

OCENA DOKŁADNOŚCI MODELU SRTM NA OBSZARZE POLSKI

ESTIMATION OF THE ACCURACY OF THE SRTM TERRAIN MODEL IN POLAND

Artur Karol Karwel, Ireneusz Ewiak

Zakład Fotogrametrii, Instytut Geodezji i Kartografii w Warszawie

SŁOWA KLUCZOWE: interferometria radarowa, numeryczny model terenu, analiza dokładności.

STRESZCZENIE: Treść artykułu dotyczy oceny dokładności modelu rzeźby terenu pozyskanego dla obszaru Polski z Radarowej Misji Topograficznej Promu Kosmicznego SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Ocenę dokładności przeprowadzono na podstawie precyzyjnych danych referencyjnych, którymi były profile terenowe pomierzone techniką GPS. Zakres badań obejmował swym zasięgiem obszary testowe, reprezentujące różne formy ukształtowania terenu, położone w granicach administracyjnych 14 województw. Obszary testowe położone były na obszarach odkrytych i nie obejmowały terenów zurbanizowanych oraz kompleksów leśnych. Miarą oceny dokładności modelu SRTM były błędy średnie liczone na podstawie różnic wysokości pomiędzy punktami profili terenowych oraz odpowiadającymi im wyinterpolowanymi punktami modelu SRTM. Niezbędne analizy przeprowadzono w środowisku oprogramowania MGE (Modular GIS Environment) firmy Intergraph oraz za pomocą narzędzi 3 DEM Terrain Visualization autorstwa Richarda Horne. Stwierdzono, że dokładność bezwzględna modelu SRTM na obszarze Polski wynosi $m_H = 2.9$ m dla terenów równinnych oraz $m_H = 5.4$ m dla terenów falistych i pagórkowatych. Stwierdzono również, że dokładność interferometrycznego pomiaru wysokości punktów węzłowych siatki modelu SRTM degradowana jest w procesie interpolacji wysokości punktów poza węzłowych, zaś stopień tej degradacji jest funkcją deniwelacji rzeźby terenu oraz gęstości oczka siatki. Ocena statystyczna dokładności pomiaru SRTM wykazała, że pomiary interferometryczne obciążone są składową systematyczną błędem. Po wyeliminowaniu błędów systematycznych okazało się, że dokładność bezwzględna modelu SRTM na obszarze Polski kształtuje się na poziomie $m_H = 1.0$ m dla terenów równinnych oraz $m_H = 2.7$ m dla terenów falistych i pagórkowatych.

1. WPROWADZENIE

Zakończona 6 lat temu 11 dniowa misja promu kosmicznego Endauer, określona jako Radarowa Misja Topograficzna SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), dotyczyła interferometrycznego odtworzenia rzeźby terenu całej powierzchni Ziemi. Dane pozyskane przy współpracy NASA (National Aeronautics and Space Administration) i JPL (Jet Propulsion Laboratory) oraz Niemieckiego Centrum Kosmicznego DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) i Włoskiej Agencji Kosmicznej ASI (Italian Space Agency) obejmowały swym zasięgiem blisko 80 % powierzchni lądów między 60° szerokości geograficznej północnej, a 56° szerokości geograficznej południowej.

Założeniem misji było uzyskanie modelu rzeźby terenu w regularnej siatce o oczku 3''×3'' (około 60×90 m), dla którego bezwzględny błąd średni wysokości, z prawdopodobieństwem 90 %, nie przekracza 16 m. Po kalibracji systemu pomiarowego błąd ten dla obszaru Eurazji wyniósł 6.2 m (Rodrigues *et al.*, 2006). Wobec publikowanych wyników badań dokładności modelu SRTM, autorzy niniejszego opracowania, dysponując obszerną bazą danych referencyjnych w postaci profili terenowych, postanowili określić wielkość tego błędu na obszarze Polski.

