



Numeryczne dane wysokościowe misji TanDEM-X

MAŁGORZATA WOROSZKIEWICZ

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,
Zakład Teledetekcji i Fotogrametrii,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, malgorzata.woroszkiewicz@gmail.com

Streszczenie. Zapoczątkowana w 2010 roku misja TanDEM-X (*TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement*) jest pierwszą satelitarną misją radarową, w ramach której zostały pozyskane dane interferometryczne w trybie *bistatic InSAR stripmap* przez dwa bliźniacze satelity TerraSAR-X (TSX) oraz TanDEM-X (TDX) tworzące formację *Helix*. Realizacja tej konfiguracji ma na celu budowę numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT) o zasięgu globalnym w standardzie HRTI-3 (*High Resolution Terrain Information*). W artykule przedstawiono opis i specyfikację podstawowych produktów misji, jakimi są m.in. numeryczne modele pokrycia terenu, a także dodatkowych komponentów w postaci warstw informacyjnych i masek. Opisane zostało również zastosowanie techniki interferometrii radarowej w procesie budowy numerycznego modelu pokrycia terenu w postaci cyfrowej.

Słowa kluczowe: misja TanDEM-X, misja SRTM, interferometria radarowa, numeryczny model pokrycia terenu

DOI: 10.5604/12345865.1145420

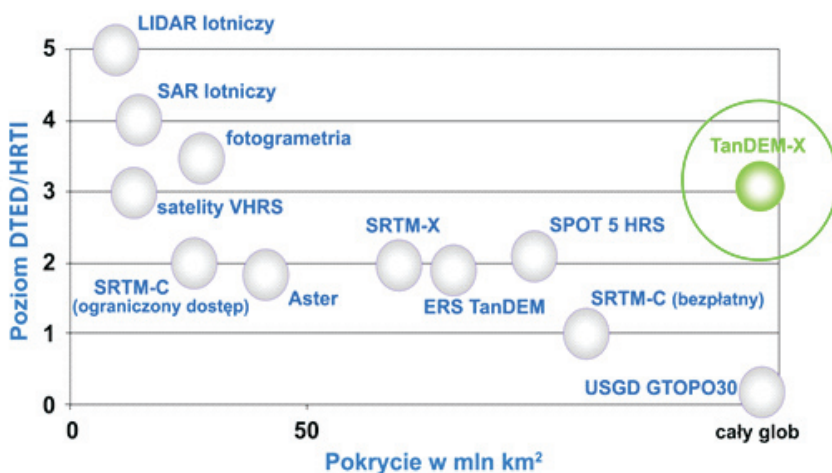
1. Wstęp

Numeryczne modele terenu stanowią podstawowy produkt do analiz przestrzennych związanych z ukształtowaniem rzeźby terenu, w tym analiz w zakresie wykrywania różnego typu zagrożeń i przeciwdziałania im. Dostęp do dokładnych i aktualnych informacji o ukształtowaniu rzeźby terenu jest niezbędny w wielu dziedzinach nauk o Ziemi, takich jak geologia, glaciologia czy oceanografia. Ze względu na coraz bardziej zaawansowane rozwiązania technologiczne w zakresie budowy urządzeń rejestrujących zarówno z pułapu lotniczego, jak i satelitarnego, wzrasta znaczenie metod fotogrametrycznych jako źródła danych do budowy numerycznych

modeli terenu. Przy generowaniu modelu istnieje możliwość integracji danych pozyskanych różnymi technikami pomiarowymi, jednak odmienne techniki akwizycji danych, różnice w momencie ich pozyskania oraz dokładności mogą być przyczyną niejednorodności wynikowego modelu.

Pierwszym przedsięwzięciem, którego celem było uzyskanie homogenicznego pod względem dokładności modelu o zasięgu globalnym, była radarowa misja topograficzna SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) wykorzystująca technikę interferometrii z jednej orbity (ang. *single-pass interferometry*), mająca miejsce w 2000 roku. Jedenastodniowa misja promu kosmicznego Endeavour pozwoliła na pokrycie ok. 80% obszaru globu ziemskiego pomiędzy 60° szerokości geograficznej północnej a 56° szerokości geograficznej południowej danymi w standardzie DTED-2 (*Digital Terrain Elevation Data-2*). Jednakże potrzeba zwiększenia dokładności oraz zasięgu danych wysokościowych, ciągły postęp w rozwoju budowy i funkcjonalności, a także liczby sensorów obrazujących wymusiły poszukiwanie nowych rozwiązań technologicznych mogących zapewnić zachowanie wymaganych kryteriów.

Misja TanDEM-X (*TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement*) realizowana jest przy współpracy Niemieckiej Agencji Kosmicznej (DLR) oraz firmy EADS Astrium GmbH i Infoterra GmbH na zasadzie partnerstwa publiczno-prywatnego. Od października 2010 roku satelita TerraSAR-X (TSX) wspólnie z satelitą TanDEM-X (TDX) pozyskują dane interferometryczne wykorzystywane do budowy numerycznego modelu pokrycia terenu o zasięgu globalnym w standardzie HRTI-3 (rys. 1). Proces pozyskiwania danych obszaru pomiędzy 90° szerokości geograficznej północnej a 90° szerokości geograficznej południowej zakończył się w kwietniu 2014 roku.



