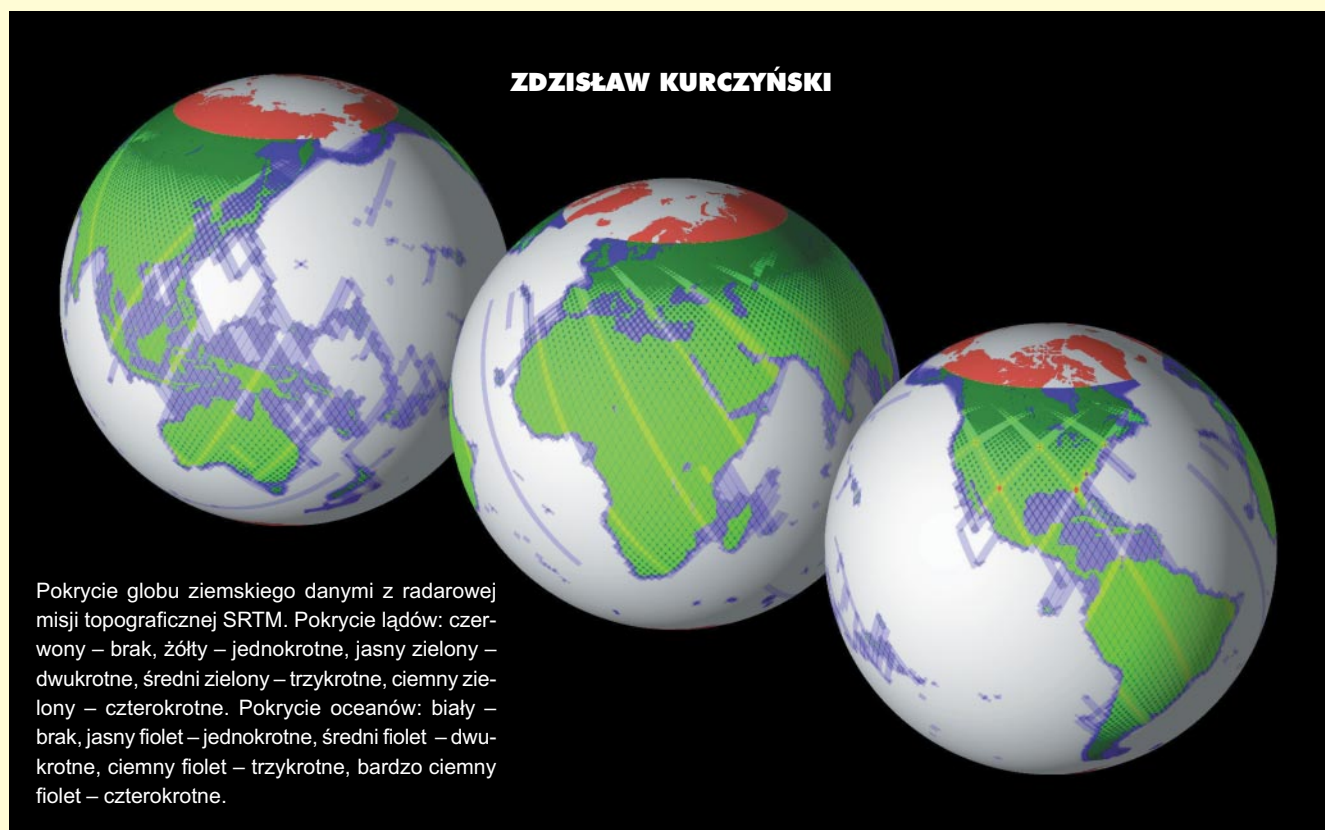


Radarowa misja topograficzna promu kosmicznego Endeavour

Nowa era geoinformatyki



20 lutego zakończyła się 9-dniowa misja promu kosmicznego Endeavour, o której pisaliśmy już w GEODECIE 3/2000. Głównym jej zadaniem było pozyskanie dla ponad 80% powierzchni globu ziemskiego przestrzennych danych topograficznych o jakości odpowiadającej mapom średnioskalowym. Zapowiada się nowa era „przemysłu” geoinformatycznego. O tym, na czym polega niezwykłość misji i na co możemy liczyć, pisze Zdzisław Kurczyński.

