

TERRASAR-X NA ORBICIE

Czy umieszczony 15 czerwca na orbicie niemiecki satelita radarowy TerraSAR-X jest tylko jednym z wielu istniejących już podobnych urządzeń? Wiele wskazuje jednak na to, że otwiera on nowy rozdział obrazowania Ziemi z kosmosu.

ZDZISŁAW KURCZYŃSKI

Na orbitę o wysokości 514 km wyniosła TerraSAR-X rosyjska rakietą Dniepr-1, która wystartowała z kosmodromu Bajkonur w Kazachstanie. Wcześniej operacja ta była wielokrotnie przekładana. Satelita został zbudowany i będzie eksploatowany na zasadzie partnerstwa publiczno-prywatnego we współpracy Niemieckiego Centrum Kosmicznego DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) oraz firmy EADS Atrium GmbH. DLR odpowiada za misję satelity, zarządzanie nim i wykorzystanie danych dla celów naukowych, natomiast Infoterra GmbH (firma-córka Atrium) – za komercyjne udostępnianie danych. Koszt całego projektu ocenia się na 130 mln euro, z czego DLR wyłożyła 102 mln, a EADS Atrium – resztę.

TerraSAR-X waży 1239 kg i jest zaliczany do tzw. ciężkich satelitów. Bardzo złożona konstrukcja anteny oraz duże zapotrzebowanie na energię uniemożliwiły miniaturyzację.

Już po kilku dniach od startu, jeszcze przed osiągnięciem przez satelitę ostatecznej pozycji na orbicie, odebrano pierwsze obrazy obejmujące okolice Wołgogradu w Rosji oraz Morza Czarnego (rys. 1). Przez najbliższe miesiące TerraSAR-X będzie kalibrowany. Czas jego eksploatacji przewidywany jest na 5 lat. Za dwa lata planuje się umieszczenie na orbicie bliźniaczego satelity TanDEM-X,

który wraz z obecnym utworzy w kosmosie bazę interferencyjną.

● OBRAZOWANIE RADAROWE

Unikalną zaletą obrazowania radarowego (inaczej: mikrofalowego) jest niezależność od warunków oświetleniowych i atmosferycznych, co czyni je bardziej dyspozycyjnym niż wszystkie inne. Wychodzi to naprzeciw rosnącemu zapotrzebowaniu na informację obrazową pozyskiwaną w zaplanowanych terminach i ma szczególne znaczenie dla obszarów, gdzie zachmurzenie stanowi istotną przeszkodę w obrazowaniu w zakresie optycznym (np. Europa).

Czas dostępu do informacji jest krytyczny dla takich zadań, jak np.:

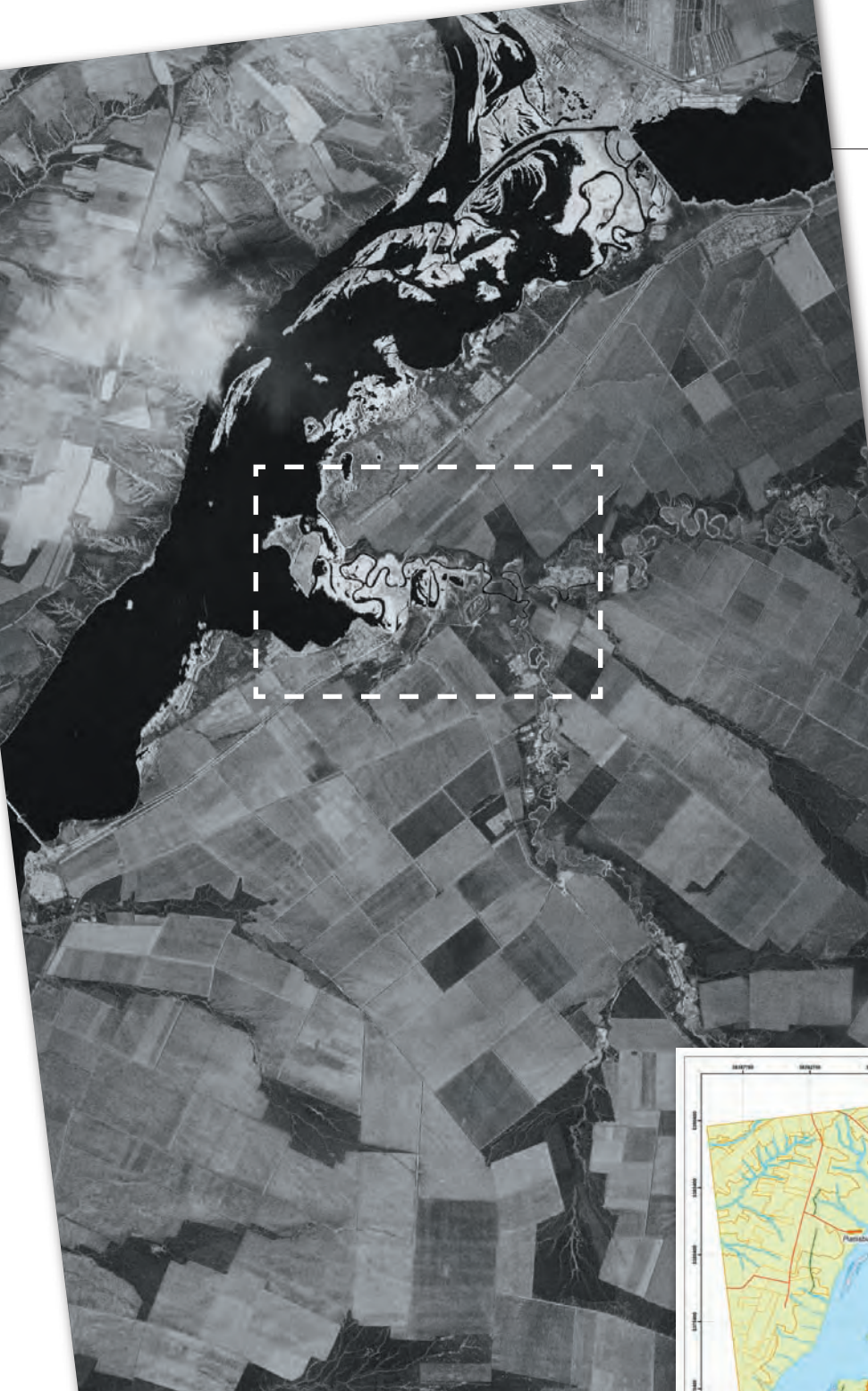
- monitorowanie obszarów klęsk żywiołowych i ekologicznych,
- bezpieczeństwo narodowe,
- monitorowanie stanu upraw i ich kontrola.

Zalety te zostały docenione dość dawno. Rozwój obrazowania radarowego zarówno z pułapu lotniczego, jak i satelitarne rozpoczęły się w latach 90. ubiegłego stulecia i trwa do dzisiaj. Można tu przypomnieć chociażby systemy satelitarne Seasat-1, Almaz-1, Radarsat-1, ERS-1 i 2, JERS-1 czy Envisat.

Dotychczasowe programy obrazowania mikrofalowego wykazały i nadal wykazują przydatność. Pewnym ich ograniczeniem jest relatywnie niska zdolność rozdzielcza. Systemy, o których mowa, obrazowały z rozdzielczością rzędu 10-30 m (piksel terenowy). To

znacznie słabiej niż w zakresie optycznym, szczególnie w porównaniu z systemami obrazowania o bardzo dużej rozdzielczości – VHRS (typu Ikonos, QuickBird, OrbView), które osiągnęły 1 m, a wkrótce zbliżą się do 0,5 m. Systemy satelitarne obrazowania radarowego, które zaistnieją w najbliższych latach, w znacznym stopniu przezwyciężą tę dysproporcję.

Porównując obrazy pozyskiwane w zakresie optycznym i mikrofalowym, nie należy postrzegać ich jako konkurencyjnych. Obrazy radarowe nie są i nie będą prostym zamiennikiem obrazów optycznych. Jedne i drugie dostarczają różnej informacji o powierzchni terenu. Fizyczna natura obrazowania radarowego jest znacznie bardziej złożona od obrazowania optycznego, tym samym i jego interpretacja jest trudniejsza. Systemy radarowe mogą pracować w różnych zakresach fal (K, X, C, L, P). Dodatkowo ważnym parametrem użytkowym systemów mikrofalowych jest możliwość polaryzacji sygnału transmitowanego i odbieranego przez antenę. Zarówno wiązkę mikrofal wysłaną, jak i odbieraną przez antenę można polaryzować niezależnie w płaszczyźnie poziomej (H) i pionowej (V). Daje to 4 kombinacje polaryzacji: HH, HV, VH, VV z zachowaniem amplitudy i fazy sygnału. Możliwości zmiany zakresu fal i polaryzacji mają wpływ na zasób treści obrazu. Może to być postrzegane jako odpowiednik obrazowania wielospektralnego w systemach optycznych.



