

## OCENA DOKŁADNOŚCI MODELU SRTM-X NA OBSZARZE POLSKI

### ESTIMATION OF ACCURACY OF SRTM-X TERRAIN MODEL ON POLISH AREA

Artur Karol Karwel

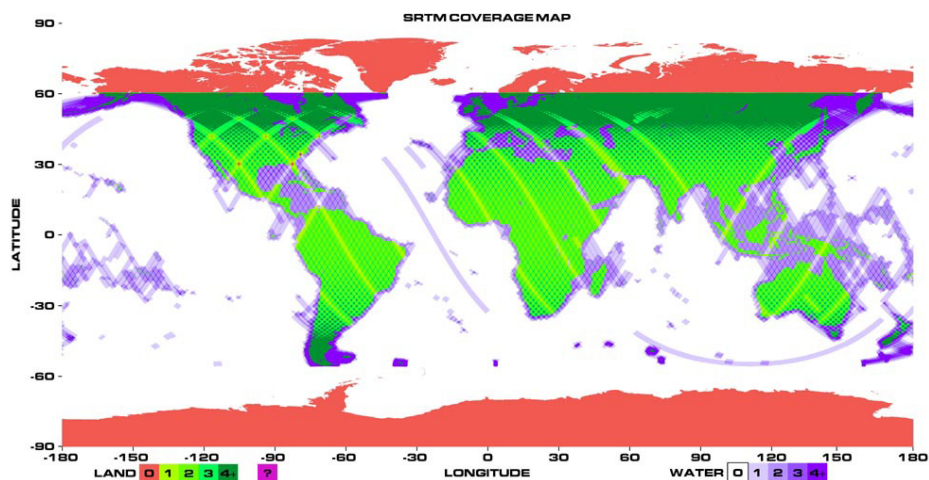
Zakład Fotogrametrii, Instytut Geodezji i Kartografii w Warszawie

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

STRESZCZENIE: Celem niniejszego referatu jest ocena dokładności Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu dla obszaru Polski pozyskanego z Radarowej Misji Topograficznej Promu Kosmicznego SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) w paśmie spektralnym X. 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 SCOP++ firmy Inpho. Stwierdzono, że dokładność bezwzględna modelu SRTM na obszarze Polski wynosi  $m_H = 3.6$  m dla terenów równinnych oraz  $m_H = 4.1$  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 poza błędami grubymi błędem systematycznym. Po wyeliminowaniu tych błędów okazało się, że dokładność bezwzględna modelu SRTM na obszarze Polski kształtuje się na poziomie  $m_H = 1.8$  m dla terenów falistych i pagórkowatych oraz  $m_H = 1.0$  m dla terenów równinnych.

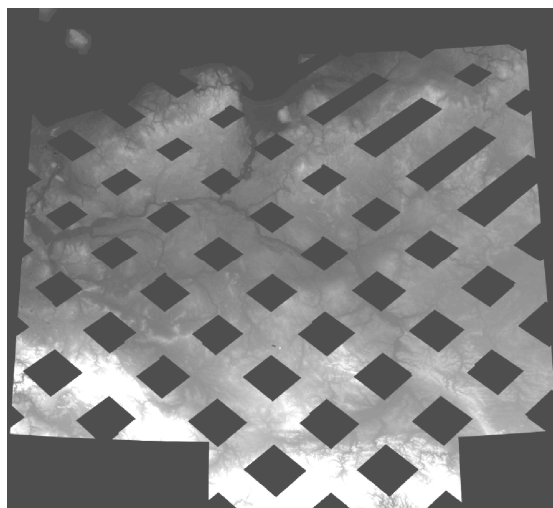
## 1. WPROWADZENIE

Zakończona 11 lat temu 11 dniowa misja promu kosmicznego Endauer (Bęcek, 2006), 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 (rys. 1).



Rys. 1. Zasięg pokrycia powierzchni Ziemi modelem SRTM (źródło NASA)

Założeniem misji było uzyskanie dwóch modeli rzeźby terenu w regularnej siatce o oczku  $3'' \times 3''$  (około  $60 \times 90$  m) oraz  $1'' \times 1''$  (około  $30 \times 30$  m), dla których 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). Zgodnie z polityką NASA ogólnie dostępnymi danymi wysokościowymi do tej pory były wyłącznie dane pozyskane w paśmie C. Po 11 latach od dnia wystrzelenia na orbitę promu kosmicznego Endauer Niemieckie Centrum Kosmiczne DLR udostępniło wszystkim użytkownikom Numeryczny Model Pokrycia Terenu pozyskanego w paśmie X. Wobec wolnego dostępu do modelu SRTM-X, autor niniejszego opracowania, dysponując obszerną bazą danych referencyjnych w postaci profili terenowych, postanowili określić wielkość błędu tego modelu na obszarze Polski (rys. 2).