Obrazowanie radarowe

Radar kartograficzny, tzw. radar boczny wybierania (SLAR – *Side Looking Airborne Radar*), znany jest już od lat 50. Obrazowanie w zakresie radarowym polega na wysłaniu w bok od trajektorii samolotu silnej i skupionej w „wachlarz” wiązki mikrofal i pomiarze powracającego echa. Zarejestrowana różnica czasu powrotu odbitego sygnału, odpowiadająca różnej odległości nachylonej od obiektów terenowych, tworzy linię obrazu. Kolejno wysyłane impulsy generują następne linie, a w rezultacie powstaje obraz pasa terenu o szerokości od kilkunastu do kilkudziesięciu kilometrów równoległy do trajektorii. Unikalną cechą tego systemu obrazowania jest jego całkowita niezależność od warunków oświetleniowych (radar jest systemem aktywnym, sam „oświetla” teren wiązką mikrofal) oraz praktycznie niezależność od warunków atmosferycznych (radar „widzi” przez chmury). Wadą systemów SLAR była niska rozdzielczość obrazu (rzędu kilkudziesięciu metrów z pułapu samolotu), limitowana w pierwszym rzędzie długością anteny.

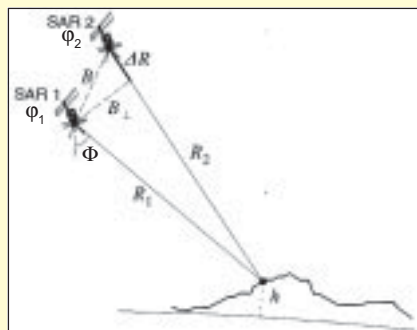
Postępem w obrazowaniu mikrofalowym jest radar z anteną „sztuczną” SAR (SAR – *Synthetic Aperture Radar*). Dzięki technikom przetwarzania danych antena jest tak „długa” jak odległość, którą przebył sensor w czasie odbierania sygnału. W tym systemie wysyłana wiązka jest spójna, a w odbieranym echu rejestruje się zarówno amplitudę, jak i fazę sygnału odbitego. Ponieważ wysyłana wiązka nie jest tak bardzo skupiona jak w systemie SLAR, więc każdy punkt terenowy będzie „oświetlony” przez kilka kolejno wysłanych impulsów. Odbicia te interferują ze sobą, tworząc tzw. hologram mikrofalowy (obraz pierwotny). Skomplikowana obróbka tego obrazu (dawniej w laserowym kanale optycznym, obecnie na drodze cyfrowej) daje po wizualizacji wy-

nikowy obraz radarowy (obraz wtórny) o zdolności rozdzielczej rzędu kilku metrów, co przy systemie SLAR wymagałoby użycia anteny o długości od kilkuset metrów do kilku kilometrów. Systemy SAR są instalowane zarówno w samolotach, jak i satelitach. Typowa zdolność rozdzielcza systemów satelitarnych zawiera się w przedziale 10-100 m, chociaż i rozdzielczości submetrowe są możliwe. Wykorzystuje się długości fal w zakresie $\lambda=3$ cm (pasmo X), $\lambda=5$ cm (pasmo C) i $\lambda=25$ cm (pasmo L).

Lata 90. przyniosły rozwój satelitarnych systemów radarowych. Można tu wspomnieć system SEASAT (pasmo L, 1978 r.), ERS-1/2 (pasmo C, 1991 r.), J-ERS (pasmo C, 1992 r.), RADARSAT (pasmo C, 1995 r.), SIR-C/X-SAR (pasmo L i C, dwie misje promu kosmicznego w 1994 r.). Część z tych systemów działa nadal i jest szeroko stosowana do różnych opracowań teledetekcyjnych, a zakres ich użyteczności jest porównywalny z rozpowszechnionymi systemami pracującymi w zakresie optycznym.