Rys. 1. Źródła danych wysokościowych [8]

Porównanie standardów numerycznych modeli terenu DTED-2 oraz HRTI-3 opracowanych przez NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*) przedstawiono w tabeli 1 (podane charakterystyki dokładnościowe wyrażone są błędami CE90 i LE90).

TABELA 1

Porównanie standardów numerycznych modeli wysokościowych: DTED-2 i HRTI-3 [3]

		DTED-2	HRTI-3
Rozdzielczość		30 × 30 m (na równiku)	12 × 12 m (na równiku)
Dokładność pionowa	bezwzględna (90%)	18 m	10 m
	względna (90%)	< 12 m ¹⁾ < 15 m ²⁾	< 2 m ¹⁾ < 4 m ²⁾
Dokładność pozioma	bezwzględna (90%)	23 m	10 m
	względna (90%)	15 m	3 m

¹⁾ dla terenu o nachyleniu ≤ 20°,

²⁾ dla terenu o nachyleniu > 20°.

Numeryczne modele SRTM oraz TanDEM-X posiadają strukturę regularnej siatki o rozmiarze oczka wynoszącym odpowiednio 3" × 3" (SRTM DTED-1, pasmo C), 1" × 1" (DTED-2, pasmo X), 0,4" × 0,4" (TanDEM-X DEM). Nominalna bezwzględna dokładność wysokościowa nieskorygowanych danych SRTM wynosi 16 m (LE90), natomiast danych TanDEM-X 10 m (LE90).

2. Interferometria satelitarna

Zarówno koncepcja misji TanDEM-X, jak i misji SRTM bazuje na technice pomiaru interferometrycznego wykorzystującego pomiar różnicy faz zapisanych w pikselach homologicznych dwóch obrazów pozyskanych z końców bazy interferometrycznej. W misji promu kosmicznego Endeavour zastosowane zostały dwa niezależne interferometry. Interferometr skonstruowany przez centrum badawcze NASA — JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) pracował w paśmie C (5,6 cm) w trybie skanowania ScanSAR, natomiast interferometr zbudowany przez Niemieckie Centrum Kosmiczne DLR obrazował w paśmie X (3,1 cm) pod stałym kątem 52°, co pozwoliło na uzyskanie wyższej dokładności wyznaczenia wysokości w stosunku do pasma C. Dokładność wysokościowa względna modelu dla pasma X wyniosła 6 m, a dla pasma C — 10 m. W konsekwencji szerokość pasa obrazowania dla pasma C wynosiła 255 km, a dla pasma X — 50 km. Jednakże dane obrazowane w paśmie X charakteryzują się występowaniem przerw w pokryciu pomiędzy kolejnymi pasmami obrazowania [4]. W misji TanDEM-X również wykorzystano długość fali odpowiadającą pasmu X ($\lambda = 3,1$ cm). Szerokość pasa obrazowania dla trybu

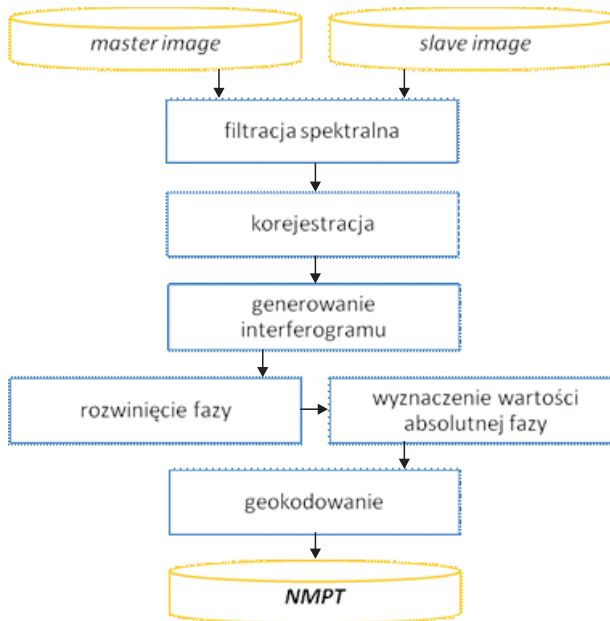
Stripmap, wykorzystanego do pozyskania danych pomiarowych numerycznego modelu pokrycia terenu, wynosi podobnie jak w przypadku misji SRTM 50 km.

