



Projekt TanDEM-X radarowych obserwacji powierzchni Ziemi prowadzonych z pułapu satelitarnego — założenia i status misji

JERZY WIŚNIEWSKI

Wojskowe Centrum Geograficzne,
Al. Jerozolimskie 97, 00-909 Warszawa, jerzy.wisniowski@wp.pl

Streszczenie. TanDEM-X jest projektem Niemieckiego Centrum Kosmicznego — DLR (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) — zastosowania wysokiej rozdzielczości interferometrii SAR. Otwiera on nową erę w dziedzinie teledetekcji opartej na satelitarnej technologii radarowej. System bazuje na dwóch satelitach: TerraSAR-X i TanDEM-X, poruszających się po bliskich sobie, ściśle kontrolowanych orbitach. Artykuł zawiera krótki opis techniki radarowej i koncepcji misji TanDEM-X bazującej na innowacyjnych technologiach. Głównym zadaniem projektu jest wygenerowanie z interferometrycznych obserwacji radarowych globalnego numerycznego modelu wysokości (DEM) z nieosiągalną dotąd dla produktu o globalnym zasięgu dokładnością równą lub lepszą od standardu HRTI-3 (rozdzielczość terenowa $12\text{ m} \times 12\text{ m}$, względny błąd wysokości $\pm 2\text{ m}$ w terenie o nachyleniu $< 20\%$ oraz $\pm 4\text{ m}$ w terenie o nachyleniu $> 20\%$ [8]). Misja zapewnia również platformę badawczą nowych technik obrazowania radarowego i aplikacji.

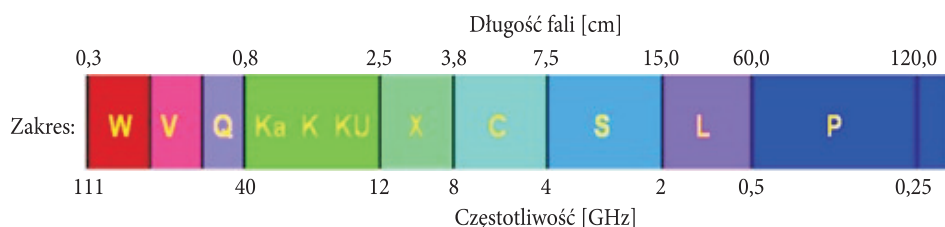
Słowa kluczowe: teledetekcja, Bistatic SAR, DEM, formacja Helix, interferometria radarowa SAR, HRTI-3, synchronizacja

DOI: 10.5604/12345865.1145415

1. Wstęp

Początek prac dotyczących radarów sięga końca XIX wieku, kiedy to niemiecki fizyk Heinrich Hertz zweryfikował teorię pola elektromagnetycznego autorstwa Jamesa C. Maxwella. Do swych prac zastosował urządzenie podobne do współczesnych radarów impulsowych. Znaczący rozwój technologii radarowej nastąpił przed II wojną światową i w jej trakcie. W Wielkiej Brytanii do konstrukcji panoramicznej

stacji obserwacji okrężnej wykrywania obiektów i pomiaru odległości do nich zastosowano koncepcję RADARu (*Radio Detection and Ranging*). Nowe generatory pola elektromagnetycznego dużej częstotliwości i mocy pozwoliły na zmniejszenie wymiarów urządzeń, co umożliwiło montowanie ich na pokładach samolotów [28]. W latach pięćdziesiątych na samolotach zastosowano radary bocznego wybierania SLAR (*Side Looking Airborn Radar*). Jest to system aktywny wysyłający wiązkę promieniowania mikrofalowego oświetlającą teren i odbierającą powracającą część



Rys. 1. Zakresy mikrofalowe stosowane w systemach SLAR [17, 18]

promieniowania odbitego od powierzchni Ziemi. Źródło impulsów oparte jest na generatorze mikrofalowym w zakresie długości fal $0,3 \text{ cm} < \lambda < 120 \text{ cm}$.

Cechą charakterystyczną tego promieniowania jest jego praktyczna niezależność od warunków pogodowych. Chmury, mgła, śnieg i inne zjawiska atmosferyczne nie stanowią dla tego promieniowania przeszkody. Ponadto systemy radarowe należą do systemów aktywnych. Obserwacje realizowane są na drodze pomiaru echa sygnału własnego. Wynika z tego ważna cecha technologii radarowej polegająca na niezależności od zewnętrznych warunków oświetleniowych obserwowanego terenu. Niezależność od warunków pogodowych, oświetleniowych i coraz większe dokładności pomiarów decydują o szerokich możliwościach stosowania systemów radarowych w teledetekcji i generowaniu numerycznych modeli wysokości.

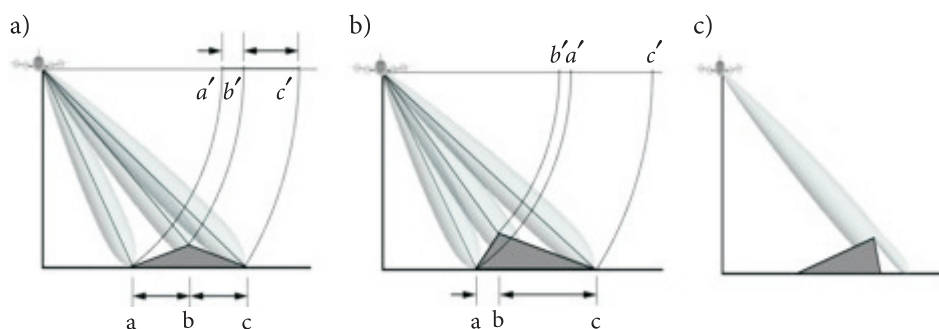
2. Radar bocznego wybierania SLAR

Ze względu na rodzaj anteny wyróżniamy dwa typy systemów SLAR:

- radar bocznego wybierania z anteną rzeczywistą RAR (*Real Aperture Radar*),
- radar bocznego wybierania z anteną syntetyzowaną SAR (*Synthetic Aperture Radar*).