Interferometria SAR

Obrazy radarowe pozyskane z różnych orbit mają różną geometrię, co daje efekt stereo i możliwość opracowania wysokościowego. Jednak szczególnie obiecująca jest tzw. interferometria radarowa InSAR (*SAR Interferometry*), wykorzystująca bardzo wysoką czułość



Rys. 1. Konfiguracja interferometru InSAR z sąsiednich orbit [Bamler, 1997]

mierzonej fazy sygnału SAR na odległość do obiektu. Jeśli pozyskać dwa obrazy z bardzo bliskich sobie orbit (odległych o kilkadziesiąt do kilkuset metrów), to można określić różnicę faz dla każdego piksela obu obrazów (każdy piksel obrazów SAR zawiera informację o amplitudzie i fazie). Różnica faz, tzw. faza interferencyjna, wynosi (rys. 1):

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_1)$$

gdzie:

φ_1, φ_2 – fazy sygnału odbitego od punktu terenowego, zarejestrowane na obu obrazach,

λ – długość fali, na której pracuje system SAR,

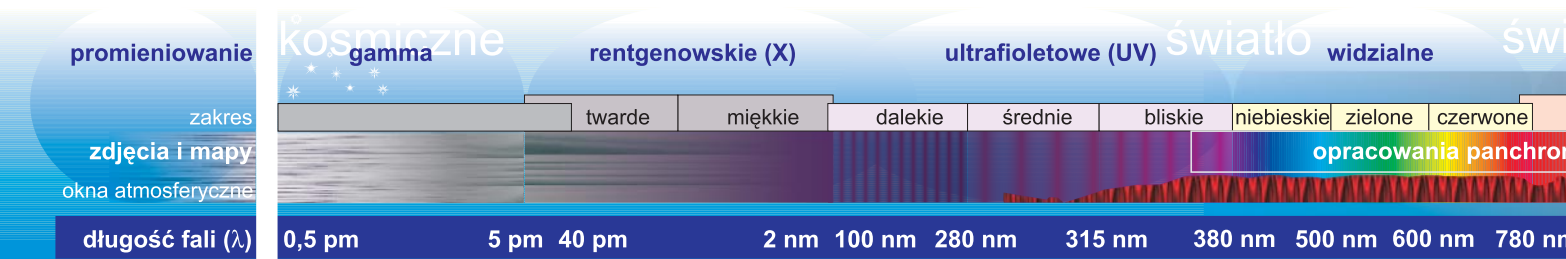
$\Delta R = (R_2 - R_1)$ – różnica odległości z obu orbit do punktu terenowego (tzw. paralaksa odległościowa).

W rezultacie powstaje interferogram złożony z prążków interferencyjnych (różnic faz obu obrazów). Paralaksa odległościowa jest funkcją kąta padania Φ i wysokości terenowej h , daje więc teoretycznie podstawę do pomiaru wysokości terenowych z dokładnością do ułamka długości fali (!). Idea jest prosta, a potencjalne dokładności niezwykle obiecujące. Praktyka napotyka jednak poważne trudności:

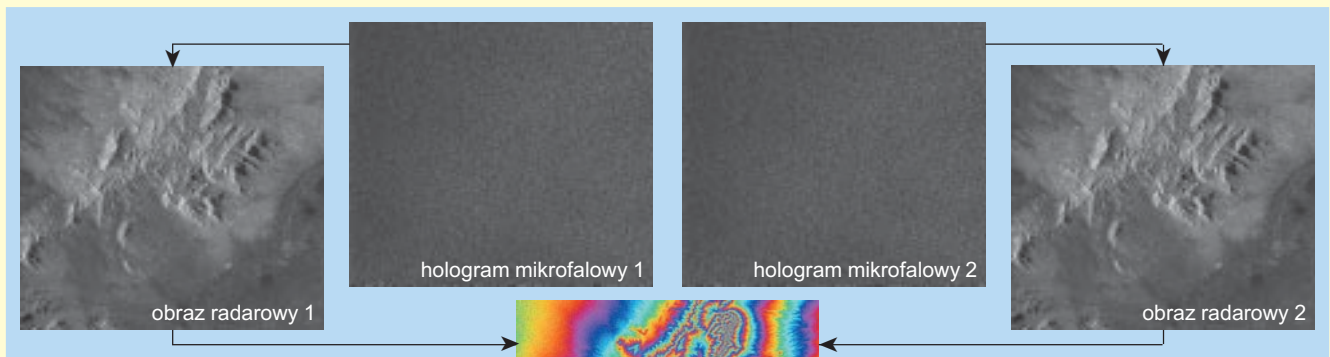
- Orbity muszą być bliskie, bowiem przy odleglejszych orbitach następuje dekorrelacja interferogramu (dla systemu ERS-1/2 krytyczna długość bazy wynosi około 1050 m).