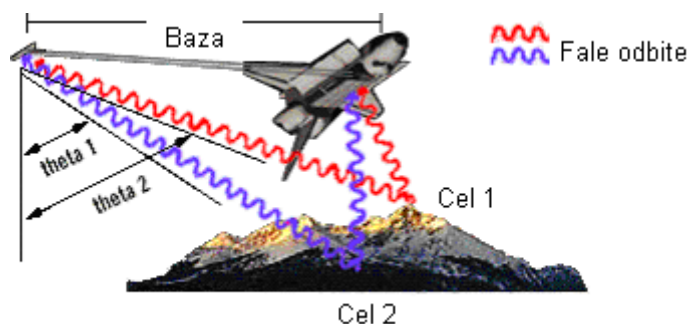


Rys. 2. Model SRTM – obszar Polski

## 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 (rys. 3). Pozyskane tym sposobem informacje, pozwoliły na wygenerowanie numerycznego modelu rzeźby terenu dla pasma X oraz dla pasma C. Ze względu na wąski pas zobrazowania pow. Ziemi w paśmie X model SRTM-X posiada tak zwane dziury, czyli miejsca, w których nie została pozyskana informacja wysokościowa (rys. 2).



Rys. 3. Interferometryczny pomiar różnicy wysokości

Dane SRTM-X wykorzystane w badaniach stanowiły zbiór punktów modelu pokrycia rzeźby terenu, pozyskane techniką interferometrycznego pomiaru w paśmie X, w segmentach o wymiarach  $15' \times 15'$  (arc-minute), z oczkiem siatki  $25 \times 25$  m. Na obszarze Polski zarejestrowano 1536 segmentów, z których każdy zapisany był w formacie rastrowym DTED. Układem odniesienia przestrzennego danych SRTM-X jest układ Geograficzny, dla których mierzone są wysokości normalne względem geoidy EGM96 (Earth Gravitation Model).

## 3. ZAKRES OPRACOWANIA

Celem badań było określenie bezwzględnej dokładności modelu SRTM-X na obszarze Polski. Zakres badań obejmował obszary testowe, reprezentujące różne formy ukształtowa-

nia terenu, położone w granicach administracyjnych 14 województw (tabela 1). Ze względu na właściwości interferometrycznego pomiaru wysokości z analizy wyłączono tereny zurbanizowane oraz kompleksy leśne. W związku z tym, iż Instytut Geodezji i Kartografii nie posiada w swojej bazie danych referencyjnych profili położonych na terenach wysokogórskich, obszary te wyłączone zostały z opracowania. 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 211 profili o łącznej liczbie 19 323 punktów, przy czym średnia długość profilu wynosiła 2 km.

Miarą oceny dokładności modelu SRTM (Ewiak *et al.*, 2004; Kaczyński, 2000; Paszotta *et al.*, 2005) były błędy średnie różnic wysokości pomiędzy punktami poszczególnych profili oraz odpowiadającymi im wyinterpolowanymi punktami modelu SRMT. Analizy dokładności wykonano w środowisku oprogramowania SCOP++ firmy Inpho. Do wyznaczenia wysokości punktów profili terenowych na powierzchni Ziemi użyto modułu oprogramowania Trans-Pol autorstwa Romana Kadaja.

#### 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-X uzyskano na obszarze województwa łódzkiego  $m_H = 4.5$  m i lubuskiego  $m_H = 4.1$  m, minimalną zaś, dla województwa małopolskiego  $m_H = 2.4$  m.

Tab. 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	3.5	2.5	2.9	28	3718
łódzkie	4.5	2.5	3.9	17	1522
wielkopolskie	4.0	2.2	3.4	14	1289
podlaskie	3.9	3.6	2.7	21	2480
warmińsko-mazurskie	3.9	3.2	3.2	21	1766
kujawsko-pomorskie	3.6	2.4	3.1	16	1573
zachodniopomorskie	3.2	2.8	2.6	14	1257
lubuskie	4.1	2.9	3.5	3	288
pomorskie	2.8	2.4	2.3	19	1705
śląskie	4.0	3.4	3.4	3	258
małopolskie	2.4	2.4	1.9	2	158
świętokrzyskie	3.3	3.1	2.6	10	779
lubelskie	3.7	3.3	2.8	24	2017
podkarpackie	2.6	2.5	2.1	5	394

Maksymalną wartość błędu średniego pomiaru punktu modelu SRTM, na terenach o nachyleniu od 2° do 6°, uzyskano w granicach województwa podkarpackiego  $m_H = 7.7$  m, minimalną zaś, dla województwa kujawsko-pomorskiego  $m_H = 2.3$  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.

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.

Tab. 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	5.3	3.9	4.6	1	79
podlaskie	3.3	2.5	2.7	3	262
warmińsko-mazurskie	3.3	2.7	2.7	9	954
kujawsko-pomorskie	2.3	2.1	1.8	2	186
zachodniopomorskie	3.4	1.6	3.2	1	65
pomorskie	2.7	2.5	2.1	5	391
małopolskie	2.6	2.6	2.0	3	242
świętokrzyskie	2.6	2.2	2.0	1	71
lubelskie	3.2	2.8	2.6	5	370
podkarpackie	7.7	4.4	6.6	5	459
lubuskie	3.9	1.9	3.5	1	90

Najliczniejszą próbę stanowił zbiór zmiennych losowych dla województwa mazowieckiego, dla którego wartość odchylenia standardowego wynosiła  $\sigma_H = 2.5$  m. Najmniej liczną próbę losową odnotowano dla województw zachodniopomorskiego i świętokrzyskiego, dla których odchylenia standardowe wynosiły odpowiednio  $\sigma_H = 1.6$  m oraz  $\sigma_H = 2.2$  m.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że dokładność bezwzględna modelu SRTM na obszarze Polski wynosi  $m_H = 3.6$  m dla terenów równinnych oraz  $m_H = 4.1$  m dla terenów falistych i pagórkowatych.