Pierwszy z nich ma już znaczenie historyczne. Antena tego systemu wysyła w kierunku poprzecznym do ruchu samolotu silny, krótki impuls mikrofalowy. Impuls ten to wiązka szeroka w kierunku poprzecznym do lotu (tak zwany kierunek zasięgu), a wąska w kierunku lotu (kierunek azymutalny). Wiązka dociera najpierw

do najbliższych obiektów terenowych i stopniowo omiata coraz dalsze. Czas powrotu odbitego sygnału do systemu jest różny, zależny bezpośrednio od odległości do obiektów. Samolot, kontynuując lot, wysła kolejny impuls penetrujący sąsiedni pas terenu. Powracające impulsy zapisywane są w postaci linii utworzonej z punktów o różnej jasności zależnej od położenia i charakterystyki elementów terenowych, od których odbijał się sygnał. W kierunku zasięgu linia ta budowana jest z odbić sygnału od najbliższych do najdalszych elementów terenu na zasadzie rzutu nachylonego (*Slant Range*). Właściwości tego typu obserwacji szczególnie w rejonach pofałdowanych i górskich powodują powstawanie błędów pomiaru odległości skośnych. Są to błędy skracania, zamieniania i powstawania cieni [18].



Rys. 2. Błędy pomiarów radarowych: skracanie (a), zamiana (b) i cień (c) [29]

Skracanie (ang. *Foreshortening*) występuje, gdy impuls laserowy dociera najpierw do podstawy wznoszącego się terenu, a następnie do jego szczytu (a). Ponieważ mierzona jest odległość skośna, to odcinek pochyłej $a-b$ na rysunku 2a ulegnie skróceniu, dając na obrazie zafałszowaną jego długość $a'-b'$.

Zamiana (ang. *Layover*) występuje w czasie pomiaru wysokich obiektów terenu. Występuje w sytuacji, gdy impuls radarowy najpierw dociera do wierzchołka obiektu, a później do jego podstawy (b). W rezultacie na rysunku 2b obserwujemy zamienienie kolejności punktu a z punktem b , co daje odcinek $b'-a'$.

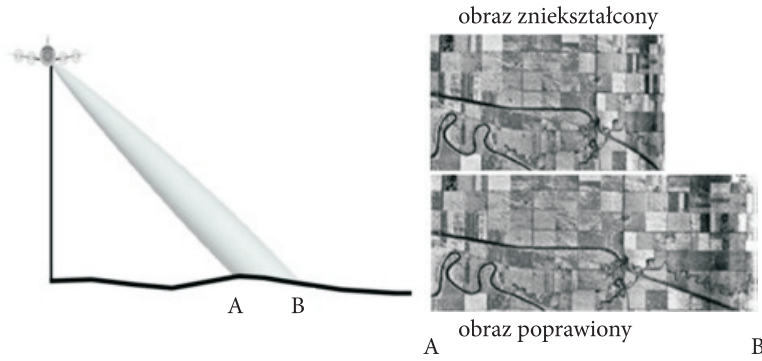
Cień (ang. *Shadow*) występuje wtedy, gdy dla danej geometrii obserwacji zbocze przed radarem przesłania zbocze opadające (c), co ilustruje rysunek 2c.

Innym negatywnym efektem rzutowania nachylonego w zobrazowaniach radarowych jest zjawisko dystorsji skali, polegające na zmianie skali odwzorowania. Obraz w kierunku zasięgu tworzony jest proporcjonalnie do czasu powrotu sygnału odbitego od terenu. Skala jest najmniejsza na początku obrazowanego pasa terenu, a rośnie dla odbić dalszych. Na podstawie znanych elementów geometrycznych obrazowania radarowego zniekształcony obraz można poprawić. Zjawisko to ilustruje rysunek 3.

Ważnym elementem wpływającym na sposób odbicia i rozpraszania fali elektromagnetycznej jest polaryzacja sygnału sondującego. Zgodnie z właściwością

promieniowania elektromagnetycznego mówimy o polaryzacji poziomej (H) i pionowej (V). Mogą zachodzić cztery sytuacje:

- kombinacja HH — zarówno sygnał sondujący (emitowany), jak i odbity polaryzowane są w płaszczyźnie poziomej,
- kombinacja VV — obydwa sygnały polaryzowane są w płaszczyźnie pionowej,
- kombinacja HV — sygnał emitowany polaryzowany jest w płaszczyźnie poziomej, odbity w płaszczyźnie pionowej,
- kombinacja VH — sygnał emitowany polaryzowany jest w płaszczyźnie pionowej, zaś odbity w płaszczyźnie poziomej.



Rys. 3. Błędy pomiarów radarowych: dystorsja skali [29]

Jakość pozyskiwanych danych radarowych bezpośrednio zależy od zdolności systemu do rozróżniania jako osobnych obiektów położonych blisko siebie. Dla obserwacji SLAR rozpatruje się osobno rozróżnialność obiektów dla kierunku zasięgu i dla kierunku azymutalnego [11, 29]. Dla kierunku zasięgu dwa obiekty zobrazowane zostaną jako oddzielne, jeśli różnica odległości między statkiem powietrznym a rozpatrywanymi obiektami będzie większa od połowy długości impulsu radarowego.