- Interferogram zawiera informacje o różnicy faz (tj. „końcówkę” odpowiadającą różnicy odległości, a nie samą różnicę odległości). Pozostaje problem zliczenia różnicy pełnych cykli fali w obu odległościach R_1 i R_2 . W praktyce, aby określić różnicę wysokości dwóch punktów obrazu, należy zliczyć prążki interferencyjne między nimi w obrazie interferencyjnym (co nie jest łatwe, bo interferogram jest zakłócony).

- Oba interferujące obrazy są pozy-



1 pm (pikometr) = 1×10^{-12} m, 1 nm (nanometr) = 1×10^{-9} m, 1 μ m (mikrometr) = 1×10^{-6} m. Podziałka z długością fal nie zachowuje proporcji. Rozpiętość 1 milimetra, a pikometr byłby tysięczną częścią tego milimetra



skane w różnym czasie, a więc w odmiennych warunkach propagacji fal. Technika interferencyjna jest niezwykle czuła na takie zakłócenia.

■ Różnica w czasie pozyskania obu obrazów oznacza możliwość zmiany skanowanej powierzchni (spowodowanej np. wegetacją roślin), co jest kolejnym czynnikiem zakłócającym pomiar różnicy faz.

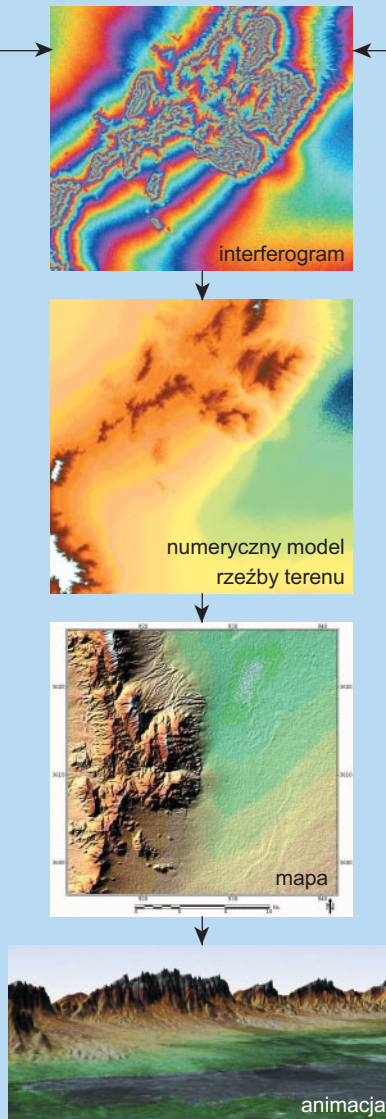
Powyższy opis nie wyczerpuje czynników zakłócających technikę interferencyjną, wskazuje natomiast na jej niezwykle potężny potencjał: teoretycznie można wyznaczać wysokości terenowe z dokładnością milimetrową, a odległość do satelity – również teoretycznie – nie wpływa na tę dokładność. Podstawy interferometrii SAR znane są od dawna (lata 70.), ale dopiero umieszczenie na orbicie satelity ERS-1 umożliwiło zastosowanie jej na szerszą skalę.