Wysokość orbity promu kosmicznego Endeavour wynosiła 233 km przy kącie inklinacji 57° , co w rezultacie pozwoliło na pozyskanie danych dla ok. 80% powierzchni globu w ciągu 11 dni trwania misji. Wysokość orbity podyktowana była ograniczoną ładownością promu. Przyczyną zastąpienia anteny pasma L anteną pasma C był mniejszy rozmiar i masa anteny pasma C. Wysokość orbit heliosynchronicznych satelitów TSX i TDX wynosi 514 km przy kącie inklinacji $97,44^\circ$. Czas trwania procesu pozyskiwania danych do budowy NMPT jednocześnie przez oba satelity ustalono na trzy lata [6].

Zarówno misja SRTM, jak i TanDEM-X wykorzystuje zasadę symultanicznej rejestracji ech sygnału odbitego od powierzchni terenu przez dwie anteny. W misji STRM idea ta zrealizowana została poprzez zamontowanie dwóch anten: jednej nadawczo-odbiorczej w luku promu oraz drugiej odbiorczej na wysięgniku o długości 60 m pełniącym rolę bazy interferometrycznej. Takie rozwiązanie pozwoliło zminimalizować czasową dekorrelację sygnału oraz wpływ zakłóceń atmosferycznych. W porównaniu do misji SRTM, gdzie długość bazy była stała, koncepcja misji TanDEM-X zakłada możliwość zmiany długości bazy zarówno na kierunku orbitalnym, jak i poprzecznym do orbity poprzez zmianę pozycji satelitów. W trakcie pierwszego globalnego pokrycia długość bazy na kierunku poprzecznym do orbity wynosiła 200-500 m, co pozwoliło zapewnić lepszą koherencję pomiędzy pozyskanymi obrazami SAR. Podczas drugiego pokrycia długość bazy została zwiększona 1,3 razy (długość bazy wynosiła 250-600 m). Zastosowanie dłuższej bazy umożliwiło uzyskanie lepszej rozdzielczości oraz zwiększenie wartości stosunku bazowego, który decyduje o dokładności pomiarów sytuacyjno-wysokościowych. Stosunek długości bazy do wysokości orbity w misji SRTM wynosił 0,0003, a dla misji TanDEM-X zawierał się w przedziale od 0,0004 do 0,001. W trakcie trzeciego i czwartego pokrycia globu danymi do budowy NMPT długość bazy na kierunku poprzecznym do orbity może zostać zwiększona do 3000 m celem zmiany geometrii obrazowania i minimalizacji efektu *layover* oraz cienia radarowego [6].

3. Proces generowania NMPT

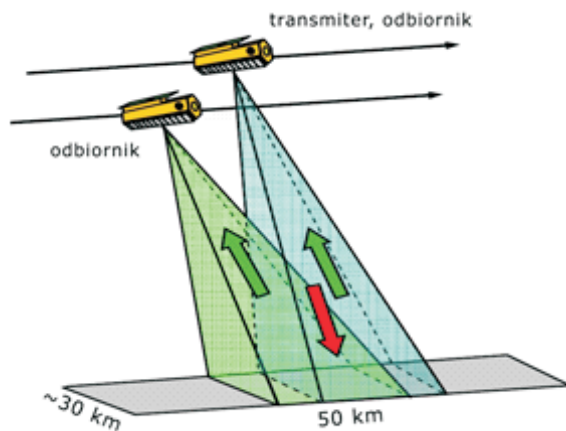
Koncepcja satelitarnej interferometrii radarowej InSAR (ang. *Interferometry Synthetic Aperture Radar*) została po raz pierwszy zaproponowana w 1974 roku. Obecnie, obok technik interferometrii różnicowej DInSAR (ang. *Differential Interferometry SAR*) oraz interferometrii stabilnych rozpraszaczy radarowych PSInSAR (ang. *Persistent Scatterer Interferometry SAR*), jest to jedna z najczęściej wykorzystywanych metod przetwarzania zobrazowań radarowych celem uzyskania informacji o wysokości lub deniwelacji terenu [5].



Rys. 2. Schemat procesu generowania numerycznego modelu pokrycia terenu metodą interferometrii radarowej [2]

Pierwszym etapem procesu generowania zbioru punktów wysokościowych numerycznego modelu pokrycia terenu metodą InSAR (rys. 2) jest wybór odpowiednich zobrażeń radarowych tego samego obszaru. Istotne jest, aby były one pozyskane w tym samym momencie bądź w niewielkim interwale czasowym, ze względu na możliwość wystąpienia czasowej dekorelacji sygnału spowodowanej zmianami na powierzchni terenu (związanymi np. z roślinnością, eksploatacją złóż kopalnianych). Problem ten jest rozwiązany poprzez zastosowanie trybu *bistatic InSAR stripmap* (rys. 3), w którym jeden z satelitów (TSX lub TDX) pełni funkcję nadawcy sygnału, natomiast rejestracja odbitego od powierzchni terenu sygnału następuje jednocześnie przez oba satelity realizujące konfigurację zapewniającą zmienną długość bazy. Wyznaczana z dokładnością na poziomie pojedynczych milimetrów długość bazy interferometrycznej na kierunku poprzecznym do orbity może wynosić od 200 m do 4 km, natomiast wzdłuż orbity do 1 km. Następnie przeprowadzana jest filtracja przesunięć spektrum (ang. *spectral shift filtering*) w celu zwiększenia koherencji generowanego interferogramu. W kolejnym etapie przeprowadzana jest korejestracja, polegająca na geometrycznym dopasowaniu obrazu dostosowania (ang. *slave image*) do obrazu referencyjnego (ang. *master image*) na podstawie informacji o parametrach orbit z wykorzystaniem dostępnego NMT. Wygenerowany interferogram reprezentuje fazę główną (o wartościach z przedziału od $-\pi$ do π) będącą różnicą faz wykorzystanych obrazów SAR. W celu