Rozróżnialność dla kierunku zasięgu w projekcji nachylonej wyrażona jest formułą (R_r na rysunku 4):

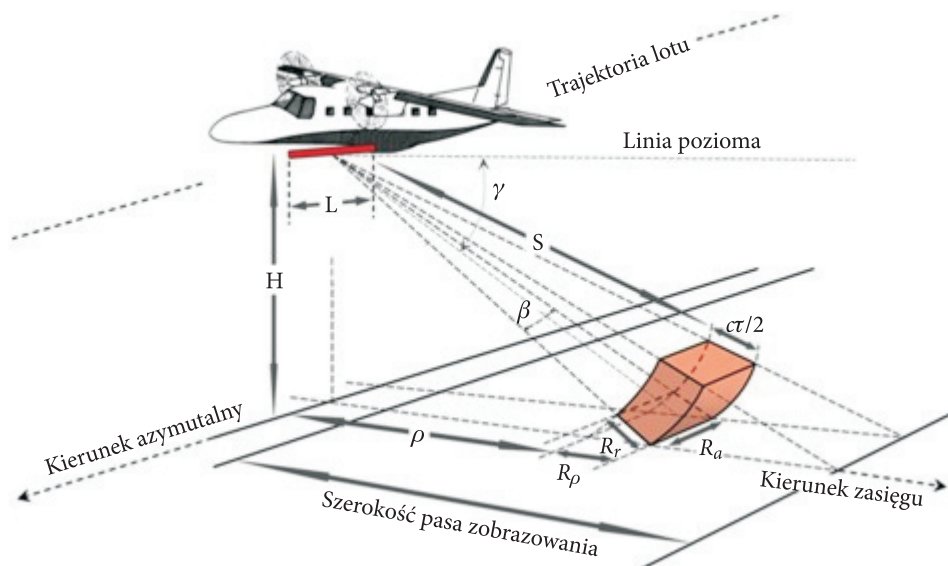
$$R_r = \frac{c * \tau}{2}, \quad (1)$$

zaś dla projekcji poziomej (R_ρ na rysunku 4):

$$R_\rho = \frac{c * \tau}{2 \cos \gamma}, \quad (2)$$

gdzie: R_r — rozróżnialność w kierunku zasięgu w projekcji nachylonej;
 R_ρ — rozróżnialność w kierunku zasięgu w projekcji poziomej;

c — prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych
 ($c = 299792458$ m/s);
 τ — czas trwania impulsu;
 γ — kąt depresji (pomiędzy linią poziomą a kierunkiem wysłania impulsu).



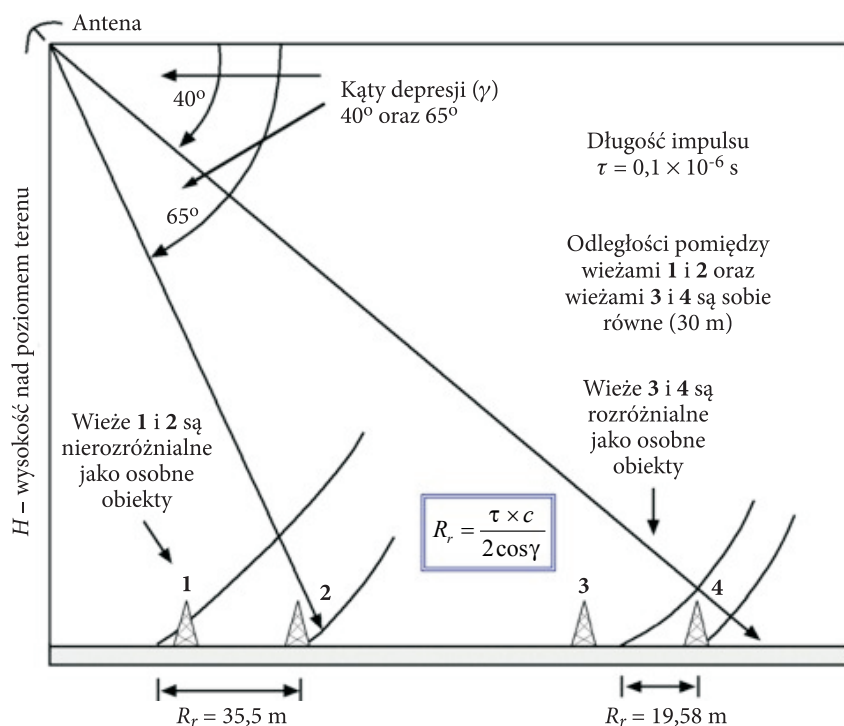
Rys. 4. Elementy geometryczne obserwacji SLAR do wyznaczenia zdolności rozdzielczej w kierunku zasięgu i w kierunku azymutalnym [11]

Z formuły (2) wynika, że jeżeli kąt depresji γ zbliża się do 90° , to wartość R_ρ rośnie do nieskończoności, a dla $\gamma = 90^\circ$ jest nieoznaczone. Oznacza to, że w miarę zbliżania się do śladu naziemnego linii trajektorii lotu maleje rozróżnialność bliskich obiektów jako osobnych elementów. Ilustruje to rysunek 5, na którym przedstawiono przykład dla wybranych kątów depresji i długości impulsu radarowego. Z dalszej analizy tej formuły wynika, że zwiększenie rozróżnialności w kierunku zasięgu może nastąpić poprzez skrócenie czasu impulsu. Ze względu na zapewnienie wymaganej jego mocy nie może on być jednak zbyt krótki (zwykle 0,01-0,1 μ s) [1, 11].