Opisany powyżej schemat dotyczy zasady tzw. interferometru z sąsiednich orbit (*cross-track interferometer*), w odróżnieniu od interferometru z jednej orbity (*single-pass interferometer*). To drugie podejście wymaga systemu dwukanałowego z dwiema antenami: jedną nadawczo-odbiorczą i drugą tylko odbiorczą. Obie anteny muszą być rozsunięte na stałą, możliwie dużą odległość. To rozwiązanie jest trudniejsze w realizacji ze względu na konieczność rozsunienia anten, ma jednak zasadniczą przewagę nad interferometrem z

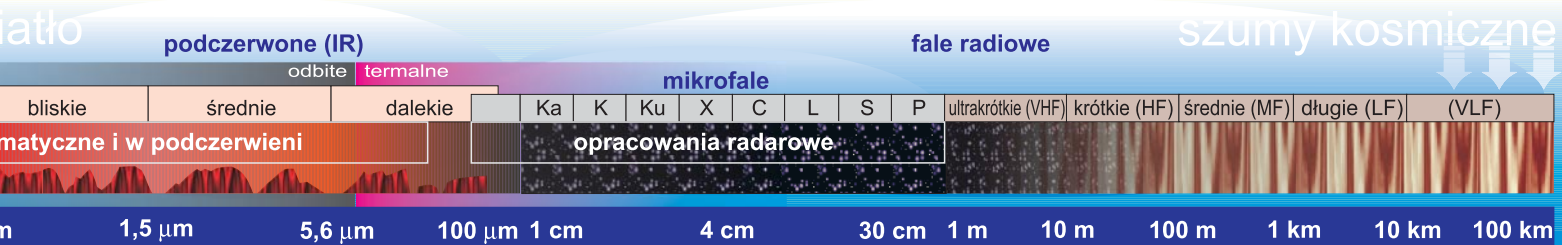
sąsiednich orbit, polegającą na tym, że oba obrazy są pozyskiwane w tym samym czasie, ze stałej i znanej „bazy”. To znakomicie ogranicza czynniki zakłócające interferencję. Takie rozwiązanie do niedawna nie było zastosowane w kosmosie. Lutowa misja amerykańskiego promu kosmicznego Endeavour, wykorzystującą praktycznie tę ideę, rozpoczęła nową erę interferometrii radarowej.

Interferometria radarowa

Ideę interferometrii radarowej przedstawia rysunek 2. Odebrane przez obie anteny (nadawczo-odbiorczą i odbiorczą) sygnały dają dwa hologramy mikrofalowe. Hologramy te są zapisem interferujących ze sobą odbitych spójnych fal – ech (stąd analogia do holografii). Hologramy są całkowicie nieczytelne dla oka. Po obróbce numerycznej każdego z nich otrzymuje się „tradycyjne”, czarno-białe obrazy radarowe. Na obrazach tych w formie stopnia zaciemnienia wizualizowane są amplitudy sygnałów odbitych od poszczególnych elementów terenu. Jest to odpowiednik gęstości optycznej na tradycyjnych zdjęciach. O wielkości amplitudy obrazu radarowego decyduje wiele czynników: rodzaj pokrycia terenu, „szorstkość” jego powierzchni, właściwości dielektryczne obiektu (uwarunkowane przede wszystkim wilgotnością) i inne. Pod względem geometrycznym oba obrazy nieco się róż-



Rys. 2. Interferometria radarowa „krok po kroku”



długości fal obrazuje następujące porównanie: gdyby przyjąć, że dystans z Warszawy do Monachium wynosi 1 metr, to 1 nanometr miałby wtedy długość

nią, ponieważ zostały odebrane przez dwie odległe od siebie anteny, które „widzą” teren z różnych punktów przestrzeni. Różnice te są bardzo niewielkie i nie dają praktycznych podstaw do obserwacji i pomiaru stereoskopowego.

