gorsze od wyników uzyskanych dla zobrazowań TK-350. Przyczyn tego należy upatrywać w słabej jakości radiometrycznej obrazów źródłowych SPOT 4. Dla uzyskania porównywalnych rezultatów korekcji geometrycznej sceny stereoskopowej SPOT 4 należy pomierzyć przynajmniej 24 fotopunkty.

Radiometria obrazów cyfrowych wpływa bezpośrednio na dokładność pomiaru i identyfikacji punktów osnowy fotogrametrycznej, które decydują o dokładności korekcji geometrycznej tych obrazów. Obrazy SPOT 4 przy entropii równej 8 reprezentowane były zaledwie 132 poziomami szarości. W procesie skanowania negatywów TK-350 relacje pomiędzy gęstościami optycznymi zdjęcia a wartościami DN obrazu cyfrowego odtworzone były na około 240 stopniach szarości w 8 bitowej skali radiometrycznej.

W celu zwiększenia dokładności opracowania danych SPOT 4 orientację zewnętrzną obrazów należy wykonywać w podblokach scen uzyskując wynik na poziomie  $m_x = 4.4$  m,  $m_y = 3.3$  m oraz  $m_z = 3.4$  m. Jednakże, tego rodzaju metodyka ze względu na konieczność pomiaru znacznie większej ilości punktów osnowy fotogrametrycznej nie ma uzasadnienia ekonomicznego.

### 1.3. Pomiar automatyczny punktów siatki numerycznego modelu terenu (NMT)

Korelacyjne pomiary wysokości NMT wykonane na obrazach stereoskopowych TK-350 bez udziału narzędzi filtracji, charakteryzują błędy średnie wyznaczenia wysokości punktu, które wynoszą :

- $m_H = 4.7$  m dla terenów płaskich i pofałdowanych;
- $m_H = 8.3$  m dla terenów pagórkowatych i górzystych.

Przy zastosowaniu właściwej metodyki pomiaru oraz filtracji zbioru punktów wysokościowych można znacząco poprawić wyniki uzyskując:

- dla terenów płaskich i pofałdowanych  $m_H = 3.2$  m;
- dla terenów pagórkowatych i górzystych  $m_H = 3.9$  m.

Dokładność pomiarów korelacyjnych na obrazach SPOT 4 w oparciu o metodykę uwzględniającą radiometrię zobrażeń, precyzję wyznaczenia RPC, optymalizację parametrów algorytmu pomiarowego oraz optymalizację parametrów rekonstrukcji terenu kształtuje się na poziomie 2.6 m dla terenów płaskich oraz 4.7 m dla terenów pagórkowatych i górzystych. Zastosowanie odpowiednich algorytmów filtracji pozwala uzyskać wyniki wynoszące odpowiednio 1.8 m oraz 3.9 m.

Uzyskane pierwotne wyniki pomiarów (bez filtracji) przemawiają za wykorzystaniem do pomiarów NMT zobrażeń SPOT 4, zwłaszcza dla terenów płaskich i pofałdowanych. Jest to uzasadnione lepszym stosunkiem bazowym zobrażeń stereoskopowych SPOT 4. Jednakże w standardzie pomiarów korelacyjnych NMT, realizowanych na obrazach TK-350, stosowane są specjalistyczne narzędzia i metody filtracji, które pozwalają uzyskać wynik zbliżony do uzyskanego przy korelacji obrazów SPOT 4.

Zarówno zbiór punktów siatki NMT pomierzony na podstawie danych stereoskopowych TK-350, jak również zbiór punktów siatki NMT pomierzony na podstawie danych stereoskopowych SPOT 4 mogą być materiałem źródłowym do generowania warstw na mapie topograficznej w skali 1:25000. Zatem, o wyborze systemu obrazowania stereoskopowego dla pomiarów punktów NMT powinny decydować w tym przypadku względy ekonomiczne.

### 1.4. Generowanie ortoobrazów

Wynik ortorektyfikacji źródłowych scen TK-350 oraz SPOT 4 jest determinowany dokładnością ich korekcji geometrycznej, dokładnością pomiaru NMT oraz kątem wychylenia od nadiru sensora obrazującego. Biorąc pod uwagę wymienione czynniki należy stwierdzić, iż na korzyść ortoobrazów TK-350 przemawiają mniejsze błędy ich korekcji geometrycznej oraz mniejszy kąt wychylenia sensora obrazującego.