● SATELITA TERRASAR-X

Prawdziwym przełomem na tym le jest system TerraSAR-X. Posiada on wiele innowacyjnych technologii:

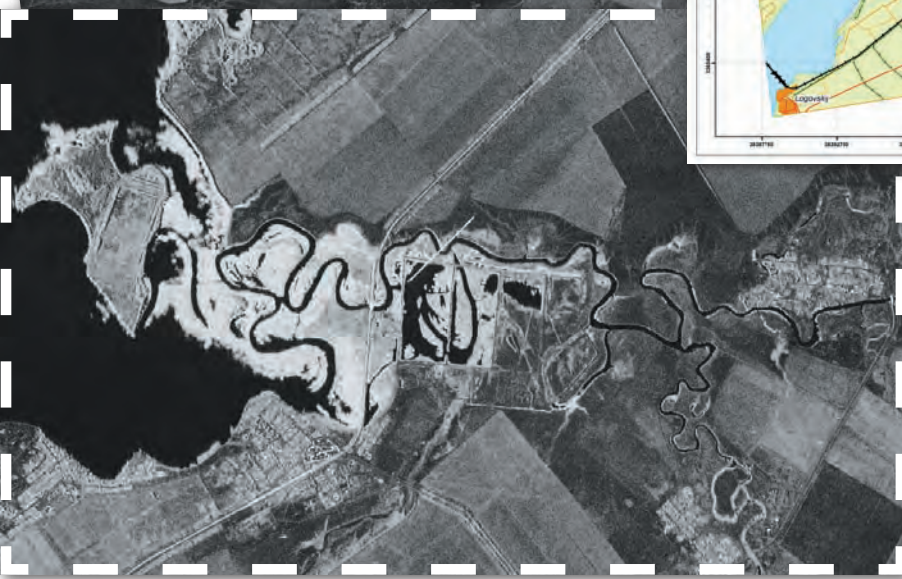
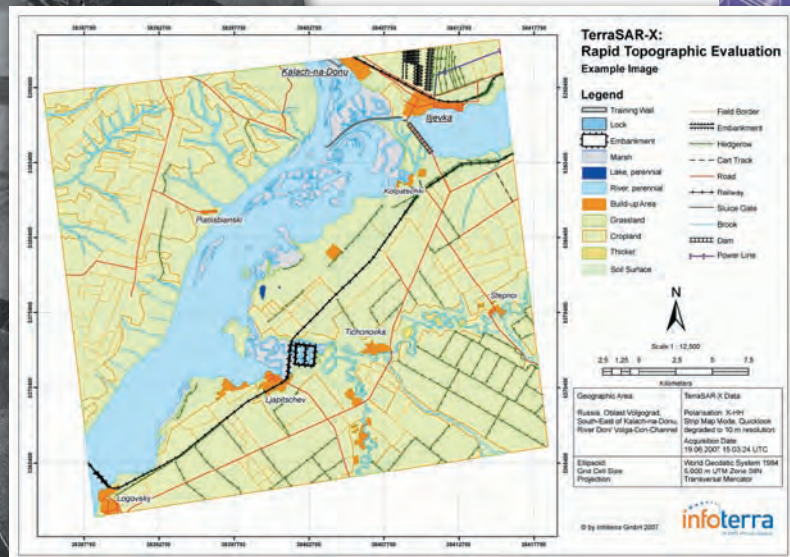
- pozwala w kilku trybach obrazować pas terenu o szerokości w zakresie od 10 do 100 km z rozdzielczością od 1 do 16 m,

- umożliwia kilka wariantów polaryzacji sygnału emitowanego i odbieranego,

- oferuje dużą częstotliwość obrazowania (co 2,5-4,5 dnia, bez względu na pogodę),

- specjalna budowa anteny odbiorczej umożliwi pracę w trybie podwójnym (*Dual Receive Antenna Mode*). Antena o długości 4,8 m będzie traktowana jako dwa moduły odległe o 2,4 m. Będzie ona naprzemiennie transmitować pulsy o polaryzacji H/V i równocześnie odbierać o polaryzacji H i V przez swoje dwie połowy. Umożliwi to pełną poczwórną polaryzację oraz tzw. interferometrię wzdłuż orbity (dla monitorowania obiektów w ruchu, ruchu powierzchni oceanu itp.). Jest to opcjonalny, eksperymentalny tryb pracy satelity.

Podstawowe parametry satelity oraz anteny prezentuje tabela 1 na następnym stronie.