Pamiętajmy jednak, że każdy piksel obrazu jest zapisem amplitudy i fazy. Różnice faz określone dla każdego piksela tworzą interferogram złożony z prążków interferencyjnych (na rys. 2 te różnice faz są prezentowane barwami – im gęściej są ułożone prążki interferencyjne, tym większe nachylenie stoku). Jak już zostało powiedziane wcześniej, z różnic faz można określić

Radarowa misja topograficzna promu kosmicznego

Celem lotu Endeavoura (11-20 lutego br.) była realizacja radarowej misji topograficznej promu kosmicznego (SRTM – Shuttle Radar Topography Mission). Jest to wynik współpracy między NASA (National Aeronautics and Space Administration), Narodową Agencją Kartograficzną (NIMA – National Imagery and Mapping Agency), Włoską Agencją Kosmiczną (ASI – Italian Space Agency) oraz Niemieckim Centrum Kosmicznym (DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt). Od strony technicznej misja była

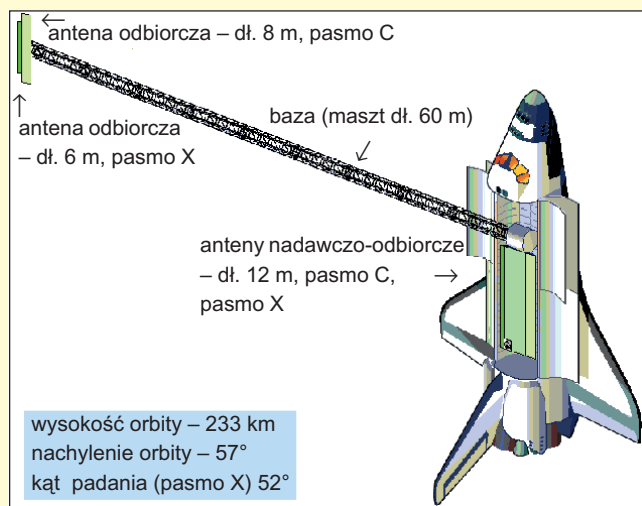
realizowana niezależnie przez dwa interferometry: pracujący w paśmie C, zbudowany przez NASA/JPL (JPL – Jet Propulsion Laboratory) oraz pracujący w paśmie X, zbudowany przez Niemieckie Centrum Kosmiczne DLR. Anteny nadawczo-odbiorcze obu interferometrów w znajdowały się w łuku promu, a anteny odbiorcze na

wysięgniku teleskopowym o długości 60 m, tworzącym bazę interferencyjną (rys. 3). Stworzyło to razem największy dotychczas sztuczny obiekt krążący w kosmosie. Prom poruszał się na wy-

sokości 233 km nad Ziemią po orbicie nachylonej do równika pod kątem 57°. Celem misji było pozyskanie wysokościowych danych topograficznych dla ponad 80% powierzchni lądów, między 60° szerokości geograficznej północnej a 56° szerokości geograficznej południowej [Bamler, 1999]. Interferometr pasma C pracował w tzw. trybie skanowania. Polegało to na elektronicznym sterowaniu wiązką mikrofal emitowanych przez antenę tak, aby prawie równocześnie objąć obrazowaniem pas o szerokości 225 km. Antena pasma X nie była sterowana, lecz „patrzyła” pod stałym kątem 52° od nadiru i obrazowała pas o szerokości 45 km. Taki tryb pracy pozwolił uzyskać prawie dwukrotnie wyższą względną dokładność wysokości, ale kosztem węższego pasa obrazowania, a w konsekwencji – przerw między sąsiednimi pasami.

Opracowanie wyników misji

Podczas misji zarejestrowano imponującą ilość danych. System pracował prawie 100 godzin, skanując 1750 km² powierzchni w każdej sekundzie lotu. Z zaplanowanej powierzchni 94,5% zobrazowano dwukrotnie (ważne dla wyeliminowania „cieni radarowych”) i tylko 0,042% nie udało się pokryć w ogóle. Dane zostały zapisane na 325 taśmach o zagęszczeniu zapisie (11,7 terabajtów), w tym 208 taśm (7 terabajtów) w paśmie C. Opracowanie takiej ilości materiałów musi potrwać. Obecnie odbywa się kopiowanie i archiwizacja danych źródłowych, w następnej kolejności nastąpi ich kalibracja i właściwe opracowanie. Dane z pasma C są kopiowane i będą opracowywane przez NASA, zaś z