Rozróżnialność w kierunku azymutalnym (r_a na rysunku 3) wyrażona jest formułą:

$$R_a = S \times \frac{\lambda}{L}, \quad (3)$$

gdzie: R_a — rozróżnialność w kierunku azymutalnym;
 S — odległość nachylona do obiektu;
 λ — długość fali;
 L — długość anteny.

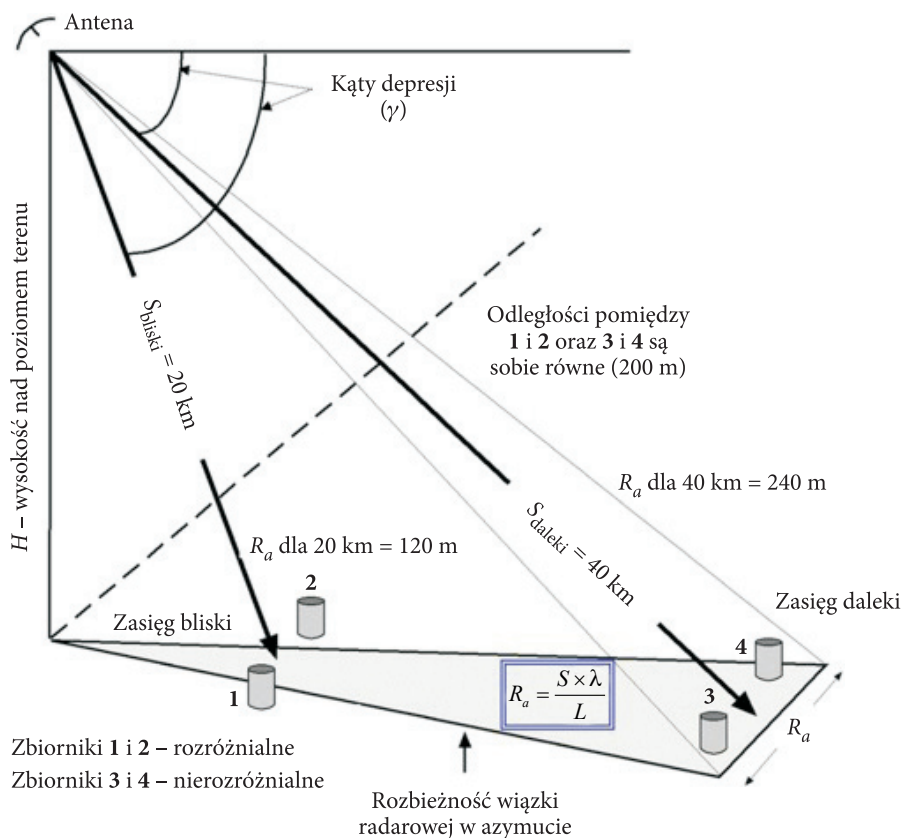


Rys. 5. Przykład wyznaczenia rozróżnialności obiektów jako osobnych na obrazach radarowych dla kierunku zasięgu

Zdolność rozróżniania obiektów w kierunku azymutalnym została przedstawiona na rysunku 6. W podanym przykładzie przyjęto długość fali promieniowania radarowego $\lambda = 3 \text{ cm}$, długość anteny $L = 5 \text{ m}$, odległość skośną antena — obiekty bliższe $S_{1,2} = 20 \text{ km}$ i do celu dalszego $S_{3,4} = 40 \text{ km}$. Pomiędzy obiektami 1-2 oraz 3-4 jest taka sama odległość równa 200 m. Otrzymujemy odpowiednio R_a obiektów bliższych 120 m a dalszych 240 m. Zatem para 1-2 w obrazie radarowym jest dwoma oddzielnymi obiektami 1 i 2, gdy para 3-4 w obrazie jest jednym obiektem. Rozdzielczość rozumiana jako możliwość rozróżniania odrębnych obiektów wzrasta wraz ze zwiększaniem długości anteny i stosowaniem krótszych fal. Obydwa te czynniki mają swoje granice.

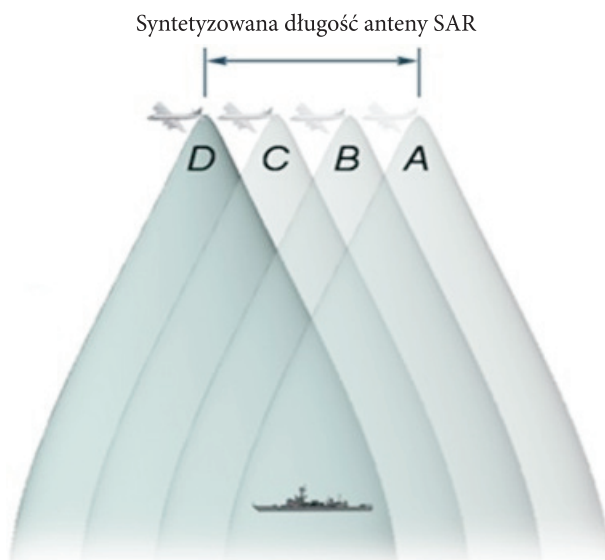
Dotychczas stosowane na samolotach systemy SLAR działały z antenami długości nie większej niż 5 m. Zakres promieniowania mikrofalowego jest ściśle określony (rys. 1).

Sytuacja, w której z systemów SLAR z rzeczywistą anteną nie można było uzyskać lepszej rozdzielczości, zmusiła do szukania innych rozwiązań. Wyjściem okazały się systemy pracujące z tak zwaną anteną syntetyzowaną.