wyznaczenia absolutnej wartości fazy (poprzez określenie liczby pełnych cykli 2π) przeprowadzany jest tzw. proces rozwinięcia fazy (ang. *phase unwrapping*). W ostatnim etapie następuje geokodowanie (ang. *geocoding*), czyli przeliczenie rozwiniętej fazy na wartość wysokości i zamiana projekcji odległościowej (ang. *Slant Range*) na układ odniesienia poziomego, a następnie przeprowadzany jest proces generowania modelu [5].



Rys. 3. Tryb *bistatic InSAR stripmap* [3]

Wszystkie procesy związane z wstępnym przetwarzaniem pozyskanych danych, takie jak generowanie interferogramu na podstawie scen satelitarnych, rozwinięcie fazy czy geokodowanie, są przeprowadzane przez jeden system: zintegrowany procesor TanDEM-X — ITP (*Integrated TanDEM-X Processor*). W rezultacie otrzymywany jest „surowy” model (ang. *RawDEM*) w postaci pojedynczej sceny o zasięgu $\sim 30 \text{ km} \times 50 \text{ km}$. Pojedyncze sceny poddawane zostają procesowi kalibracji oraz mozaikowania przez drugi, niezależny system: procesor kalibracji i mozaikowania — MCP (*Calibration and Mosaicking Processor*) [7].

4. Dane wysokościowe misji TanDEM-X

Produktem misji TanDEM-X jest NMPT, czyli numeryczny model pokrycia terenu zawierający obiekty naturalne oraz pochodzenia antropogenicznego wykorzystany jest radiolokator pracujący w paśmie X (długość fali równa 3,1 cm), dla którego powierzchnie roślin, gruntu oraz innych obiektów są nieprzenikalne.

Wynikowy model *TanDEM-X DEM* będzie zbudowany w oparciu o dane pozyskane zarówno podczas pierwszego (2011-2012), jak i drugiego pokrycia globu (2012-2013), a także trzeciego i czwartego pokrycia (2013-2014) ograniczone

do obszarów, na których wystąpił efekt *layover* i cienia radarowego (na podstawie danych z pierwszego i drugiego pokrycia). *IDEM* (*Intermediate DEM*), czyli pośredni NMPT, jest natomiast wynikiem pozyskania danych jedynie z pierwszego pokrycia globu (*single baseline*), dlatego też charakteryzuje się występowaniem błędów związanych z procesem rozwinięcia fazy oraz brakiem danych na obszarach górskich. Zarówno *TanDEM-X DEM*, jak i *IDEM* dostępne będą w standardowej rozdzielczości 12 m (0,4"), jak również w rozdzielczości 30 m (1") i 90 m (3"). Na specjalne zamówienie dostępne będą również NMPT interpolowane do rozdzielczości 6 m (0,2"). *FDEM* (*Finer posting DEM*) będzie charakteryzował się dwukrotnie niższą dokładnością wysokościową względną w stosunku do modelu wynikowego *DEM*, natomiast poprzez dodatkowe rejestracje danych względna dokładność modelu *HDEM* (*Higher resolution DEM*) osiągnie wartość poniżej 1 m. Szczegółową specyfikację wyżej wymienionych produktów przedstawiono w tabeli 2 [7].

TABELA 2

Specyfikacja produktów wysokościowych misji TanDEM-X [7]

Produkt	Rozdzielczość	Dokładność pionowa względna (90%)	Dokładność pionowa bezwzględna (90%)	Dokładność pozioma bezwzględna (90%)	Pokrycie
TanDEM-X DEM (Digital elevation model)	~12 m	< 2 m ¹⁾ < 4 m ²⁾	< 10 m	< 10 m	globalne
TanDEM-X DEM (1")	~30 m	nieokreślona	< 10 m	< 10 m	globalne
TanDEM-X DEM (3")	~90 m	nieokreślona	< 10 m	< 10 m	globalne
IDEM (Intermediate DEM)	~12 m	nieokreślona	< 10 m	< 10 m	regionalne
IDEM (1")	~30 m	nieokreślona	< 10 m	< 10 m	regionalne
IDEM (3")	~90 m	nieokreślona	< 10 m	< 10 m	regionalne
FDEM (Finer posting DEM)	~6 m	< 4 m ¹⁾ < 8 m ²⁾	< 10 m	< 10 m	lokalne
HDEM (Higher resolution DEM)	~6 m	0,8 m	< 10 m	< 10 m	lokalne

1) dla terenu o nachyleniu $\leq 20^\circ$,2) dla terenu o nachyleniu $> 20^\circ$.