Wielkość kąta wychylenia od nadiru sensora obrazującego TK-350 przy pozyskiwaniu obrazowania stereoskopowego z pokryciem 60% wynosi 14.6°, podczas gdy, obrazowanie pary stereoskopowej SPOT o takim samym pokryciu wymaga wychylenia sensora o kąt 23°. Przy tych wartościach kątów wychylenia sensorów obrazujących do wygenerowania ortoobrazów TK-350 spełniających kryterium dokładności mapy topograficznej w skali 1:25000 (dokładność położenia 0.2 mm w skali mapy) wystarczy zbiór punktów NMT wygenerowany na podstawie pary stereoskopowej obrazów źródłowych TK-350. Do wygenerowania ortoobrazów SPOT 4 w skali 1:25000 źródłem numerycznego modelu

terenu nie może być jednak pomiar korelacyjny przeprowadzony na obrazach stereoskopowych tego systemu satelitarnego.

## **2. ASPEKT EKONOMICZNY ANALIZY PORÓWNAWCZEJ OPRACOWAŃ STEREOSKOPOWYCH DANYCH SPOT-4 ORAZ TK-350**

Analiza kosztów generowania ortoobrazów na podstawie obrazów źródłowych TK-350 oraz SPOT 4 obejmuje koszty pozyskania scen, pomiaru współrzędnych punktów osnowy fotogrametrycznej oraz generowania numerycznego modelu terenu.

Koszty pozyskania panchromatycznej stereoskopowej sceny testowej (GSD =10 m) pokrywającej w zależności od wybranego systemu obrazowania obszar o znacznie różniącej się powierzchni wynosi 340€ dla sceny TK-350 oraz 2400€ dla sceny SPOT 4. Zatem koszt pozyskania zobrazowania SPOT 4 odpowiadającego w terenie powierzchni 1km<sup>2</sup> jest o 0.53€ większy od kosztu pozyskania analogicznego zobrazowania TK-350. W celu uzyskania dokładności korekcji geometrycznej scen testowych na poziomie zabezpieczającym spełnienie kryterium dokładności mapy topograficznej w skali 1:25000 dla sceny stereoskopowej SPOT 4 należy pomierzyć 2-krotnie większą liczbę fotopunktów, a tym samym ponieść 2-krotnie większy koszt ich pomiaru. Przy koszcie terenowego pomiaru punktu osnowy fotogrametrycznej wynoszącym 30€ względy ekonomiczne przemawiają wyraźnie na korzyść opracowania sceny TK-350.

Koszty pozyskania NMT, w siatce o oczku 30 m, w oparciu o technikę pomiaru korelacyjnego stereoskopowych obrazów cyfrowych odniesiony do 1km<sup>2</sup> powierzchni jest o 0.5€ większy dla systemu TK-350, przy czym dokładność tego modelu jest zdecydowanie wyższa.

Względy techniczno-ekonomiczne przemawiają na korzyść systemu obrazowania TK-350. Obrazy TK-350 stanowią bowiem doskonały materiał źródłowy do generowania ortofotomap oraz map warstwicznych w skali 1:25000, których koszt wytworzenia jest mniejszy w stosunku do opracowania danych SPOT 4.

## **3. ANALIZA PORÓWNAWCZA OPRACOWANIA DANYCH IKONOS-2 ORAZ RESURS-DK**

Analiza dotyczy aspektów technicznych oraz ekonomicznych towarzyszących procesowi generowania cyfrowych ortoobrazów w skali 1:10000. Przedmiotem analizy były ortoobrazy wygenerowane na podstawie testowych scen źródłowych, a w szczególności:

- sceny panchromatycznej Ikonos-2 pokrywającej obszar północno-zachodniej części aglomeracji Warszawy o powierzchni 121 km<sup>2</sup>;
- sceny panchromatycznej Resurs-DK pokrywającej obszar centrum Warszawy oraz przyległych dzielnic o powierzchni 144 km<sup>2</sup>;
- sceny panchromatycznej Resurs-DK pokrywającej obszar północno-zachodniej części aglomeracji Krakowa o powierzchni 100 km<sup>2</sup>.

Analiza procesu ortorektifikacji sceny Ikonos-2 wykonana była w Instytucie Geodezji i Kartografii w ramach zadań statutowych oraz ekspertyzy technicznej wykonanej na zlecenie firmy Techmex S.A. oraz została opublikowana w artykule „Potencjał wysokorozdzielczych zobrazowań Ikonos oraz QuickBird dla generowania ortoobrazów”.