Rys. 6. Przykład wyznaczenia rozróżnialności obiektów jako osobnych na obrazach radarowych dla kierunku azymutalnego

Radar boczny wybierania z anteną syntetyzowaną SAR (*Synthetic Aperture Radar*) jest systemem wyposażonym w stosunkowo krótką antenę fizyczną wysyłającą ze stałym interwałem czasowym impulsy. Jak pokazano na rysunku 7, antena SAR emituje impulsy w dość szerokiej w azymucie wiązce z wysoką powtarzalnością. Skutkuje to tym, że każdy element terenu jest wielokrotnie oświetlany wiązką, a odbicia rejestrowane. Efekt jest taki, jakby rejestracja nastąpiła dla anteny fizycznej o długości równej drodze syntetyzowania odbić sygnałów [18]. Na powyższym rysunku droga syntetyzowania jest równa odcinkowi A-D. Ta prosta idea pozyskiwania lepszej rozdzielczości danych obserwacyjnych okupiona jest jednak złożonością ich opracowania. Dane te opracowuje się z zastosowaniem teorii dyfrakcji i interferencji mikrofalowej. Do rekonstrukcji obiektów stosowany jest zapis ich obrazu holograficznego. System z syntetyzowaną anteną SAR wysyła sygnały spójne, a odbiera fazy i amplitudy sygnałów odbitych. Odbicia te interferują ze sobą, tworząc tzw. **hologram mikrofalowy** albo **obraz pierwotny**. Jego skomplikowana



Rys. 7. Sumaryczna długość anteny SAR [18]

obróbka pozwala uzyskać wynikowy obraz radarowy (**wtórny**) o rozdzielczości na poziomie submetrowym. Taki efekt w systemie SLAR z anteną rzeczywistą wymagałby stosowania anteny o długości setek metrów.

Skonstruowanie radaru bocznej obserwacji SLAR z anteną syntetyzowaną pozwoliło na umieszczenie tych systemów na orbitach satelitarnych [11]. W latach 1978-1994 działały systemy eksperymentalne. NASA umieściła na orbicie satelitę Seasat-1 i serię satelitów SIR (A, B i C). Pierwszy operacyjny satelita radarowy ERS-1 został umieszczony na orbicie w 1991 roku. Systemy SAR montowane były na satelitach lub na pokładach promów kosmicznych.

TABELA 1

Pierwsze satelitarne systemy radarowe SAR [10]

Systemy Eksperymentalne				
Satelita	Seasat-1 NASA	SIR-A NASA	SIR-B NASA	SIR-C NASA
Na orbicie od	1978	1981	1984	1994
Pasmo nadawania	L	L	L	X, C, L
Szerokość pasa [km]	100	40	10÷60	15÷90
Rozdzielczość w kierunku zasięgu [m]	25	40	15÷45	15÷45
Rozdzielczość w kierunku azymutu [m]	25	40	25	25

cd. tabeli 1

Systemy Operacyjne					
Satelita	ERS-1 ESA	JERS-1 Japonia	ERS-2 ESA	Radarsat-1 Kanada	Envisat ESA
Na orbicie od	1991	1992	1995	1995	2002
Pasma nadawania	C	L	C	C	C
Szerokość pasa [km]	100	75	100	45÷510	58÷405
Rozdzielczość w kierunku zasięgu [m]	30	18	30	10÷100	30÷150
Rozdzielczość w kierunku azymutu [m]	30	18	30	9÷100	30÷150

2. SAR w generowaniu globalnego modelu wysokościowego Ziemi

Satelitarna Interferometria Radarowa jest obecnie najczęściej stosowaną metodą przetwarzania satelitarnych obrazów radarowych pozyskanych z systemów SAR, wykorzystywaną operacyjnie do badania ukształtowania powierzchni Ziemi. Jest to metoda teledetekcyjna wykorzystująca wzajemne przesunięcia fazy sygnału dwóch zobrażeń SAR tego samego obiektu wykonanych z nieznacznie różnych pozycji. W oparciu o różnice fazy odpowiadających sobie sygnałów radarowych z kolejnych zobrażeń SAR uzyskuje się informację o wartościach względnych terenu lub ich zmianach w czasie. Pierwszy raz metodę interferometrii radarowej do pozyskania globalnego numerycznego modelu wysokości DEM z pułapu satelitarnego zastosowano w trakcie Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) promu ENDEAVOUR [11]. Anteny zamontowane na promie i wysięgniku o bazie 60 m pozwoliły na uzyskanie DEM dla lądów pomiędzy 56° szerokości geograficznej południowej a 60° szerokości geograficznej północnej. Produkt ten dla ponad 80% lądów naszego globu spełnia standard DTED-2, cechujący się błędem względnym ± 12 m dla wysokości punktów w siatce $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ [6, 7].

3. Projekt TanDEM-X

Wzrastające wymagania użytkowników cyfrowych modeli terenu wymusiły powstanie globalnego DEM na wyższym poziomie dokładności niż uzyskana w misji SRTM. Realizacji tego zadania podjęło się DLR — Niemieckie Centrum Kosmiczne (*German Aerospace Center*) z partnerami EADS Astrium GmbH oraz Infoterra GmbH. Koncepcja misji bazuje na dwóch satelitach radarowych TerraSAR-X (TSX) i TanDEM-X (TDX) orbitujących w bliskiej formacji. Konstrukcja

satelitów i parametry orbit zapewniają działanie zespołu jako jednoprzebiegowego interferometru SAR z opcją zmiany długości bazy między satelitami.

3.1. Satelita TerraSAR-X

Jako pierwszy na orbicie okołobiegunowej, heliocentrycznej 15 czerwca 2007 roku umieszczony został satelita TerraSAR-X. Podstawowym sensorem tego teledetekcyjnego satelity jest radar z syntetyczną aperturą z aktywną anteną pracujący na częstotliwości 9,65 GHz (pasmo X, długość fali 3,1 cm) [24, 25].