4.1. Numeryczny model pokrycia terenu TanDEM-X

Wartość wysokości przypisana każdemu pikselowi modelu wynikowego jest średnią ważoną wartości wysokości wyznaczonych na podstawie wszystkich dostępnych rejestracji (przeważnie dwóch) dla danego obszaru zgodnie z poniższym wzorem.

$$h = \frac{\sum_{k=1}^K w_k h_k}{\sum_{k=1}^K w_k}, \quad (1)$$

gdzie: h – wyznaczana wysokość;
 k – k -ta rejestracja;
 K – liczba wszystkich dostępnych rejestracji;
 w_k – waga dla k -tej rejestracji.

Wagi w_k są odwrotnie proporcjonalne do wartości odchyżeń standardowych błędów wysokości σ_{HEM} (wzór nr 2). Błędy te zwiększają się w obrębie granic obszarów pozyskania danych oraz dla obszarów o niskiej koherencji. Wysokości obarczone większym błędem mają mniejszy wpływ w procesie mozaikowania. Obszary, dla których wysokość została wyznaczona na podstawie pojedynczej rejestracji, oraz obszary, na których otrzymano różnicę wysokości pomiędzy poszczególnymi rejestracjami zaznaczone są na masce zgodności danych (COM).

Podstawowe parametry wynikowego modelu misji TanDEM-X zamieszczono w tabeli 3. Układem odniesienia zarówno modelu SRTM, jak i modelu TanDEM-X jest układ WGS-84. Dla obszarów pozbawionych danych lub posiadających nieprawidłowe dane wysokościowe NMPT (obszary o niskiej koherencji – pustynie, otwarte zbiorniki wodne) ustalono wartość wysokości na poziomie $-32767,0$ m, podobnie jak w przypadku danych z misji SRTM [7].

Parametry TanDEM-X DEM [7]

TABELA 3

Format pliku	GeoTIFF
Reprezentacja danych	16 bitów
Jednostka wysokości	metr
Układ współrzędnych	geograficzny
Układ odniesienia poziomego	WGS84
Układ odniesienia wysokościowego	elipsoida WGS84
Wartość wysokości w przypadku braku danych lub nieprawidłowych wartości	$-32767,0$ m (zgodnie z konwencją SRTM)
Metadane	XML, ISO 19115

5. Warstwy informacyjne

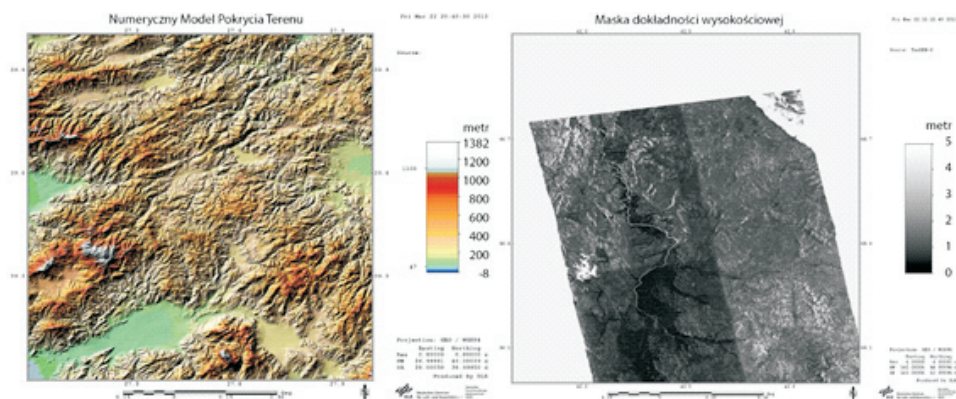
Przetwarzanie danych wysokościowych misji TanDEM-X obejmuje również generowanie warstw informacyjnych (tab. 4).

TABELA 4

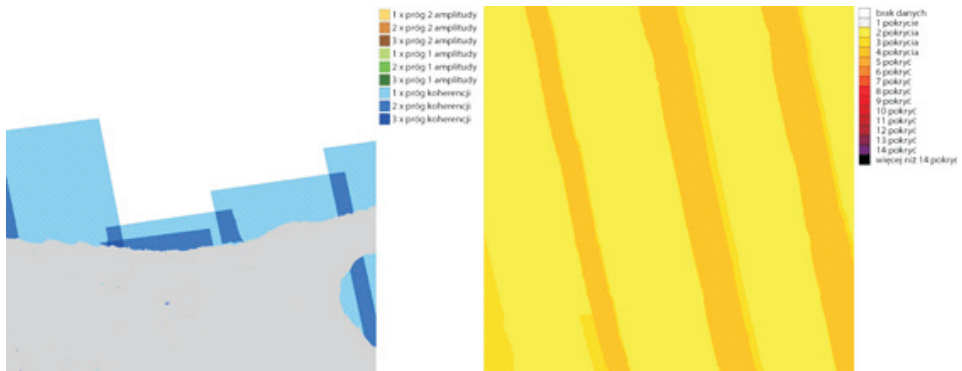
Warstwy informacyjne [7]