2. CHARAKTERYSTYKA DANYCH SRTM

W misji SRTM do rejestracji pozycji przestrzennej punktów przy różnych warunkach atmosferycznych została zastosowana technika pomiaru interferometrycznego. Wykorzystanie tej techniki do pomiaru wysokości punktów położonych na powierzchni terenu wymaga filtracji danych źródłowych. Wynika to z faktu, że interferometryczny pomiar modelu rzeźby terenu zakłócają obiekty przestrzenne. Każda odbita od nich wiązka elektromagnetyczna wyznacza punkt pomiarowy, którego współrzędne rejestrowane są w zbiorze danych SRTM.

Dane źródłowe SRTM pozyskane były interferometrem SAR (Synthetic Aperture Radar) wyposażonym w antenę główną, 60 m maszt radarowy i antenę zewnętrzną. Antena główna wysyłała i odbierała dwie wiązki fal elektromagnetycznych w kierunku Ziemi o długości 5.6 cm (pasmo C) obrazującej pas powierzchni o szerokości 225 km oraz 3 cm (pasmo X) obrazującej pas powierzchni o szerokości 50 km. Funkcja anteny zewnętrznej sprowadzała się do rejestracji tych samych fal, odbitych od powierzchni terenu. Na podstawie znajomości odległości między dwoma antenami (długość bazy) oraz różnic faz pomiędzy dwoma sygnałami anteny obliczane były wysokości punktów na powierzchni terenu. Pozyskane, tym sposobem, informacje pozwoliły na wygenerowanie numerycznego modelu rzeźby terenu dla pasma X oraz dla pasma C.

Dane SRTM DTED-1 wykorzystane w badaniach stanowiły zbiór punktów modelu pokrycia rzeźby terenu, pozyskany techniką interferometrycznego pomiaru w paśmie C, w segmentach o wymiarach 1° na 1°. Na obszarze Polski zarejestrowano 96 segmentów, z których każdy opisany był macierzą o wymiarach 1201 wierszy na 1201 kolumn i zapisany w formacie binarnym HGT. Układem odniesienia przestrzennego dla danych SRTM jest układ WGS-84, którego elipsoida jest modyfikacją geoidy EGM 96 (Earth Gravitation Model).

3. ZAKRES OPRACOWANIA

Celem badań było określenie bezwzględnej dokładności modelu SRTM na obszarze Polski. Zakres badań obejmował obszary testowe, reprezentujące różne formy ukształtowania terenu, położone w granicach administracyjnych 14 województw (tabela 1). Ze względu na właściwości interferometrycznego pomiaru wysokości z analizy wyłączono tereny zurbanizowane oraz kompleksy leśne. Z powodu braku danych referencyjnych z pomiaru wyłączono również tereny wysokogórskie. Na pozostałych obszarach Polski bazę precyzyjnych danych referencyjnych stanowiły profile terenowe pomierzone techniką

GPS z wykorzystaniem metody kinematycznej pomiaru pozycji. Dokładność wyznaczenia położenia dowolnego punktu profilu wyniosła 5 cm w planimetrii oraz 10 cm w wysokości. Do analizy wykorzystano 322 profile o łącznej liczbie 29 308 punktów, przy czym średnia długość profilu wynosiła 2 km.

Miarą oceny dokładności modelu SRTM były błędy średnie różnic wysokości pomiędzy punktami poszczególnych profili oraz odpowiadającymi im wyinterpolowanymi punktami modelu SRMT. Analizy dokładności wykonano w środowisku oprogramowania MGE (Modular GIS Environment) oraz modułów programu 3 DEM Terrain Visualization autorstwa Richarda Horne, który służył również do konwersji plików HGT na pliki USGS.

4. ANALIZA WYNIKÓW

Wyniki zestawione w tabeli 1 dotyczą analizy dokładności modelu SRTM na obszarach o nachyleniu terenu poniżej 2°. Dla obszarów tych maksymalną wartość błędu średniego pomiaru modelu SRTM uzyskano na obszarze województwa świętokrzyskiego $m_H = 4.7$ m, minimalną zaś, dla województwa podlaskiego $m_H = 2.9$ m.