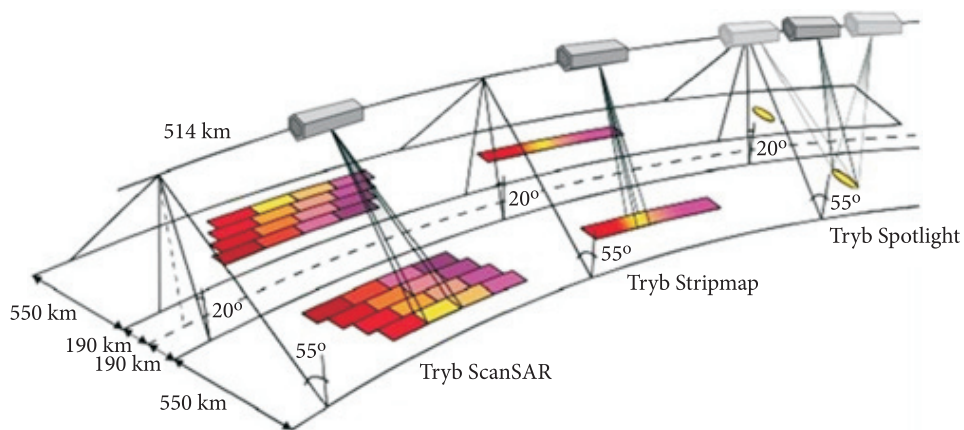


Rys. 8. Satelita TerraSAR-X (TSX)

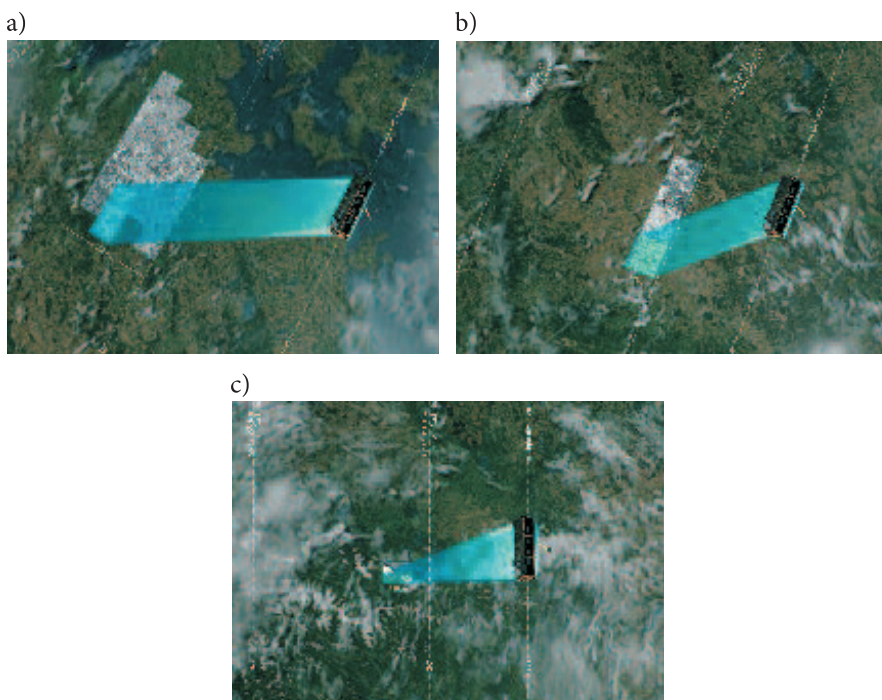
W tym czasie TSX wykonywał obserwacje radarowe w trybach: Stripmap (SM), Spotlight (SL), Spotlight wysokiej rozdzielczości (HS) i ScanSAR. Obserwacje z tego okresu miały zastosowanie głównie w testowaniu aparatury pokładowej, ale również służyły do badań szczegółowych, jak na przykład do monitorowania natężenia ruchu, tworzenia map terenów powodziowych i innych projektów [15, 20].

Tryb ScanSAR pozwala na przekraczanie limitu dotyczącego szerokości obrazowanego pasa terenu. Szeroki pas zobrazowania uzyskuje się przez jednoczesne skanowanie węższych pasm (do 4, jak na rysunku 10a), każde z pasm z innym kątem padania wiązki radarowej. Rozdzielczość wynikowa jest mniejsza niż dla trybu ScanSAR.

W trybie Stripmap radar satelity oświetla teren pod torem lotu powtarzanymi impulsami. Wiązka ustawiona jest w zadanym azymucie i wysokości. Otrzymujemy



Rys. 9. Tryby pracy satelity TerraSAR-X [DLR Portal, 3]



Rys. 10. a) Tryb ScanSAR; b) tryb Stripmap; c) tryb Spotlight

obraz w pasie długości odpowiadającej odcinkowi pokonanemu na orbicie przez satelitę. Typowo kąty padania mieszczą się w przedziale od 20° do 55° .

Tryb Spotlight (HS, SL) pozwala uzyskiwać bardzo wysoką rozdzielczość geometryczną w kierunku lotu satelity. W tym trybie pracy radar przez cały czas

zbierania danych oświetla ten sam obszar (jak na rysunku 10c). Zwielokrotniona liczba pomiarów zwiększa rozdzielczość obrazowania radarowego. Mniejszy jest jednak obszar skanowanego terenu.