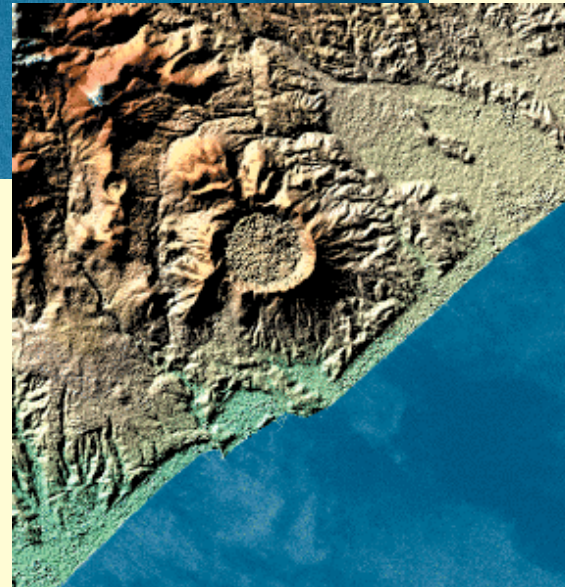
Rys. 3. Interferometry SRTM promu kosmicznego [Bamler, 1999]

wysokości terenowe, a w efekcie zbudować numeryczny model terenu (NMT). Wymaga to znajomości precyzyjnej długości bazy interferencji i jej orientacji w przestrzeni (położenie i kąty nachylenia). W dokładnych opracowaniach wskazana jest znajomość wysokości terenowych kilku punktów (odpowiednik fotopunktów), dla korekcji szczytkowych błędów.

Na rys. 2 przedziały wysokości NMT są prezentowane w formie palety barw. Numeryczny model terenu można różnie wizualizować, np. nadając mu formę mapy wysokościowej. Przestrzenny NMT można „ogłądać” z zadanego punktu przestrzeni, otrzymując widok perspektywiczny. Łącząc serię takich widoków, można symulować lot nad obrazowanym obszarem. Efekt będzie jeszcze bardziej naturalny, jeśli taki przestrzenny numeryczny model terenu „udrapujemy” obrazem radarowym czy satelitarnym pozyskanym z innego systemu obrazowania.

Parametr	Pasma X	Pasma C	
	Poziom 2	Poziom 1	Poziom 2
Dokładność: (wszystkie błędy na poziomie prawdopodobieństwa 90%)			
■ sytuacyjna bezwzględna	błąd < 20 m	błąd < 20 m	błąd < 20 m
■ sytuacyjna względna	błąd < 15 m	błąd < 15 m	błąd < 15 m
■ wysokościowa bezwzględna	błąd < 16 m	błąd < 16 m	błąd < 16 m
■ wysokościowa względna	błąd < 6 m	błąd < 10 m	błąd < 10 m
Rozdzielczość	30 m x 30 m		
Układ odniesienia poziomego	WGS 84		
Układ odniesienia wysokościowego	Elipsoida WGS 84		
Format produktów:			
Pozycja:	φ λ	φ λ	φ λ
0° – 50° N-S	1" 1"	3" 3"	1" 1"
50° – 60° N-S	1" 2"	3" 6"	1" 2"
Reprezentacja danych	16-bitowa	16-bitowa	16-bitowa
Nośniki danych	Internet, CD-ROM, DVD		

Tablica 1. Dane radarowej misji topograficznej promu kosmicznego Endeavour – SRTM [Bamler, 1999]



Rys. 4. Hokkaido, Japonia, 140° 48' E, 42° 00' N, NMT (pasmo C, wysokości kodowane kolorami). W powiększeniu jezioro wulkaniczne Kuttura

stały zaczerpnięte z Internetu (<http://www.dlr.de/srtm>, <http://www.jpl.nasa.gov/srtm>).

Dr Zdzisław Kurczyński jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym w Instytucie Fotogrametrii i Kartografii Politechniki Warszawskiej. W latach 1995-98 w ramach programu PHARE sprawował merytoryczny nadzór nad wykonawstwem zdjęć lotniczych dla obszaru Polski. Obecnie jest indywidualnym konsultantem Banku Światowego do realizacji zadania „Numeryczne modele rzeźby terenu oraz numeryczne mapy topograficzne”.