Tabela 1. Charakterystyka dokładności modelu SRTM dla terenów o nachyleniu do 2°

Województwo	Błąd średni pomiaru [m]	Odchylenie standardowe [m]	Średnia różnica wysokości [m]	Liczba profili	Liczba punktów w profilu
mazowieckie	4.3	0.9	4.2	45	4345
łódzkie	4.2	1.2	4.0	19	1685
wielkopolskie	3.7	1.0	3.6	19	1790
podlaskie	2.9	1.1	2.7	28	2753
warmińsko-mazurskie	3.5	1.5	3.3	25	2594
kujawsko-pomorskie	4.1	1.2	4.0	22	1959
zachodniopomorskie	3.7	1.4	3.6	18	1585
lubuskie	3.3	1.3	3.1	3	288
pomorskie	4.0	1.5	3.7	22	1862
śląskie	3.6	1.3	3.3	7	586
małopolskie	3.4	1.7	3.1	3	211
świętokrzyskie	4.7	1.3	4.5	16	1267
lubelskie	3.9	1.2	3.7	26	2226
podkarpackie	3.8	1.3	3.5	11	900

Maksymalną wartość błędu średniego pomiaru punktu modelu SRTM, na terenach o nachyleniu od 2° do 6°, uzyskano w granicach województwa małopolskiego $m_H = 5.4$ m, minimalną zaś, dla województwa podlaskiego $m_H = 3.5$ m. Parametry oceny statystycznej dla tego modelu zestawiono w tabeli 2. Porównując wyniki z obu tabel należy stwierdzić, że błąd średni pomiaru modelu SRTM jest funkcją liniową kąta nachylenia terenu. Wartości odchyłeń standardowych obliczone dla poszczególnych województw świadczą o wysokiej powtarzalności wyników oraz wysokiej wiarygodności przeprowadzonych analiz. Model SRTM odstaje od powierzchni terenu średnio o 3.7 m. Rozkład badanych różnic wysokości wzdłuż poszczególnych profili terenowych pokazuje charakter tego odstawania.

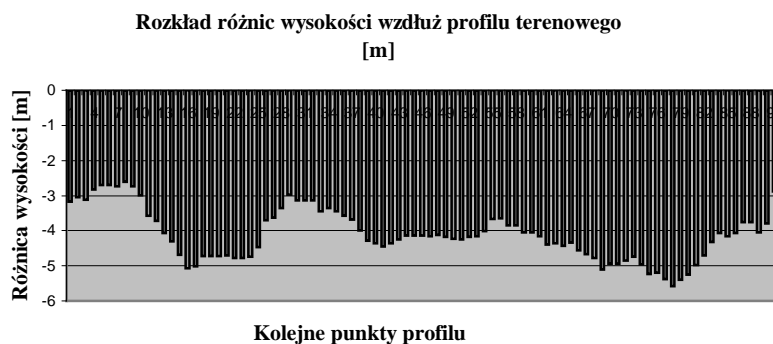
W ujęciu statystycznym oceny dokładności pomiaru SRTM zmienną losową stanowiły różnice wysokości homologicznych par punktów należących do profili terenowych oraz interpolowanego zbioru punktów modelu SRTM.

