PRACE INSTYTUTU GEODEZJI I KARTOGRAFII 2006, tom LII, zeszyt 110

ARTUR KAROL KARWEL Instytut Geodezji i Kartografii

IRENEUSZ EWIAK Instytut Geodezji i Kartografii

OCENA PRZYDATNOŚCI DANYCH WYSOKOŚCIOWYCH Z MISJII SRTM DO GENEROWANIA NMT NA OBSZARZE POLSKI

ZARYS TREŚCI: Artykuł dotyczy oceny dokładności modelu rzeźby terenu pozyskanego dla obszaru Polski z Radarowej Misji Topograficznej Promu Kosmicznego SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Ocena dokładności tego modelu bazowała na precyzyjnych danych referencyjnych, które stanowiły profile terenowe pomierzone techniką GPS. Badania dokładnościowe obejmowały swym zasięgiem obszary testowe, reprezentujące różne formy ukształtowania terenu, położone na obszarach odkrytych w granicach administracyjnych 14 województw. 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. Ocena statystyczna dokładności pomiaru SRTM wykazała, że pomiary interferometryczne obarczone są składową systematyczną blędu. Po wyeliminowaniu składowej systematycznej błedu okazało się, że dokładność bezwzględna modelu SRTM na obszarze Polski kształtuje się na poziomie $m_H = 1.0 \text{ m}$ dla terenów równinnych oraz $m_H = 2.7 \text{ m}$ 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 pomiaru modelu rzeźby terenu całej powierzchni Ziemi. Dane pozyskane przy współpracy NASA (National Areonautics and Space Administration), JPL (Jet Propulsion Laboratory), Niemieckiego Centrum Kosmicznego DLR (Deutsche Zentrum fur 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

Założeniem misji było uzyskanie modelu rzeźby terenu w regularnej siatce o oczku 3" x 3" (około 60 x 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 i in., 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 TECHNIKI POMIARU 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 (Mein Antena), maszt radarowy (Mast) i antenę zewnętrzną (Outboard Antenna). Antena główna składała się z dwóch paneli radarowych C-band i X-band. Wysyłała ona dwie wiązki fal elektromagnetycznych w kierunku Ziemi. Wiązka o długości 5.6 cm (pasmo C) obrazowała pas powierzchni o szerokości 225 km, zaś wiązka o długości 3 cm (pasmo X) – pas powierzchni o szerokości 50 km. Oba sygnały były zarówno transmitowane, jak i odbierane. Dodatkowo z anteną główną związana była awionika, czyli urządzenia pozwalające

wyznaczyć pozycję anteny oraz określić orbitę, po której poruszał się prom kosmiczny. Maszt radarowy stanowił odległość bazową pomiędzy anteną główną i anteną zewnętrzną. Odległość ta po rozwinięciu masztu w przestrzeni kosmicznej wyniosła 60 m.

Antena zewnętrzna umieszczona na końcu masztu zawierała dwa typy radaru panelowego: C-band i X-band. Sygnał z obu radarów był wyłącznie odbierany, bez możliwości transmisji. Antenę zewnętrzną wyposażono także w dwie anteny GPS (Global Positioning System) użyte w celu zbierania scisłej informacji o pozycji promu kosmicznego oraz specjalne diody LED (Light Emitting Diode), pozwalające określić rzeczywistą pozycję anteny zewnętrznej w stosunku do anteny głównej, a także w reflektor sześcienny (corner-cube reflector) umożliwiający pomiar długości masztu anteny z dokładnością 3 mm (rys. 2).

Pozycjonowanie przestrzenne instrumentu pomiarowego kontrolował system AODA (Altitude and Orbit Determination Avionics). W jego skład wchodziły następujące urządzenia pomiarowe:

- STA (Star Tracker Assembly), który posiadał wysokiej jakości kamerę i komputer pokładowy zawierający dane pokładowe i katalog gwiazd. Urządzenie to służyło do orientacji anteny zewnętrznej względem rzeczywistego położenia gwiazd oraz określało rzeczywisty ruch anteny.
- IRU (The Internal Reference Unit) służący do precyzyjnego pomiaru zmian położenia anteny.
- ATT (ASTROS Target Tracker) oraz OTA (Optical Target Assembly). Urządzenie ATA umieszczone było wewnątrz anteny głównej. Jego zadaniem było śledzenie pozycji trzech czerwonych diod (LED), nazwanych OTA (Optical Target Assembly), które ulokowane były w antenie zewnętrznej. Pomiar ten umożliwiał systemowi AODA określenie rzeczywistego położenia anteny zewnętrznej.
- EDM (Electronic Distance Meters), urządzenie stosowane z powodu ograniczeń dokładności pomiaru ATA, które dostarczało wyników elektronicznego pomiaru bazy (EDM) za pomocą instrumentu Leica-Wild DI2002 EDM.



Rys. 2. Schemat budowy anteny wahadłowca

Antena główna położona w luku załadunkowym promu kosmicznego wysyła w kierunku Ziemi wiązkę fal radarowych. Wiązka ta, rozproszona po odbiciu od powierzchni Ziemi, odbierana była przez antenę główną, która w tym przypadku pełniła funkcję anteny nadawczej i odbiorczej oraz antenę zewnętrzną położoną na końcu 60-metrowego masztu. Aby można było wyznaczyć wysokość dowolnego punktu na powierzchni Ziemi należało przeprowadzić interferometryczny pomiar różnicy faz pomiędzy dwoma sygnałami powracającymi od obiektu na końce bazy. Pomiaru różnicy faz dokonywano porównując fazy lub ich interferencję z dwóch końców bazy techniką complex cross correlation. Różnicę tych faz, nazwaną fazą interferometryczną (interferometric phase), można wyrazić następującym równaniem:

$$\Delta \Phi = B \sin(\theta)/\lambda$$

gdzie:

- B długość bazy,
- θ kąt zawarty pomiędzy kierunkiem linii pionu (wychodzącym od anteny
- zewnętrznej) a kierunkiem fali rozpraszanej w stronę anteny zewnętrznej, λ długość fali.

78



Rys. 3. Interferomatryczny pomiar różnicy wysokości

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 zbioru punktów wysokościowych rzeźby terenu dla pasma X oraz dla pasma C.

3. CHARAKTERYSTYKA DANYCH TESTOWYCH SRTM

Dane SRTM DTED-1 wykorzystane w badaniach stanowiły zbiór punktów modelu pokrycia terenu, pozyskany techniką interferometrycznego pomiaru w paśmie C, w segmentach o wymiarach 1⁰ na 1⁰. 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 był układ WGS-84, którego elipsoida jest modyfikacją geoidy EGM 96 (Earth Gravitation Model).

Pasmo C dystrybuowane jest przez agencję USGS (U.S. Geological Survey) jako ogólnodostępne dane wysokościowe SRTM DTED oraz jako dane SRTM DTED 2, których odpłatna dystrybucja pozostaje w zgodzie z polityką obrony i pod kontrolą Departamentu Obrony Stanów Zjednoczonych. W przypadku pasma X, jest ono dystrybuowane przez Niemieckie Centrum Kosmiczne, również za odpowiednią opłatą.

4. ZAKRES OPRACOWANIA

Celem badań było określenie bezwzględnej dokładności modelu SRTM na obszarze Polski (rys. 4). Zakres badań obejmował obszary testowe, reprezentujące różne formy terenowe, położone w granicach administracyjnych 14 województw. 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.

Do określonego województwa przypisana była grupa profili terenowych, z których każdy posłużył do wyznaczenia błędu średniego modelu SRTM. Na podstawie znajomości wartości tych błędów obliczono błąd średni modelu SRTM dla poszczególnych województw. Znając wartość błędu średniego modelu SRTM dla poszczególnych województw, wyznaczono jego średnią wartość na obszarze Polski.

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 Terain Visualization autorstwa Richarda Horne, który służył również do konwersji plików z formatu HGT do formatu USGS.



Rys. 4. Model SRTM obszaru Polski

5. ANALIZA WYNIKÓW

Wyniki zestawione w tabeli 1 dotyczą analizy dokładności modelu SRTM na obszarach o nachyleniu terenu poniżej 2°. Największą wartość błędu RMSE pomiaru modelu SRTM uzyskano na obszarze województwa świętokrzyskiego 4.7 m, najmniejszą zaś dla województwa podlaskiego – 2.9 m.