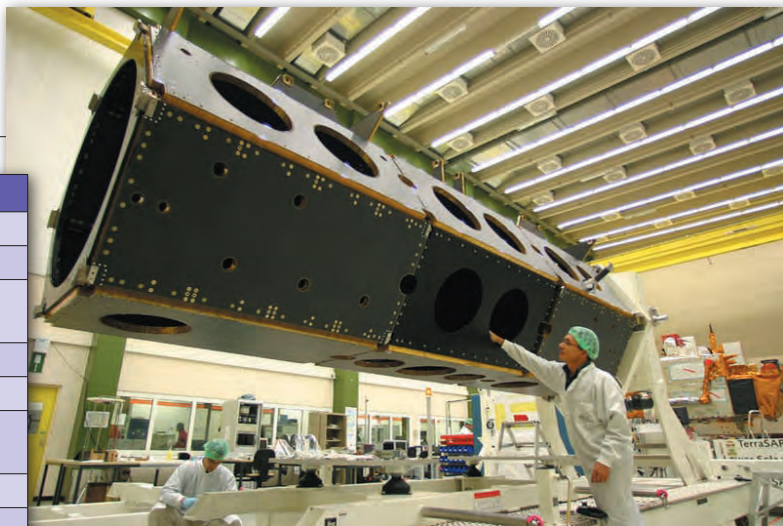


1. Pierwszy obraz radarowy pozyskany przez satelitę TerraSAR-X (okolice Wołgogradu - Rosja)

Fragment mapy topograficznej w skali 1:12 500 opracowany na podstawie tego obrazu

TAB. 1. PARAMETRY SYSTEMU TERRASAR-X

Satelita	
Wysokość orbity	514 km
Inklinacja	97,44° (orbity heliosynchroniczna)
Liczba okrążeń na dzień	15 ² / ₁₁
Czas rewizyty	11 dni
Przejście przez równik	18:00 ± 0,25 h (czasu lokalnego)
Masa	1250 kg
Moc	850 W (średnio)
Antena	
Częstotliwość nośna	9,65 GHz ($\lambda=3,1$ cm, pasmo X)
Długość x szerokość x grubość	4,8 m x 0,8 m x 0,15 m
Liczba modułów transmitujących	384 (12 części z 32 dwubiegunowymi falowodami każda)
Kierunek patrzenia anteny	prawy
Szerokość pasma	150 MHz (eksperymentalnie 300 MHz)
Częstotliwość powtarzania pulsów	2,2-6,5 kHz
Polaryzacja	HH, VH, HV, VV
Kąt padania wiązki	20-45° (tryby Stripmap, ScanSAR) 20-55° (tryb Spotlight)
Sterowanie wiązką	±0,75° kierunek azymutalny, ±20° kierunek wysokości



Możliwe jest obrazowanie z polaryzacją pojedynczą i podwójną, skutkujące jedną lub dwiema warstwami obrazu. Podwójna polaryzacja w TerraSAR-X została wprowadzona poprzez przełączanie polaryzacji transmitowanej i odbieranej energii między kolejnymi pulsami. Powoduje to konieczność zwiększenia częstotliwości pulsów (*Pulse Repetition Frequency – PRF*) w porównaniu z pojedynczą polaryzacją, co ogranicza szerokość obrazowanego pasa i rozdzielczość obrazowania

Pozwala to zwiększyć czas opromienienia obrazowanego obszaru, a tym samym wydłużyć antenę syntezowaną i w konsekwencji zwiększyć rozdzielczość obrazowania. Odbywa się to kosztem długości obrazowanego pasa.

W tym trybie obrazowania występują dwa warianty: zwykły tryb punktowy (*SpotLight Mode – SL*) oraz „punktowy” wysokiej rozdzielczości (*High Resolution Spotlight Mode – HS*). Różnią się one prędkością „obracań” wiązki w kierunku azymutalnym. W trybie SL ta prędkość jest mniejsza, co skutkuje zmniejszoną rozdzielczością w kierunku azymutalnym, ale wydłużeniem obrazowanej sceny (patrz tabela 2 i rysunek 2).

● **Tryb skanowania** (*ScanSAR Mode – SC*) polega na sterowaniu energią emitowaną przez antenę w kierunku wysokości (tj. w płaszczyźnie pionowej prostopadłej do kierunku orbity). Sterowanie to jest możliwe dzięki budowie anteny, złożonej z wielu oddzielnych falowodów, wysyłających wiązki pod nieco różny-

● **TRYBY OBRAZOWANIA**

Podstawowymi produktami TerraSAR-X są obrazy radarowe o niespotykanej dotychczas jakości. System będzie pracował w 4 trybach:

● obrazowania szeregu (*Stripmap Mode – SM*),

● „punktowym” wysokiej rozdzielczości (*High Resolution Spotlight Mode – HS*),

● „punktowym” (*Spotlight Mode – SL*),

● skanowania (*ScanSAR Mode – SC*).