Literatura:

1. Bamler R., *Digital Terrain Models from Radar Interferometry*, Photogrammetric Week '97, Wichman 1997,
2. Bamler R., *The SRTM Mission: A World Wide 30 m Resolution DEM from SAR Interferometry in 11 Days*, Photogrammetric Week '99, Wichman 1999,
3. Triglav J., *SRTM Mission Completed*, Geoinformatics 4/2000 (czerwiec),
4. Internet: <http://www.edc-daac.usgs.gov>, <http://www.dlr.de/srtm>, <http://www.jpl.nasa.gov/srtm>, <http://photojournal.jpl.nasa.gov>

pasma X – przez Niemieckie Centrum Kosmiczne. Przewidywany kalendarz prac [Triglav, 2000]:

- pierwsze kalibrowane dane – maj-czerwiec 2000 r.,
- początek systematycznego przetwarzania – czerwiec 2001 r. (kolejność przetwarzania według priorytetów NIMA),
- początek dystrybucji opracowań kontynentalnych – listopad 2001 r.,
- dostarczenie końcowych opracowań do USGS (*US Geological Survey*) – październik 2002 r.

Produkty SRTM

Dane pozyskane podczas misji pozwolą opracować numeryczny model rzeźby terenu, tzw. interferencyjne dane wysokościowe (ITED – *Interferometric Terrain Elevation Data*) w regularnej siatce geograficznej, a mianowicie:

- ITED-2 (NMT na poziomie 2, pasmo X): siatka o oczku 1" x 1" (ok. 30 m x 30 m),
 - ITED-2 (NMT na poziomie 2, pasmo C): siatka o oczku 1" x 1" (ok. 30 m x 30 m),
 - ITED-1 (NMT na poziomie 1, pasmo C): siatka o oczku 3" x 3" (ok. 90 m x 90 m),
- Parametry tych produktów zawiera tabela na stronie obok.

Dystrybucja i koszty

Na mocy memorandum między NASA i NIMA wyniki misji SRTM będą ogólnodostępne, jednakże pod pewnymi warunkami. Dla przykładu: surowe dane i NMT o podwyższonej dokładności (poziom 2, siatka 1" x 1") z obszarów poza USA będą dystrybuowane w zgodzie z polityką obronną i pod kontrolą Departamentu Obrony USA. NMT poziomu 1 będzie dystrybuowany bez ograniczeń. Sprawa formatu danych i cen produktów jest nadal dyskutowana. Większość z nich

będzie dystrybuowana przez Internet, ale również na CD i DVD. Opracowania z pasma C rozprowadzane będą przez USGS, a z pasma X – przez Niemieckie Centrum Kosmiczne. Wstępnie ceny produktów przewiduje się na poziomie pokrycia kosztów operacyjnych (trzymamy za słowo!). Bieżące informacje o warunkach dystrybucji będą pojawiać się na stronie internetowej <http://edc-daac.usgs.gov> [Triglav, 2000].

Zastosowania produktów SRTM

Pokrycie lądów danymi topograficznymi w skali globu jest ciągle daleko niekompletne, a tam, gdzie istnieje, często bywa nieaktualne i różnorodne pod względem standardów technicznych. Misja SRTM wypełnia tę lukę. Przewiduje się, że zobrazowania z Endeavoura pozwolą naukowcom rejestrować i wiarygodnie przewidywać zmiany w atmosferze, na lądzie i morzu spowodowane procesami naturalnymi oraz działalnością człowieka. Skorzystają z nich hydrologi, geolodzy (szczególnie do badania stref wulkanicznych i aktywnych sejsmicznie), archeolodzy, specjaliści od planowania przestrzennego, transportu, telekomunikacji. Każda działalność wymagająca danych topograficznych odniesie korzyści z programu SRTM. Produkty SRTM, tj. NMT i same obrazy radarowe, mogą być wykorzystywane z innymi zobrazowaniami satelitarnymi, jak Landsat czy SPOT. Pozwoli to na ortorektyfikację tych obrazów czy tworzenie przestrzennych, wirtualnych krajobrazów poprzez nakładanie obrazów na NMT. Załączone próbki przestrzennego opracowania powstały z przetworzenia nieskalibrowanych danych i zo-