Komponent		Opis
DEM	(<i>Digital elevation model</i>)	dane wysokościowe
HEM	(<i>Height error map</i>)	mapa dokładności wysokościowej
WAM	(<i>Water indication mask</i>)	maska występowania zbiorników wodnych
COV	(<i>Coverage map</i>)	mapa pokrycia danymi
AMP	(<i>Amplitude mosaic</i>)	mozaika obrazów SAR z inf. o amplitudzie (wartość średnia)
AM2	(<i>Amplitude mosaic</i>)	mozaika obrazów SAR z inf. o amplitudzie (wartość min.)
COM	(<i>Consistency mask</i>)	maska zgodności danych
LSM	(<i>Layover and shadow mask</i>)	maska występowania efektu <i>layover</i> oraz obszarów cieni radarowych
IPM	(<i>Interpolation mask</i>)	maska obszarów poddanych interpolacji*

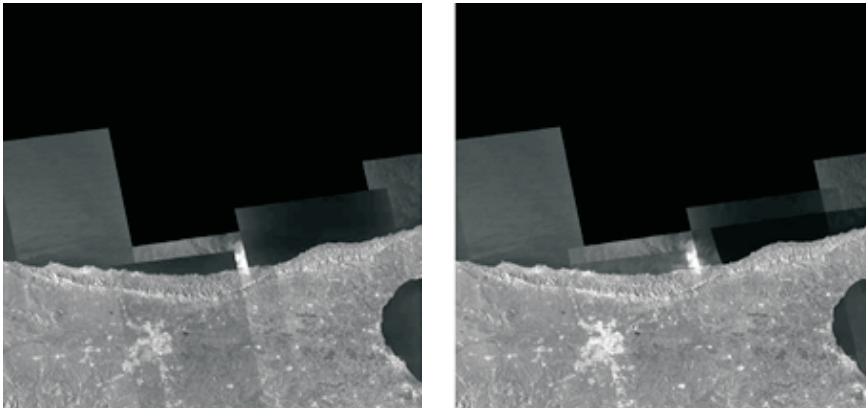
* warstwa dostępna tylko dla modelu IDEM.



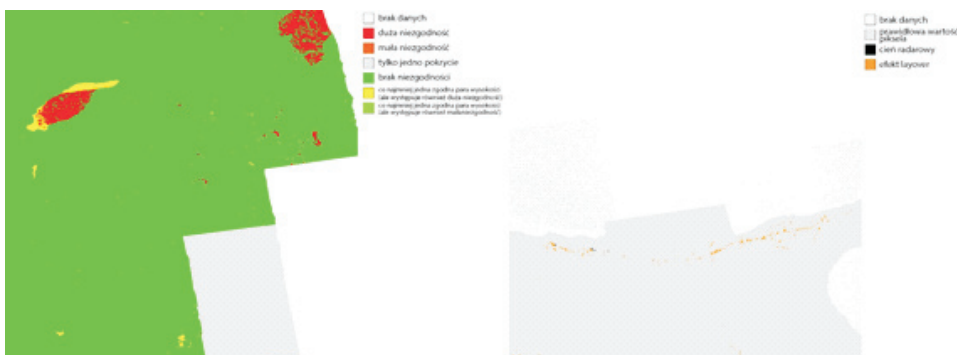
Rys. 4. Przykład NMPT oraz maski dokładności wysokościowej (HEM) [7]



Rys. 5. Przykład maski występowania zbiorników wodnych (WAM) oraz mapy pokrycia danymi (COV) [7]



Rys. 6. Przykład mozaik obrazów wartości minimalnej (AM2) i średniej amplitudy (AMP) [7]



Rys. 7. Przykład maski zgodności danych (COM) oraz maski występowania efektu *layover* i obszarów cieni radarowych (LSM) [7]

Miarą dokładności wyznaczenia wysokości dla każdego piksela opisującego numeryczny model pokrycia terenu jest odchylenie standardowe σ_{HEM} liczone na podstawie wartości koherencji (określającej stopień zgodności fazy sygnałów SAR) oraz kombinacji poszczególnych zobrażeń [7]. Wartość ta wyrażona jest wzorem:

$$\sigma_{HEM} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K w_k^2 \sigma_{HEM,k}^2}{\left(\sum_{k=1}^K w_k\right)^2}}. \quad (2)$$