TABELA 2

Tryby pracy satelity TerraSAR-X (TSX) [3]

Opis\Tryb pracy	Stripmap (SM)	Spotlight (HS, SL)	ScanSAR (SC)
Szerokość pola	30 km (polaryzacja pojedyncza) 15 km (polaryzacja podwójna)	10 km przy 150 MHz w azymucie 5/10 km	100 km (tylko pojedyncza polaryzacja)
Zakres kątowy	20°÷45°	20°÷55°	20°÷45°
Rozdzielczość w azymucie	3,3 m (polaryzacja pojedyncza) 6,6 m (polaryzacja podwójna)	1,1 m /2,2 m (HS polaryzacja pojedyncza/ podwójna) 1,7 m /3,4 m (SL pol. pojedyncza/podwójna)	16 m (1 pętla, 4 wiązki)
Rozdzielczość terenowa	1,7-3,5 m Θ [20°÷45°]	1,5-3,5 m Θ [20°÷55°]	1,7-3,5 m Θ [20°÷45°]
Długość pola	50 km	5 km / 10 km	150 km
Polaryzacje: pojedyncza HH, VV; podwójna (HH/VV) (HH/HV), (VV/VH), bez poprzecznej dla trybów pracy SpotLight (SL) i SpotLight wysokiej rozdzielczości (HS)			

3.2. Satelita TanDEM-X

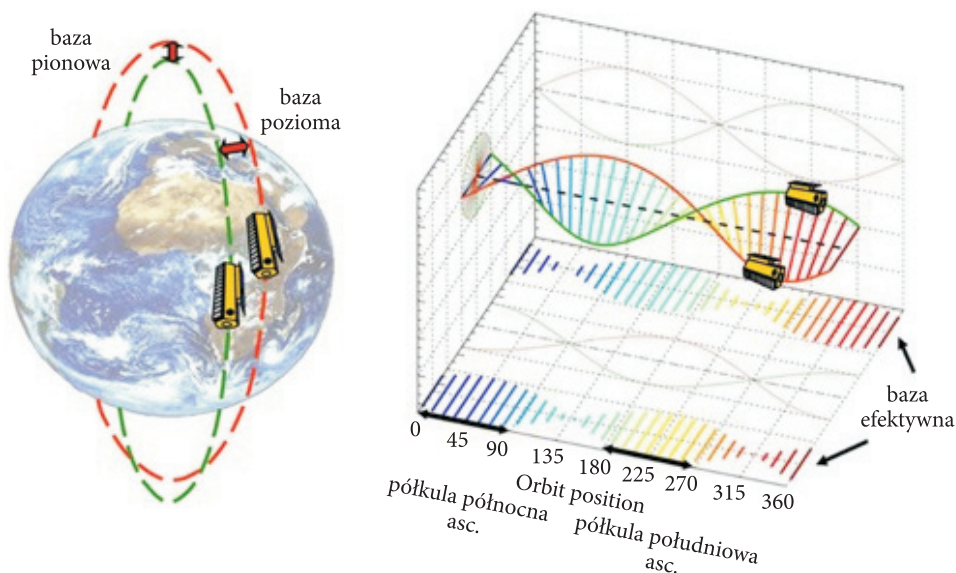
21 czerwca 2010 roku na orbicie zostaje umieszczony drugi z satelitów zespołu obserwacyjnego, TanDEM-X (TDX). Początkowo odległość między tymi satelitami wynosiła 15 700 km. W pierwszej fazie dochodzenia do operacyjności dystans ten zmniejszono do 20 km. Jednocześnie prowadzono testy dotyczące poprawności działania SAR, aparatury pokładowej i procesorów [9]. Sprawdzono współdziałanie satelitów z naziemnymi stacjami zbierania danych obserwacyjnych. System obsługują cztery stacje naziemne zbierania danych położone w Inuvik (Kanada), O'Higgins (Antarktyda), Kirunie (Szwecja) i Neustrelitz (Niemcy). Ich lokalizację przedstawia rysunek 11.

Za operacyjny początek misji przyjmuje się datę 11.10.2010 roku. Przeprowadzona została redukcja odległości między satelitami z 20 km do około 500 m.

Satelita TSX pozostał na swej pierwotnej orbicie, zaś TDX wszedł na orbitę lekko ekscentryczną. Orbity zostały tak dobrane, by nigdy się nie przecinały, zaś satelita TDX wykonywał jeden obrót wokół TSX na pełny 95-minutowy cykl obiegu satelitów wokół Ziemi (patrz rysunek 12). Formacja taka w literaturze fachowej określana jest jako Helix Formation [4].



Rys. 11. Stacje naziemne misji TanDEM-X [26]

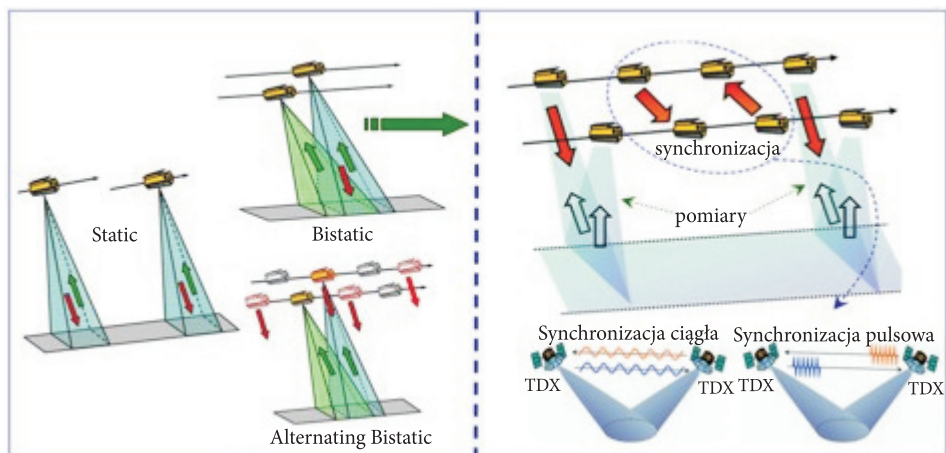


Rys. 12. TSX i TDX tworzące Helix Formation na bliskich orbitach [3, 24]