W procesie korekcji geometrycznej analizowanych scen we wszystkich wariantach metodycznych uzyskuje się nieco lepsze rezultaty dla panchromatycznej sceny Ikonos-2. Wynikiem tego jest większa precyzja wyznaczenia współczynników RPC dostarczanych przez dystrybutora tych danych oraz wysoka wewnętrzna spójność pikseli w matrycy obrazowej Ikonos-2. Jednakże, poza wariantem bazującym na wykorzystaniu katalogowych współczynników wielomianu pozostałe pozwalają uzyskać rezultat korekcji geometrycznej sceny Resurs-DK zapewniający spełnienie kryterium dokładności dla ortobrazów w skali 1:10000.

Analizując możliwe konfiguracje punktów osnowy fotogrametrycznej na scenach testowych w funkcji wymaganych rezultatów korekcji geometrycznej należy stwierdzić, że koszty pomiarów terenowych dla obu systemów obrazowania kształtują się na tym samym poziomie.

Dokładność ortobrazów wygenerowanych na podstawie najlepszych rezultatów korekcji geometrycznej obrazu źródłowego Ikonos-2 jest nieco większa niż w przypadku ortobrazów Resurs-DK. Jest to wynik bezpośredniego przełożenia rezultatów korekcji geometrycznej oraz poprawnego wyeliminowania wpływu deniwelacji terenu.

Ze względu na niewielkie kąty wychylenia sensorów obrazujących porównywanych systemów satelitarnych do korekcji wpływu deniwelacji terenu na położenie pikseli na ortobrazach Resurs-DK oraz Ikonos-2 wystarczy numeryczny model terenu o podobnym standardzie dokładnościowym ( $m_H < 4.0$  m). Źródłem takiego modelu dla obu typów zobrazowań jest skalibrowany zbiór punktów wysokościowych SRTM, który dla potencjalnych jego użytkowników dostępny jest nieodpłatnie.

Uzasadnieniem stosowania konkretnego typu zobrazowania może, zatem być jedynie koszt pozyskania sceny źródłowej.

Koszt pozyskania programowanej sceny Resurs-DK odpowiadającej powierzchni  $1\text{ km}^2$  kształtuje się na poziomie 9.5€ dla wersji panchromatycznej oraz 13.6€ dla wersji pan-sharpened. Koszty pozyskania scen archiwalnych Resurs-DK zmniejszają się odpowiednio do kwot 8€ oraz 11€. Koszt pozyskania  $1\text{ km}^2$  sceny panchromatycznej Ikonos-2 wynosi 18€, podczas gdy, sceny pan-sharpened już 24€. Zdecydowanie wyższe koszty pozyskania, zbliżone wyniki oraz czasochłonność opracowania fotogrametrycznego scen Ikonos-2 w stosunku do scen Resurs-DK przemawiają za koniecznością zainteresowania się nowymi rosyjskimi obrazami satelitarnymi. W miarę rozwoju systemu Resurs-DK zobrazowania te będą wyznacznikiem nowych standardów opracowań fotogrametrycznych.

#### 4. WNIOSKI

Panchromatyczne obrazy TK-350 o rozdzielczości przestrzennej 10 m można skorygować geometrycznie z dokładnością  $1/3$  piksela obrazu źródłowego. Zakres tej korekcji jest funkcją przyjętego modelu projekcji oraz dokładności wyznaczenia elementów orientacji zewnętrznej zobrazowania satelitarnego na orbicie.

Wykorzystując algorytmy korelacji obrazów cyfrowych TK-350 oraz algorytmy automatycznej korekcji pomiarów wysokościowych można wygenerować NMT z dokładnością  $m_H = 3.2$  m dla terenów równinnych oraz  $m_H = 3.9$  m dla terenów pagórkowatych i górzystych.

Korelacyjne pomiary wysokościowe punktów siatki NMT przeprowadzone na obrazach stereoskopowych TK-350 stanowią doskonały materiał źródłowy do generowania warstw na mapach topograficznych w skalach od 1:25 000 oraz skalach mniejszych. Wysoka dokładność NMT wygenerowanego na podstawie obrazów stereoskopowych TK-350 oraz zasięg jego opracowania sprawiają, że produkt ten może być wykorzystywany w procesie ortorektyfikacji zdjęć lotniczych i wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych. Obrazy stereoskopowe TK-350 w zakresie pozyskiwania danych wysokościowych są mocno konkurencyjne dla obrazów stereoskopowych SPOT 4.