Tabela 2. Dokładność modelu SRTM dla terenów o nachyleniu od 2° do 6°

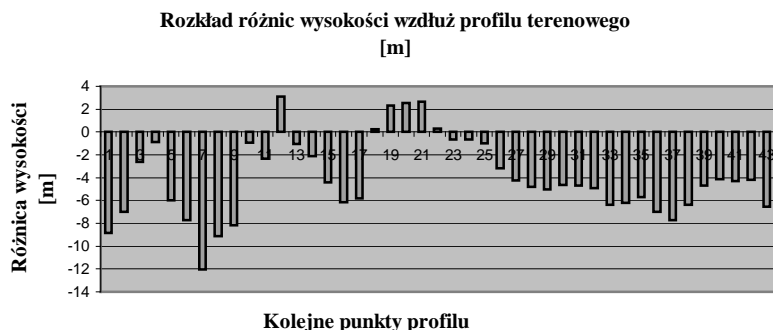
Województwo	Błąd średni pomiaru [m]	Odchylenie standardowe [m]	Średnia różnica wysokości [m]	Liczba profili	Liczba punktów w profilu
wielkopolskie	4.8	2.4	4.1	1	79
podlaskie	3.6	1.3	3.3	6	585
warmińsko-mazurskie	3.7	2.6	3.1	17	1678
kujawsko-pomorskie	4.5	2.1	4.0	3	270
zachodniopomorskie	3.6	2.2	3.2	2	137
pomorskie	4.1	1.9	3.7	5	391
śląskie	3.9	3.3	3.0	1	74
małopolskie	5.4	2.9	5.0	3	242
świętokrzyskie	4.6	2.8	4.0	2	165
lubelskie	4.0	1.1	3.8	10	909
podkarpackie	5.3	3.5	4.5	8	727

Najliczniejszą próbę losową stanowił zbiór zmiennych losowych dla województwa mazowieckiego, dla którego wartość odchylenia standardowego wynosiła $\sigma_H = 0.9$ m. Najmniej liczną próbę losową odnotowano dla województw lubuskiego i małopolskiego, dla których odchylenia standardowe wynosiły odpowiednio $\sigma_H = 1.3$ m oraz $\sigma_H = 1.7$ m.

Analizując rozkłady zmiennych losowych dla poszczególnych województw stwierdzono występowanie błędu systematycznego interferometrycznego pomiaru SRTM na poziomie 3.8 m. Wartość tego błędu wyznaczono w oparciu o parametry statystyczne na poziomie ufności 95 %. Wpływ błędu systematycznego na wynik pomiaru modelu SRTM pokazano na przykładzie województwa podlaskiego (rys. 1) oraz województwa małopolskiego (rys. 2).



Rys. 1. Różnice wysokości punktów profilu terenowego oraz punktów wyinterpolowanych z modelu SRTM na obszarze województwa podlaskiego



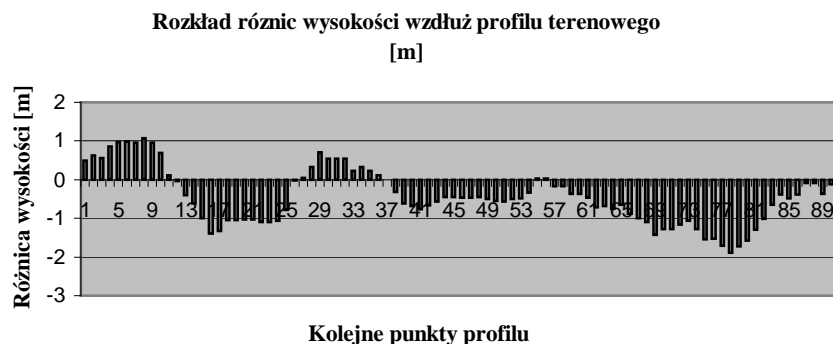
Rys. 2. Różnice wysokości punktów profilu terenowego i punktów wyinterpolowanych z modelu SRTM dla województwa małopolskiego

Wykryty w analizach błąd systematyczny jest wynikiem niedokalibrowania systemu pomiarowego SRTM. Na obszarze objętym badaniami, punkty wysokościowe modelu SRTM znajdowały się poniżej rzeczywistej powierzchni terenu. W tabeli 3 prezentowane są wyniki analizy dokładności modelu SRTM po uwzględnieniu składowej systematycznej błęd.