Tabela 2 zawiera zbiorcze parametry użytkowe tych trybów, a rysunek 2 przedstawia ideę ich geometrii.

● **Tryb obrazowania szeregu** (*Stripmap Mode – SM*) jest trybem podstawowym, znanym m.in. z systemu ERS. Pas terenu jest opromieniowywany sekwencją pulsów przez nieruchomą antenę (stały kąt orientacji w kierunku zasięgu i azymutalnym – kierunku orbity). Maksymalna długość obrazowanego pasa jest limitowana przez zużycie energii.

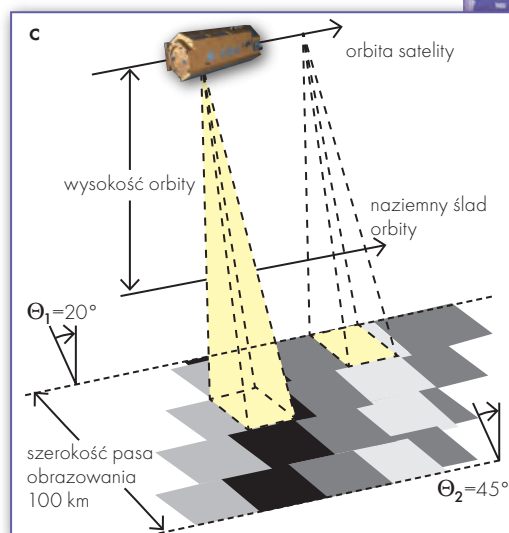
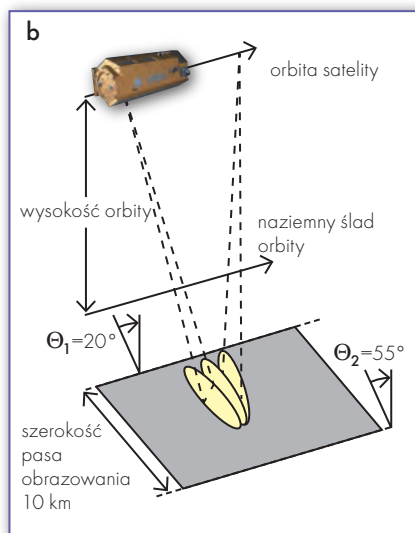
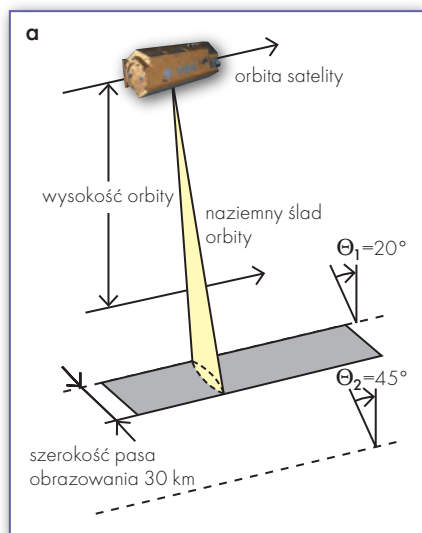
(tabela 2 i rysunek 2).

● **Obrazowanie w trybie „punktowym”** (*Spotlight Mode*) pozwala uzyskać dużą rozdzielczość dzięki elektrycznemu sterowaniu (obraccaniu) wiązki w kierunku azymutalnym (tj. kierunku orbity).