Województwo	RMSE [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

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

Największą wartość błędu RMSE pomiaru punktu modelu SRTM, na terenach o nachyleniu od 2° do 6°, uzyskano w granicach województwa małopolskiego – 5.4 m, najmniejszą zaś w województwie podlaskim – 3.5 m. Parametry oceny statystycznej dla tego modelu zestawiono w tabeli 2. Porównując wyniki z obu tabel, należy stwierdzić, że w procesie interpolacji wysokości punktów pozawęzłowych następuje degradacja dokładności modelu SRTM, zaś jej stopień jest funkcją deniwelacji terenu oraz gęstości oczka siatki.

Wartości odchyleń 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. Charakter tego odstawania przedstawia rozkład badanych różnic wysokości wzdłuż poszczególnych profili terenowych.

81

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.

Województwo	RMSE [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

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

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.

Analizujac rozkłady zmiennych losowych dla poszczególnych województw, występowanie składowej stwierdzono liniowej błedu systematycznego (stałego przesunięcia względem miejsca zera analizowanych różnic wysokości) modelu SRTM na poziomie 3.7 m. Wartość tego przesunięcia wyznaczono na podstawie parametrów statystycznych na poziomie ufności 95%. Wpływ składowej liniowej błędu systematycznego na wynik pomiaru modelu SRTM pokazano na przykładzie województwa podlaskiego (rys. 5) oraz województwa małopolskiego (rys. 6).

Wykryte w powyższych analizach przesunięcie jest wynikiem niedokalibrowania systemu pomiarowego SRTM lub celowego zafałszowania wyników pomiaru. 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 liniowej błędu przesunięcia.

82

Rozkład różnic wysokości wzdłuż profilu terenowego [m] # 7 10 13 15 19 21 24 23 14 24 27 41 25 25 49 24 25 25 14 24 27 70 73 75 74



Kolejne punkty profilu

Rys. 5. Różnice wysokości punktów profilu terenowego oraz punktów wyinterpolowanych z modelu SRTM na obszarze województwa podlaskiego



Rys. 6. Różnice wysokości punktów profilu terenowego i punktów wyinterpolowanych z modelu

SRTM dla województwa małopolskiego

Po uwzględnieniu składowej liniowej błędu systematycznego, wartości średniego błędu pomiaru modelu SRTM wyniosły $m_H = 1.0$ m dla terenów równinnych oraz $m_H = 2.7$ m dla terenów pagórkowatych. Rozkłady różnic wysokości prezentowane na rysunkach 7 i 8 mają charakter zbliżony do przypadkowego i wskazują na istnienie jeszcze składowej nieliniowej błędu systematycznego, której ze względu na brak dostatecznych informacji o samym systemie pomiarowym SRTM oraz niekorzystną konfigurację danych referencyjnych nie można wyznaczyć w sposób jednoznaczny.

Województwo	Błąd średni pomiaru SRTM przy nachyleniu terenu [m]			
	do 2º	od 2º do 6º		
Mazowieckie	0.8	(•)		
Łódzkie	0.9	(•)		
Wielkopolskie	0.7	2.4		
Podlaskie	1.1	1.7		
Warmińsko-mazurskie	0.8	2.3		
Kujawsko-pomorskie	0.7	1.8		
Zachodniopomorskie	0.9	2.5		
Lubuskie	1.4	(•)		
Pomorskie	1.2	2.5		
Śląskie	1.3	3.7		
Małopolskie	1.1	3.4		
Świętokrzyskie	1.2	3.5		
Lubelskie	1.6	2.4		
Podkarpackie	1.1	3.4		

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





Rys. 7. Różnice wysokości punktów profilu terenowego i punktów wyinterpolowanych z modelu SRTM dla województwa podlaskiego po uwzględnieniu błędu systematycznego



Rys. 8. Różnice wysokości punktów profilu terenowego i punktów wyinterpolowanych z modelu SRTM dla województwa małopolskiego po uwzględnieniu blędu systematycznego