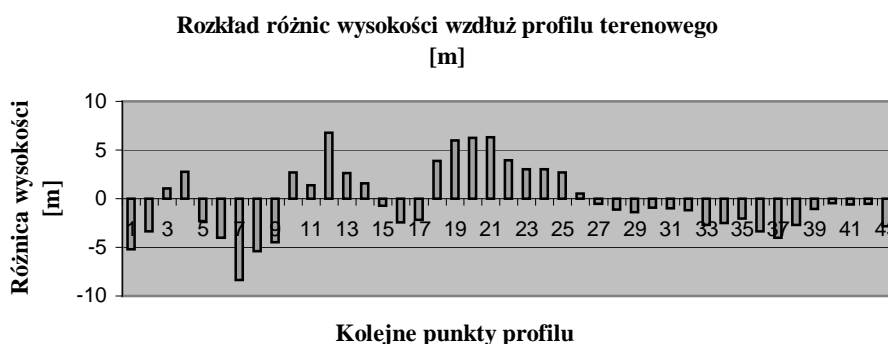
Tabela 3. Zestawienie wartości błędów średnich pomiaru SRTM w funkcji kąta nachylenia terenu po wyeliminowaniu błędu systematycznego

Województwo	Błąd średni pomiaru SRTM przy nachyleniu terenu [m]	
	do 2°	od 2° do 6°
mazowieckie	0.83	brak danych
łódzkie	0.86	brak danych
wielkopolskie	0.66	2.44
podlaskie	1.08	1.66
warmińsko-mazurskie	0.79	2.28
kujawsko-pomorskie	0.66	1.83
zachodniopomorskie	0.96	2.48
lubuskie	1.41	brak danych
pomorskie	1.21	2.51
śląskie	1.35	3.73
małopolskie	1.14	3.35
świętokrzyskie	1.24	3.46
lubelskie	1.59	2.43
podkarpackie	1.05	3.43

Po uwzględnieniu systematyki, błąd średni pomiaru modelu SRTM wyniósł $m_H = 1.0$ m dla terenów równinnych oraz $m_H = 2.7$ m dla terenów pagórkowatych. Rozkłady różnic wysokości prezentowane na rysunkach 3 i 4 mają charakter przypadkowy i są zbliżone do rozkładu krzywej błędów Gaussa.



Rys. 3. Różnice wysokości punktów profilu terenowego i punktów wyinterpolowanych z modelu SRTM, dla województwa podlaskiego po uwzględnieniu błędu systematycznego



Rys. 4. Różnice wysokości punktów profilu terenowego i punktów wyinterpolowanych z modelu SRTM, dla województwa małopolskiego po uwzględnieniu błędu systematycznego

5. WNIOSKI

Pomiary interferometryczne numerycznego modelu rzeźby terenu wykonane w ramach misji SRTM stanowią cenny materiał fotogrametryczny. Ze względu na właściwości wiązki radarowej pomiary interferometryczne rzeźby terenu wymagają filtracji zbioru punktów zarejestrowanych nad jego powierzchnią.

Błąd średni pomiaru modelu SRTM jest funkcją kąta nachylenia terenu i wzrasta wraz ze wzrostem wartości tego kąta. Dokładność interferometrycznego pomiaru wysokości punktów węzłowych siatki numerycznego modelu terenu degradowana jest w procesie

interpolacji wysokości, zaś stopień tej degradacji jest funkcją rzeźby terenu oraz gęstości oczka siatki.

Pomiary modelu SRTM obarczone są błędem systematycznym, którego wartość należy wyznaczyć na podstawie wysokiej próby statystycznej pomiarów kontrolnych. Źródłem błędu systematycznego pomiaru SRTM była niedokładna kalibracja interferometrycznego systemu pomiarowego w stosunku do charakteru ukształtowania terenu. Dokładność modelu SRTM na obszarze Polski po uwzględnieniu grubych błędów oraz systematyki pomiaru interferometrycznego kształtuje się na poziomie 1.0 m dla terenów równinnych oraz 2.7 m dla terenów falistych i pagórkowatych.

Dane wysokościowe SRTM, uzupełnione pomiarem charakterystycznych form rzeźby terenu, stanowią doskonały materiał źródłowy do generowania warstwic na mapach topograficznych w skali 1:50 000 oraz skalach mniejszych, a także mogą być wykorzystane do generowania ortoobrazów z wysokorozdzielczych danych satelitarnych.