TAB. 2. ZBIORCZE PARAMETRY TRYBÓW OBRAZOWANIA SYSTEMU TERRASAR-X

Tryb obrazowania	Obszar obrazowania (dł. x szer.)	Rozdzielczość (kier.azym. x kier. zasięgu)	Polaryzacja	Zakres kątów padania
Punktowy HR	5 km x 10 km	1,0 m x (1,5-3,5 m)	pojedyncza, podwójna, poczwórna ¹⁾	20-55°
Punktowy SL	10 km x 10 km	2,0 m x (1,5-3,5 m)	pojedyncza, podwójna, poczwórna ¹⁾	20-55°
Szeregowy SM	≤1650 km x 30 km	3,0 m x (1,7-3,5 m)	pojedyncza	20-45°
Szeregowy SM	≤1650 km x 15 km	6,0 m x (1,7-3,5 m)	podwójna, poczwórna ¹⁾	20-45°
Skanowania SC	≤1650 km x 100 km	16,0 m x (1,7-3,5 m)	pojedyncza, podwójna, poczwórna ¹⁾	20-45°
Punktowy HR ¹⁾ (eksperymentalnie 300 MHz)	5 km x 10 km	1,0 m x (0,6-1,5 m)	pojedyncza ¹⁾ , podwójna ¹⁾ , poczwórna ¹⁾	20-55°
Szeregowy SM ¹⁾ (anteną w trybie podwójnym)	≤1650 km x 30 km	1,5 m x (1,7-3,5 m)	pojedyncza ¹⁾ , podwójna ¹⁾ , poczwórna ¹⁾	20-45°

Uwaga: ¹⁾ - opcja eksperymentalna



2. Zasięgi obrazowania satelitarnego systemu radarowego TerraSAR-X: a - w trybie szeregowym, b - w trybie „punktowym”, c - w trybie skanowania

mi kątami. W przypadku TerraSAR-X system opromieniowuje i obrazuje cztery równoległe pasy terenu z niewielkim wzajemnym pokryciem, dające wynikowy pas obrazowania o szerokości 100 km (tabela 2 i rysunek 2).

● PRODUKTY I ICH ZASTOSOWANIA

Pozyskiwane obrazy umożliwią wytworzenie wielu produktów pochodnych i opracowań:

- Obrazy ortorektyfikowane – ORI^{SAR} (*Orthorectified Image*).
- Ortorektyfikowane mozaiki – MC^{SAR} (*Mosaic*).
- Obrazy orientowane – OI^{SAR} (*Oriented Image*) – mozaiki „docięte” do standardowego arkusza mapy.
- Połączenie obrazów tego samego terenu z orbity wstępującej i zstępującej – ADM^{SAR} (*Ascending-Descending Merge*) – pozwala wyeliminować tzw. cienie radarowe pozbawione treści.
- Ortomapy – OM^{SAR} (*Orthomap*) – ortobrazy w kroju arkuszowym z ramką i legendą.
- Mapy zmian – CD^{SAR} (*Change Detection Map*) – mapy długookresowych zmian terenu określonych na podstawie interferometrii z wielokrotnych przelotów.
- Mapy osiadania gruntu – SUB^{SAR} (*Subsidence Map*) – mapy długookresowych zmian wysokości powierzchni terenu spowodowanych np. intensywną eksploatacją górniczą.
- Numeryczny model pokrycia terenu (NMPT) – na podstawie interferometrii z wielokrotnych przelotów satelity (patrz „Radarowa misja promu kosmicznego Endeavour”, GEODETA 8/2000).

- Wektorowe mapy topograficzne odpowiadające przedziałowi skal od 1:250 000 do 1:10 000.

- Mapy użytkowania i mapy pokrycia terenu.

Niezależność obrazowania radarowego od pogody czyni je bardzo użytecznym. Wysoka rozdzielczość przestrzenna i czasowa (częstotliwość obrazowania) systemu TerraSAR-X pozwala na precyzyjne zaplanowanie czasu rejestracji interesującego obszaru. Dla niektórych zastosowań jest to cecha krytyczna, przesądzająca o przydatności obrazów. Obrazy i ich opracowania znajdują zastosowanie w wielu sektorach, m.in.:

- bezpieczeństwo publiczne i obronność,

- monitorowanie obszarów nawiedzonych klęskami żywiołowymi (powodzie, pożary, huragany itp.),

- ocena ryzyka i rynek ubezpieczeń,

- planowanie przestrzenne,

- leśnictwo,

- rolnictwo (kontrola upraw, precyzyjne rolnictwo),

- geologia,

- gospodarka morska,

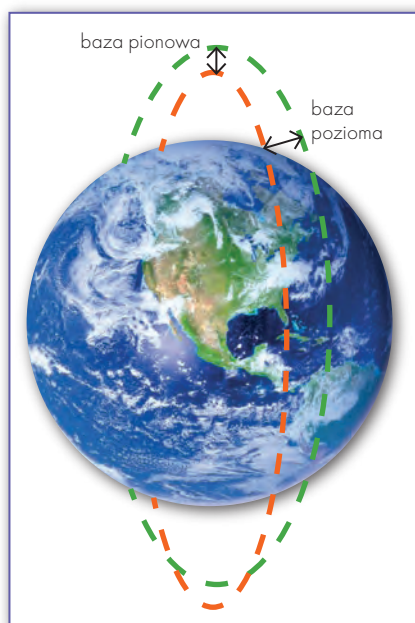
- kartografia.