Maska występowania wód WAM (rys. 5) tworzona jest w sposób automatyczny na podstawie progowania wartości amplitudy oraz koherencji. Obszary, na których występuje woda, charakteryzują się brakiem lub niską koherencją, co przejawia się niskimi wartościami stopni szarości na obrazach SAR oraz występowaniem zakłóceń na NMPT w postaci pików. W celu zminimalizowania błędów klasyfikacji wykorzystywane są dane pozyskane przez spektrometr MODIS satelity Terra (produkt MOD12C1 — pokrycie terenu) oraz dane misji SRTM, na podstawie których wykluczane są obszary pustynne, lodowcowe, suche oraz pokryte skąpą roślinnością, a także obszary o nachyleniu stoku większym niż 20° (z uwagi na możliwość błędnej klasyfikacji obszarów występowania cieni radarowych jako zbiorników wodnych). Maskę występowania wód zawiera zbiorniki wodne o powierzchni powyżej 2 ha ($200 \times 100 \text{ m}^2$). Metody ekstrakcji pikseli stanowiących zbiorniki wodne opierają się na progowaniu wartości amplitudy: próg 1 (*strict AMP Thresh 1*) $\beta_0 > 18 \text{ dB}$, próg 2 (*relaxed AMP Thresh 2*) $\beta_0 > 15 \text{ dB}$ oraz progowaniu wartości koherencji: (*COH Thresh*) $\sigma_0 < 0,23$ [7].

Mapa pokrycia danymi COV (rys. 5) stanowi warstwę wskazującą liczbę rejestracji danych, na podstawie której wyliczana jest ostateczna wartość wysokości dla każdego piksela NMPT [7].

Mozaika obrazów minimalnej wartości amplitudy AM2 (rys. 6) przedstawia najniższą wartość amplitudy dla każdego piksela sceny NMPT wyznaczoną na podstawie wszystkich dostępnych rejestracji. Warstwa ta przydatna jest m.in. w detekcji obszarów zbiorników wodnych.

Mozaika obrazów średniej wartości amplitudy AMP (rys. 6), dzięki uśrednieniu wartości amplitudy dla danego piksela na podstawie dostępnych rejestracji, zawiera mniej szumów w porównaniu do AM2, a obiekty takie jak budynki są na niej lepiej odwzorowane [7].

Maska zgodności danych COM (rys. 7) przedstawia obszary, dla których wysokości uzyskane z różnych przelotów nie są zgodne, a ich różnice przekraczają określone wartości progowe. Duże różnice wysokości mogą wynikać z błędów związanych z procesem rozwinięcia fazy lub niską koherencją (szczególnie dla

obszarów zbiorników wodnych). Nieznaczne różnice wysokości mogą być natomiast wynikiem zmian czasowych podczas kolejnych rejestracji (spowodowanych np. różnym okresem wegetacyjnym) [7].

Maska występowania efektu *layover* oraz obszarów cieni radarowych LSM (rys. 7), spowodowanych przez projekcję odległościową (ang. *Slant Range*) oraz topografię terenu, wyznaczana jest na podstawie informacji o geometrii każdej sceny w oparciu o cyfrowe modele wysokościowe misji SRTM-C oraz GLOBE (NOAA *Global Land One-kilometer Base Elevation*) [7].

6. Obszary zastosowań pomiaru interferometrycznego misji TanDEM-X

Formacja *Helix* zakłada możliwość zmiany pozycji i orientacji satelitów TSX oraz TDX na ich orbitach, umożliwiając realizację pomiaru interferometrycznego na kierunku orbitalnym oraz poprzecznym do kierunku orbity.

Oprócz budowy NMPT o zasięgu globalnym pomiar interferometryczny na kierunku poprzecznym do kierunku orbity znajduje zastosowanie w zakresie:

- badań środowiskowych (nawigacja, zarządzanie kryzysowe, obszary zurbanizowane),
- glaciologii (badania lodu i śniegu, monitorowanie lodu morskiego),
- geologii (badania dotyczące trzęsień ziemi, wulkanów oraz osuwisk),
- pokrycia terenu oraz wegetacji (określanie rodzaju pokrycia terenu, badania obszarów leśnych),
- oceanografii (badanie stref przybrzeżnych, dynamiki oceanów oraz detekcja statków).

W przypadku pomiaru interferometrycznego realizowanego na kierunku orbitalnym sygnał odbity od powierzchni terenu może być rejestrowany przez dwie anteny tego samego satelity przy długości bazy interferometrycznej równej 2,4 m bądź przez anteny obu satelitów przy zmiennej długości bazy wynoszącej do kilku kilometrów. Takie rozwiązanie umożliwi przeprowadzenie badań z zakresu:

- monitorowania ruchu (pomiaru prędkości obiektów będących w ruchu),
- oceanografii (badania prądów morskich, stref przybrzeżnych oraz wiatru i falowania, detekcja statków),
- glaciologii (badania dryftu lodu),
- hydrologii (monitorowanie przepływu rzek).

Ponadto misja TanDEM-X wykorzystuje technikę VLBI (ang. *Very Large Baseline Interferometry*) polegającą na realizacji interferometrii z długiej bazy celem zwiększenia dokładności generowanego NMPT do poziomu HRTI-4, a także interferometrię polarymetryczną PolInSAR (ang. *Polarimetric Interferometry SAR*) znajdującą zastosowanie m.in. w badaniach geologicznych oraz użytkowania terenu.