Uzyskane wyniki badań mogą posłużyć do kalibracji interferometrycznego systemu pomiarowego misji SRTM na obszarze Polski.

6. LITERATURA

- Bęcek K., 2006. W 10 dni dookoła świata. *Geodeta*, nr 5, s. 22-25.
- Ewiak I., Kaczyński R., 2004. Accuracy of DTM generated from SPOT 4 and SPOT 5 HRS data. *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, XX ISPRS Congress, XXXV, B1, Com. I, s. 474-478.
- Ewiak I., Kaczyński R., 2005a. Correction of Ikonos and QuickBird data for orthophotomaps generation. The 26th Asian Conference on Remote Sensing, Hanoi, Vietnam.
- Jacobsen K., 2006. SRTM HEIGHT MODELS. *GEOconnexion International Magazine*, August, s. 20-21.
- Kaczyński R., 2000. Technologia opracowania NMT i map cyfrowych metodami fotogrametrycznymi dla celów prognozowania powodzi. *Geodeta*, Nr 4 (59), s. 27-31.
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2005. Ocena przydatności zdjęć satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości (VHRS) do tworzenia bazy danych topograficznych. *Przegląd Geodezyjny*, nr 5, s. 3-10.
- Paszotta Z., Szumiło M., 2005. Application of statistical test of hypothesis to check DTM's accuracy. Seminar about „Automated Checking of DTMs”, Aalborg, Denmark.
- Rodrigues E., Morris C. S., Belz J. E., 2006. A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, s. 261-267.
- SRTM, 2006. <http://srtm.usgs.gov/>
- SRTM, 2006. <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

ESTIMATION OF THE ACCURACY OF THE SRTM TERRAIN MODEL IN POLAND

KEY WORDS: interferometry, SRTM, Digital Elevation Model, accuracy, analysis

Summary

The mission of the Endeavour spacecraft well known as SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) six years ended ago. The obtainment of a radar data in just eleven days was the aim of mission. Based on this data, a DEM for over 80 percent of the surface of the Earth has been generated. The SRTM for all potential users is available free. For Poland, this data is accessible on level DTED-1 in HGT format with a resolution of 60 by 90 meters .

The acquisition of DEM with a CE (90) accuracy better then 16 meters was the crowning achievement of the program of the SRTM mission. The accuracy of the SRTM terrain model of Eurasia after calibration of the measuring system was $CE(90) = 6.2$ m.

The results of the research work presented in foreign publications refer to reference data which were not representative for the tested areas. In order to determine the absolute accuracy of SRMT model of Poland, a study was performed based on the reference terrain profiles measured by GPS techniques. The flat and hilly terrains were examined in administrative borders of fourteen provinces. It was not reference data for mountainous terrains.

For elaboration of the SRTM data on ImageStation Intergraph software, they have been recalculated in the USGS format using modules of the 3 DEM Terrain Visualization program written by Richard Horne. For analysis of the accuracy of the SRTM model, 332 terrain profiles and 29 308 points have been measured. The accuracy of the SRTM model presented by RMSE was computed on the basis of the height differences between the profiles and model homolog points. The analyses were done in Modular GIS Environment Intergraph software.

The absolute accuracy of the SRTM model for Poland was $RMSE-Z = 2.9$ m for flat regions and $RMSE-Z = 5.4$ m for hilly regions. It was confirmed that this accuracy depends on the resolution of the grid points of DEM and terrain inclination. The statistical analysis showed a systematic shift between SRTM data and reference profiles. The RMSE-Z without a systematic part was found to be 1.0 m for flat regions and 2.7 m for hilly regions of Poland. The data of SRTM level DTED-1 could be used for DEM and contour line generation on topographic maps on scales smaller then 1:50 000 and for SRTM system calibration.

Mgr inż. Karol Artur Karwel
e-mail: karwel@igik.edu.pl
tel. +22 3291985

Dr inż. Ireneusz Ewiak
e-mail: rene@igik.edu.pl
tel. +22 3291985