● KONCEPCJA TANDEM-X

W dwa lata po wystrzeleniu pierwszego satelity Terra SAR-X planuje się umieszczenie na orbicie bliźniaczego systemu TANDEM-X (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement). Głównym celem misji TANDEM-X jest generowanie NMT o zasięgu globalnym i jakości odpowiadającej standardowi DTED-3 (Digital Terrain Elevation Data).

Dotychczas zaistniało kilka satelitarnych systemów obrazowania zarówno w zakresie optycznym, jak i mikrofalowym, umożliwiających opracowanie NMT o różnej jakości i różnym zasięgu terytorialnym. Rysunek 4 pokazuje ważniejsze z nich w funkcji skali pokrycia globu oraz jakości danych według standardu NIMA (National Imagery and Mapping Agency, USA).

Jednym z ważniejszych programów budowy NMT o zasięgu globalnym była Radarowa Misja Topograficzna (SRM) Promu Kosmicznego (patrz GEODETA 8/2000). Z wykorzystaniem interferometrii z jednej orbity uzyskano dane wysokościowe w standardzie DTED-1 i DTED-2 (rozdzielczość 30 m, względna dokładność wysokościowa 5 m). Ograniczenia dokładności pozyskiwanych da-



3. Konfiguracja orbit systemu TanDEM-X

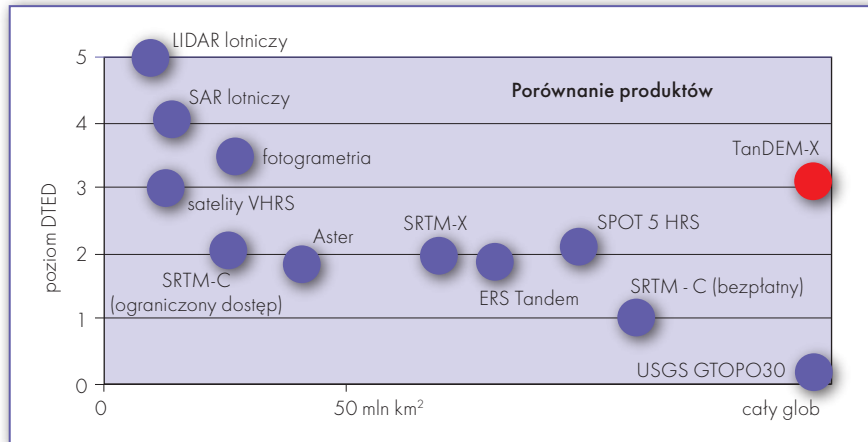
nych wynikały głównie z powodu ograniczonej długości bazy interferometru. Tego ograniczenia nie będzie w konfiguracji TanDEM-X. Realizacja konfiguracji TanDEM-X pozwoli pokryć cały glob danymi w standardzie DTED-3 (rozdzielczość 10 m, względna dokładność wysokościowa 1 m). Należy zauważyć, że idea interferometrii jest możliwa również tylko z jednym satelitą (tzw. interferometria z wielokrotnych przelotów). Interferują wówczas obrazy pozyskane z różnych orbit, a więc w różnym czasie. Ten czynnik bardzo zakłóca wynikowy interferogram. Tej wady pozbawiona jest tzw. interferometria z jednej orbity, gdzie oba obrazy pozyskiwane są w tym samym czasie, w identycznych warunkach.

Oba satelity będą umieszczone na dwóch, bardzo zbliżonych orbitach, a same satelity będą blisko siebie i łącznie utworzą bazę interferometru. Położenie każdego z satelitów na orbicie będzie można w niewielkim stopniu korygować, zmieniając doraźnie długość bazy i jej orientację w przestrzeni. Poprzez zmianę składowej poprzecznej bazy (w wyniku zmiany położenia węzłów wstępujących orbity) i składowej pionowej bazy (poprzez zmianę ekscentru orbit) będzie można optymalizować długość i orientację bazy interferometru dla potrzeb różnych aplikacji. Da to w rezultacie możliwość tzw. interferometrii wzdłuż i w poprzek orbity.