Badając rozkłady zmiennych losowych dla poszczególnych województw stwierdzono występowanie globalnego błędu modelu (obejmującego cały badany obszar) na poziomie 2.4 m. Wartość tego błędu wyznaczono w oparciu o parametry statystyczne na poziomie ufności 95%. Analiza statystyczna dokładności modelu SRTM-X wykazała, że największy wpływ na wielkość tego błędu mają błędy grube oraz składowa liniowa błędów systematycznego. Źródłem tych błędów jest niedostateczna kalibracja systemu pomiarowego w relacji do skanowanej powierzchni. Po wyeliminowaniu tych błędów dokładność bezwzględna modelu SRTM na obszarze Polski kształtuje się na poziomie  $m_H = 1.8$  m dla terenów falistych i pagórkowatych oraz  $m_H = 1.0$  m dla terenów równinnych.

## 5. WNIOSKI

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 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.

Dokładność modelu SRTM-X na obszarze Polski po uwzględnieniu błędów grubych oraz systematyki pomiaru interferometrycznego kształtuje się na poziomie 1.0 m dla terenów równinnych oraz 1.8 m dla terenów falistych i pagórkowatych.

Dane wysokościowe SRTM pasma X o gęstości oczka siatki  $25 \times 25$  m stanowią doskonały materiał źródłowy do generowania warstwic na mapach topograficznych w skali 1:50 000 i 1:25 000. Mogą być również wykorzystane do generowania ortobrazów z pikselem 0.5 m dla terenów płaskich ze zdjęć lotniczych i satelitarnych oraz z pikselem 1.0 m dla obu typów terenów z wysokorozdzielczych zobrazowań satelitarnych z kątem inklinacją sensora mniejszym od  $5^\circ$ .

## 6. LITERATURA

Bęcek K., 2006. W 10 dni dookoła świata. *Geodeta*, Nr 5, s. 22–25.

Rodrigues E., Morris C. S., Belz J. E., 2006. A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, s. 261–267.

Kaczyński R., 2000. Technologia opracowania NMT i map cyfrowych metodami fotogrametrycznymi dla celów prognozowania powodzi. *Geodeta*, Nr 4 (59), s. 27–31.

Ewiak I., Kaczyński R., 2004. Accuracy of DTM generated from SPOT 4 and SPOT 5 HRS data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XX ISPRS Congress, XXXV, B1, Comm. I, pp. 474–478.

Paszotta Z., Szumiło M., 2005. Application of statistical test of hypothesis to check DTM's accuracy. *Seminar about „automated Checking of DTMs“*, Aalborg, Denmark.

<http://srtm.usgs.gov/>

<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

<http://dlr.de>

### ESTIMATION OF ACCURACY OF SRTM-X TERRAIN MODEL ON POLISH AREA

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

SUMMARY: The mission of Endeavour spacecraft well known as SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) eleven years ended ago. The obtainment the radar data set by only just eleven days was the aim of mission. Based on this data the DEM for over 80 percent of the surface of Earth has been generated. The SRTM for all potential users is available free. For Polish area this data are accessible on level DTED-2 in dt2 format with resolution 30 by 30 meters.

Acquisition of DEM with accuracy CE (90) better then 16 meters was the obtainment of the program of the SRTM mission. The accuracy of the SRTM terrain model on Eurasia area after calibration of the measuring system was CE (90) = 6.2 m.

In order to determine the absolute accuracy of SRTM model on Polish area the research work has been performed on the basis of reference terrain profiles measured by GPS technique.

The flat and hilly terrains were examined in administrative borders of fourteen provinces. It was not reference data for mountainous terrains.

For the analysis of accuracy of the SRTM model terrain have been measured. The accuracy of SRTM model presented by RMSE was computed on the basic of the height differences between profiles and models homolog points. The analyses have been done in SCOP++ Inpho software.

It was affirmed that absolute accuracy of SRTM-X elevation model on Polish area is 3.6 m for flat and 4.1 m for hilly region. It was affirmed too, that this accuracy is depend on finally grid interpolation process. Results of the process are function of terrain slopes and density of grid points. Statistic assessment of accuracy of SRTM model showed that source SRTM-X data includes gross errors as well as ingredient systematic linear error component (bias). This component is the result of insufficient calibration of the measuring system (interferometer) relation to scanned ground. After gross errors and bias elimination the absolute accuracy of SRTM-X model on Polish area increases to 1.0 m for flat and 1.8 m for hilly area.

Mgr inż. Karol Artur Karwel  
e-mail: karwel@igik.edu.pl  
telefon: 22 3291985  
fax: 22 3291950