6. 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 poza dokładnością pomiaru interferometrycznego jest funkcją modelu interpolacyjnego punktów leżących poza węzłami siatki pomiarowej NMT. Zatem 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 składowymi nieliniową i liniową błędu systematycznego, przy czym wartość tej drugiej można wyznaczyć na podstawie dużej próby statystycznej pomiarów kontrolnych. Głównym źródłem występowania składowej liniowej błędu systematycznego modelu SRTM była niedostateczna kalibracja interferometrycznego systemu pomiarowego w stosunku do skanowanego terenu. Dokładność modelu SRTM na obszarze Polski po uwzględnieniu błędów grubych oraz wspomnianej składowej błędu systematycznego 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 terenowych, stanowią doskonały materiał źródłowy do generowania warstwic na mapach topograficznych w skali 1:50 000 oraz w skalach mniejszych, mogą być także wykorzystane do generowania ortoobrazów z wysokorozdzielczych danych satelitarnych, takich jak SPOT 5, Ikonos czy QuickBird, pozyskanych przy odpowiednich wychyleniach od nadiru sensorów wspomnianych systemów. Dane z pomiarów SRTM mogą być z powodzeniem wykorzystywane w telekomunikacji oraz w zadaniach z zakresu planowania przestrzennego.

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

7. LITERATURA

- [1] Becek K., 2006. W 10 dni dookoła świata. Geodeta, nr 5, s. 22-25.
- [2] Ewiak I., Kaczyński R., 2005a. *Correction of Ikonos and QuickBird data for orthophotomaps generation*. The 26th Asian Conference on Remote Sensing, Hanoi, Vietnam.
- [3] 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, s. 474-478.
- [4] Jacobsen K., 2006. *SRTM HEIGHT MODELS*. GEOconnexion International Magazine, August, s. 20-21.
- [5] Kaczyński R., 2000. Technologia opracowania NMT i map cyfrowych metodami fotogrametrycznymi dla celów prognozowania powodzi. Geodeta, Nr.4(59), s. 27 31.
- [6] 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.
- [7] Paszotta Z., Szumiło M., 2005. *Application of statistical test of hypothesis to check DTM's accuracy*. Seminar about "automated Checking of DTMs", Aalborg, Denmark.
- [8] Rodrigues E., Morris C. S., Belz J. E., 2006. A Global Assessment of the SRTM Performance. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, s. 261 - 267. Remote Sensing, XX ISPRS Congress, XXXV, B1, Comm. I, s. 474 - 478.

ARTUR KAROL KARWEL Institute of Geodesy and Cartography

IRENEUSZ EWIAK Institute of Geodesy and Cartography

ASSESSMENT OF USEUFULNESS OF SRTM DATA FOR GENERATION OF DEM OF THE TERRITORY OF POLAND

Summary

Accuracy assessment of relief model acquired from the Shuttle Radar Topographic Mission for the territory of Poland is the subject of the article. Estimation of accuracy of this model was based on precise reference data terrain profiles measured with GPS technique. Accuracy investigations covered test fields representing various forms of relief, located on open areas within 14 voivodships. Due to character of interferometric height measurements urban and forest areas were not included into these studies. Mean errors determined on the basis of height differences between points of terrain profiles and corresponding interpolated points of SRTM model were the measure of accuracy assessment. Comparative analyses were carried out within Intergraph MGE Terrain Analyst software and with the use of 3 DEM Terrain Visualization software tools created by Richard Horne. It was found, that absolute accuracy of SRTM model on the territory of Poland is $m_{\rm H} = 2.9$ m for flat terrains and $m_{\rm H} = 5.4$ m for undulating/hilly areas. It was also found, that accuracy of interferometric measurement of heights of node points of SRTM model grid is mainly degraded in the process of interpolation of heights of points inside grid, and the degree of this degradation depends on height differences and on size of grid mesh. Estimation of accuracy of SRTM model conducted with the use of big statistical representation revealed, that interferometric measurements are influenced by line component of systematic error. It was found, that while removing this component real absolute accuracy of SRTM model on the territory of Poland reaches $m_{\rm H} = 1.0$ m for flat terrains and $m_{\rm H} = 2.7$ m for undulating/hilly areas.

Translation: Zbigniew Bochenek