Wysokorozdzielcze sceny satelitarne Resurs-DK stanowią doskonały materiał źródłowy do generowania ortoobrazów w skali 1: 10000. Transformację pikseli obrazów źródłowych Resurs-DK oraz Ikonos-2 do układu współrzędnych terenowych można wykonać z dokładnością  $\frac{1}{2}$  piksela. W procesie ortorektyfikacji scen pomiarowych Resurs-DK oraz Ikonos-2 należy uwzględnić wpływ deniwelacji terenu, poprzez włączenie do tego procesu zbioru punktów siatki NMT, których dokładność wysokościowa nie powinna być gorsza niż 4.0 m. Na podstawie zobrażeń nadirowych Resurs-DK oraz Ikonos-2 można wygenerować ortoobrazy, których dokładność geometryczna odpowiada dokładności mapy topograficznej w skalach 1:5000, 1:10000 oraz skalach mniejszych. Jakkolwiek dla tego przedziału skalowego ortoobrazów spełnione jest kryterium dokładności geometrycznej, to ich zdolność interpretacyjna dotyczy jedynie skali 1:10 000. Biorąc pod uwagę aspekt ekonomiczny należy stwierdzić, iż wysokorozdzielcze sceny satelitarne Resurs-DK stanowią konkurencyjny w stosunku do scen Ikonos-2 materiał źródłowy dla generowania podstawowych produktów fotogrametrycznych.

## 5. LITERATURA

- Ewiak I., 2007. Metodyka generowania numerycznego modelu terenu na podstawie rosyjskich stereoskopowych zobrażeń TK-350. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 16, s.177-186
- Ewiak I., 2006. Potencjał wysokorozdzielczych zobrażeń Ikonos oraz QuickBird dla generowania ortoobrazów. *Systemy Logistyczne Wojsk*, Zeszyt 32, WAT Warszawa, s. 141-154.
- Ewiak I., Kaczyński R., 2005, Określenie zakresu korekcji geometrycznej zobrażeń Ikonos oraz QuickBird, *Prace IGiK*, t. LI, z. 109, s. 67-75.
- Ewiak I., 2004, Metodyka generowania Numerycznego Modelu Terenu na podstawie danych SPOT-P Stereo dla opracowań ortofotomap cyfrowych w skalach średnich. *Praca doktorska*.
- Ewiak I., Kaczyński R., 2004, Dokładność automatycznego generowania NMT na podstawie danych HRS SPOT 5 oraz HRG SPOT 4. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 14, s. 195-204.
- Kaczyński R., Ewiak I., 2006. Wysokorozdzielcze zobrażenia satelitarne a zdjęcia lotnicze. *Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH - Geodezja*, Tom 12, zeszyt 2/1, s. 257-265
- Karwel A., Ewiak I., 2006. Ocena przydatności danych wysokościowych z misji SRTM do generowania NMT na obszarze Polski. *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii*, tom LII, zeszyt 110, s. 75-87.

## **RUSSIAN SATELLITE DATA VS. CONTEMPORARY COMMERCIAL SYSTEMS**

**KEY WORDS:** satellite photogrammetry, stereoscopic images, very high resolution systems, accuracy analysis, economic analysis

**SUMMARY:** The present paper describes the results of comparative analyses performed at the Photogrammetry Department of the Institute of Geodesy and Cartography within of the implementation of research projects funded by the Ministry of Science and Higher Education in years 2004-2007. The studies were primarily destined to review the present market for satellite data, and the qualification of the range of their utilisation in the process of generating basic photogrammetric products. The study focused on Russian, European and American commercial satellite systems. In the present paper, the technical and economical comparisons were published, relating to the processes of photogrammetric processing of TK-350 and SPOT 4 stereoscopic satellite data in the range of geometrical correction, digital elevation model and orthoimages generating in 1:25000 scales and smaller. The analyses presented in the paper, taking into account factors determining the accuracy of the orthorectification process, confirm that the advantage of the accuracy of TK-350 orthoimages results from smaller errors of their geometrical correction and smaller inclination angle of the image sensor. The results of a comparative analysis relating to the very high resolution satellite systems, like Resurs-DK and Ikonos-2, contained technical and economical aspects of the orthoimage generation in 1:10000 scale, are also presented herein. Taking into account all comparative factors, it was proven that higher acquisition cost, similar results and time-consuming photogrammetric elaboration of Ikonos scenes, as compared to Resurs-DK scenes, speak for the interest in new Russian satellite data which will determine new standards in satellite photogrammetry.

Dr inż. Ireneusz Ewiak  
e-mail: rene@igik.edu.pl  
telefon: 022 3291985  
fax: 022 3291950