Wyróżnia się dwa tryby wzajemnej konfiguracji satelitów (rys. 5):

● **Tryb podstawowy bistatyczny (bi-static mode).**

- Baza wzdłuż orbity: poniżej 2 km.
- Baza w poprzek orbity: 300 m – 1 km.
- Tylko jeden z satelitów jest aktywny



4. Ważniejsze źródła danych wysokościowych (lotnicze i satelitarne). Oś pozioma: stopień pokrycia danymi w skali globalnej, oś pionowa: jakość NMT wg standardu NMA. Na tym tle wyróżniono pokrycie danymi wg koncepcji TanDEM-X, która umożliwia wytworzenie NMT o zasięgu globalnym w standardzie DTED-3

(transmitujący sygnał), odbierają obydwa.

● **Tryb monostatyczny „tropiący” (persuit monostatic mode).**

- Baza wzdłuż orbity: 30-50 km.
- Obydwa satelity operują niezależnie.

Przykłady zastosowań interferometrii w poprzek orbity (Across-Track Interferometry):

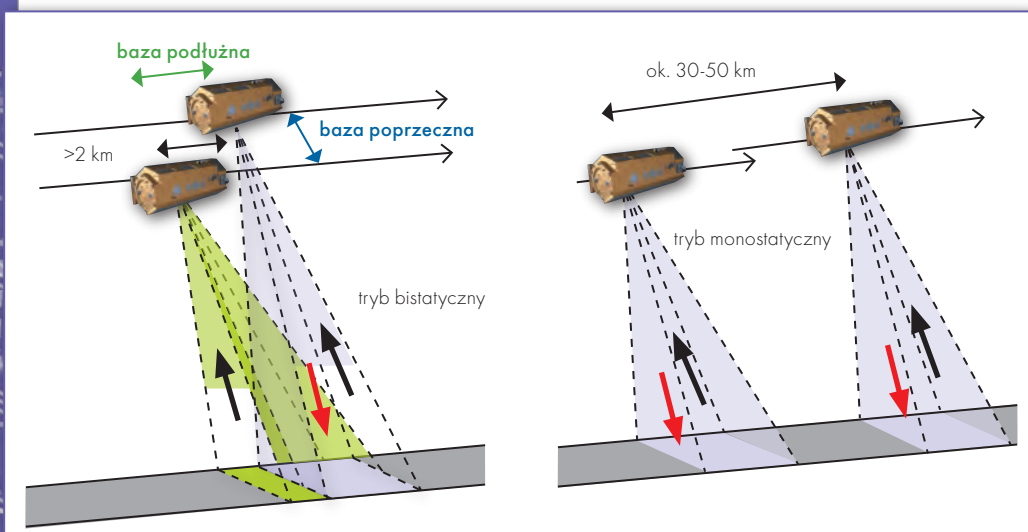
- budowa precyzyjnego NMT o zasięgu globalnym,
- hydrografia (lód i śnieg, obszary klimatu wilgotnego, powódzie),
- geologia (kartowanie geologiczne, tektonika, wulkany),
- środowisko (obszary zurbanizowane, kłęski żywiolowe, zarządzanie w sytuacjach kryzysowych, nawigacja, archeologia, detekcja zmian),
- odnawialne zasoby (mapy użytkowania terenu, rolnictwo, leśnictwo),
- oceanografia (wiatry i falowanie,

dynamika oceanu, lód morski, detekcja statków).

Przykłady zastosowań interferometrii wzdłuż orbity (Along-Track Interferometry):

- oceanografia (kartowanie prądów morskich, badanie falowania oceanu, kartowanie strefy brzegowej),
- detekcja ruchomych celów (monitorowanie ruchu na lądzie i morzu),
- glaciologia (dryft lodu).

Koncepcja TanDEM-X nie jest jedynym pomysłem na najbliższe lata. Podobny cel, tj. budowę precyzyjnego NMT o zasięgu globalnym, ma również „Interferometric CartWheel”. Planuje się go jednak osiągnąć w inny sposób. Konstelację stanowiłby jeden satelita z aktywnym systemem radarowym oraz 3 pasywne mikrosatelity na nieco różnych orbitach. Utworzyłyby to poziomą i pionową składową bazy interferometru. Koncepcja ta jest rozwijana przez Niemieckie Centrum Kosmiczne (DLR) i francuskie centrum CNES (Centre National d'Etudes Spatiales). Proponuje się różne szczegółowe konfiguracje CartWheel. Koncepcja ta jest postrzegana jako możliwy komponent już istniejących lub planowanych systemów radarowych, pracujących w pasmach L, C lub X (np. TerraSAR-X, Envisat, COSMO-SkyMed).



5. Konfiguracje bazy interferometru systemu TanDEM-X

Dr hab. ZDZISŁAW KURCZYŃSKI
jest pracownikiem naukowym
WGIK Politechniki Warszawskiej