7. Podsumowanie

Misja TanDEM-X, którą tworzą satelity TerraSAR-X i TanDEM-X, pozwoli na wygenerowanie NMPT o zasięgu globalnym w standardzie HRTI-3. W porównaniu do radarowej misji topograficznej, której zasięg ograniczony został do 60° szerokości geograficznej północnej i 56° szerokości geograficznej południowej, misja TanDEM-X umożliwi pokrycie danymi całego globu. Do budowy numerycznego modelu pokrycia terenu obie misje wykorzystują technikę interferometrii radarowej w paśmie X, która jest niezależna od warunków pogodowych oraz oświetleniowych. Jakość danych SRTM w standardzie DTED-1 i DTED-2 była ograniczona ze względu na fizyczną długość bazy interferometrycznej, natomiast w misji TanDEM-X długość i orientacja w przestrzeni bazy utworzonej przez satelity TSX i TDX może być zmienna. Warstwy informacyjne dołączone do NMPT TanDEM-X stanowią źródło dodatkowych danych, mogących posłużyć m.in. w procesie edycji modelu.

Biorąc pod uwagę, że zakładana dokładność danych wysokościowych misji TanDEM-X odpowiadająca standardowi HRTI-3 dotyczy zbioru danych o zasięgu globalnym, należy przeprowadzić badania w zakresie oceny dokładności danych w skali lokalnej. W przypadku modelu misji SRTM opublikowane zostały wyniki badań przeprowadzonych dla różnych zestawów danych, zarówno pod względem zasięgu, jak i ukształtowania terenu. Określone zostały m.in. średnie bezwzględne błędy wysokości (z prawdopodobieństwem 90%) dla obszarów w granicach kontynentów (Rodrigues et al., 2006), jak i poszczególnych krajów (Polska — Karwel, Ewiak, 2012). Analiza dokładności powinna zostać wykonana w oparciu o reprezentatywny zbiór danych referencyjnych, na przykład w postaci danych pochodzących z systemów lotniczego skaningu laserowego bądź profili terenowych pomierzonych techniką GPS.

W 2019 roku Niemiecka Agencja Kosmiczna planuje wystrzelenie satelitów nowej misji TanDEM-L obrazujących w zakresie mikrofalowym pasma L (długość fali równa 23,6 cm), dla którego powierzchnie roślin i gruntu są przenikalne. Głównym celem misji będzie globalny pomiar biomasy leśnej, systematyczna rejestracja deformacji powierzchni Ziemi oraz ruchów lodowców.

Praca finansowana ze środków własnych.

Artykuł wpłynął do redakcji 25.04.2014 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 7.11.2014 r.

LITERATURA

- [1] FARR T.G. et al., *The Shuttle Radar Topography Mission*, 2007.
- [2] FRITZ T. et al., *Interferometric processing of TanDEM-X data*, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International.
- [3] KRIEGER G. et al., *TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry*, IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, 45 (11), 2007.

- [4] KURCZYŃSKI Z., *Lotnicze i satelitarne obrazowanie Ziemi, Cz. 2*, Warszawa, 2006.
- [5] OUCHI K., *Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics*, Remote Sensing, 5, 2013.
- [6] *TanDEM-X Ground Segment*, TD-GS-PL-0069-TanDEM-X-Science-Plan_V1_300610, 30.06.2010.
- [7] *TanDEM-X Ground Segment DEM Products Specification Document*, TD-GS-PS-0021_DEM-Product-Specification_v3.0, 18.12.2013.
- [8] WEBER M. et al., *TerraSAR-X and TanDEM-X: Global Mapping in 3D using Radar*, ISPRS Archives, 36, 1/W44, 2006.
- [9] RODRIGUES E., MORRIS C.S., BELZ J.E., *A Global Assessment of the SRTM Performance*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2006.
- [10] KARWEL A.K., EWIAK I., *Estimation of the accuracy of the SRTM-X Terrain Model on the area of Poland*, The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 39, 2012.

M. WOROSZKIEWICZ

Digital elevation models of TanDEM-X mission

Abstract. Started in 2010 TanDEM-X mission (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement) is the first spaceborne radar interferometer mission that acquires interferometric data in bistatic InSAR stripmap mode with two spacecrafts TerraSAR-X (TSX) and TanDEM-X (TDX) flying in Helix formation. That configuration enables generation of a global digital elevation model compatible with the HRTI-3 standard. This paper presents an overview and specification of primary products of the TanDEM-X mission, i.e. digital elevation models and additional components such as information layers and masks. Moreover, the use of radar interferometry techniques for generation of the digital elevation model (DEM) and applications of InSAR are described.

Keywords: TanDEM-X, SRTM, interferometry synthetic aperture radar, digital elevation model, digital surface model