3.3. Realizacja podstawowego zadania misji TanDEM-X

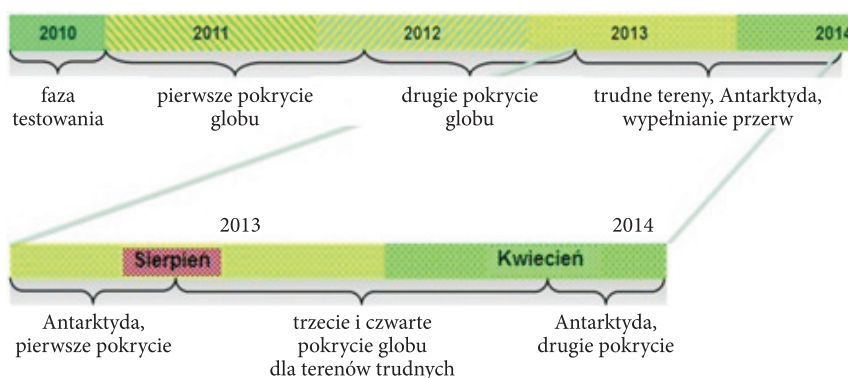
Dobór orbit pozwolił na uzyskanie baz interferometrycznych niezbędnych w obserwacjach radarowych. Pozwolił on wygenerować globalny model wysokościowy z założoną na poziomie HRTI-3 dokładnością. Daje to możliwość stosowania DEM o błędzie względnym wyznaczenia wysokości rzędu ± 2 m i rozdzielczości terenu $12\text{ m} \times 12\text{ m}$ dla całego globu. Ponadto dla wybranych obszarów generowany

jest model wysokościowy spełniający kryteria dokładnościowe standardu HRTI 4, co oznacza, że DEM będzie miał błąd względny wyznaczenia wysokości rzędu ± 2 m i rozdzielczość terenową $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$. Obserwacje w zespole orbitalnym TanDEM-X można prowadzić w trzech trybach pracy: Static, Bistatic i Alternating Bistatic. Podstawowe zadanie misji, wykonanie obserwacji radarowych do generowania globalnego DEM, realizowano, prowadząc obserwacje radarowe Ziemi z satelitów TSX i TDX w trybie Bistatic [5]. W tym trybie obserwacji satelity poruszają się blisko siebie. Jeden z nich emituje impulsy, obydwa rejestrują ich odbicia. Pomiędzy kolejnymi impulsami satelity wykonują synchronizację niezależnych oscylatorów pokładowych (rys. 13 prawy). Jednocześnie z dokładnością 1-2 mm wyznaczone są bazy pomiędzy satelitami [21, 26]. Stosuje się do tego skonstruowane na potrzeby tej misji i zamontowane na pokładach obu satelitów odbiorniki GPS. Postęp zbierania danych obserwacyjnych misji TanDEM-X przedstawia rysunek 14. Zespół orbitalny w czasie swego lotu w fazie operacyjnej zakończył w październiku 2014 roku zbieranie danych dla trzeciego i czwartego pokrycia globu. Podobnie jak opracowanie wyników misji SRTM wygenerowanie Numerycznego Modelu Powierzchni Ziemi z tych danych potrwa kilka lat.

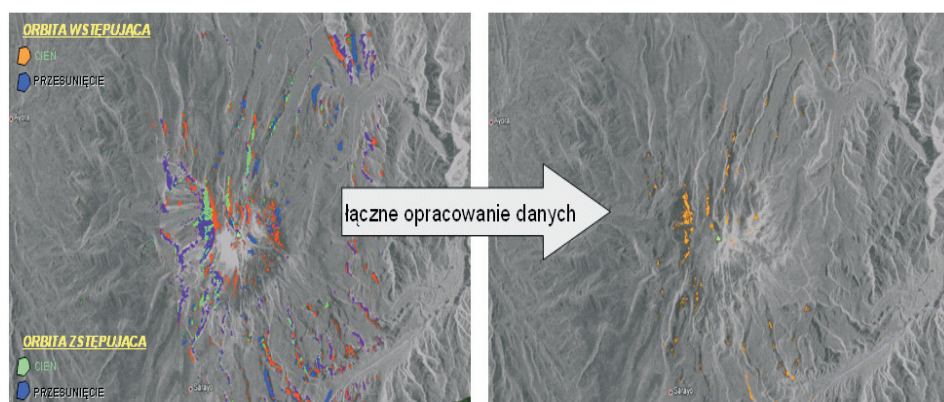


Rys. 13. Obserwacje metodą Bistatic [3, 8, 10, 23]

Dla uzyskania lepszej geometrii obserwacji pozyskiwania danych z terenów trudnych, wypełnienia przerw i drugiego pokrycia Antarktydy, dokonano reorientacji orbity satelity TanDEM-X poprzez zmianę kierunku jego obrotu wokół orbity TSX. Zmiana konfiguracji pozwala na znaczne zniwelowanie typowych błędów pomiarów radarowych: nakładania, skracania i cieni. Realizowane jest to w trakcie wspólnego opracowania danych pozyskanych z orbity wstępującej i zstępującej obserwowanego rejonu. Zmiana formacji została przeprowadzona w sierpniu 2013 roku.



Rys. 14. Harmonogram pozyskiwania globalnego modelu terenu DEM [23]

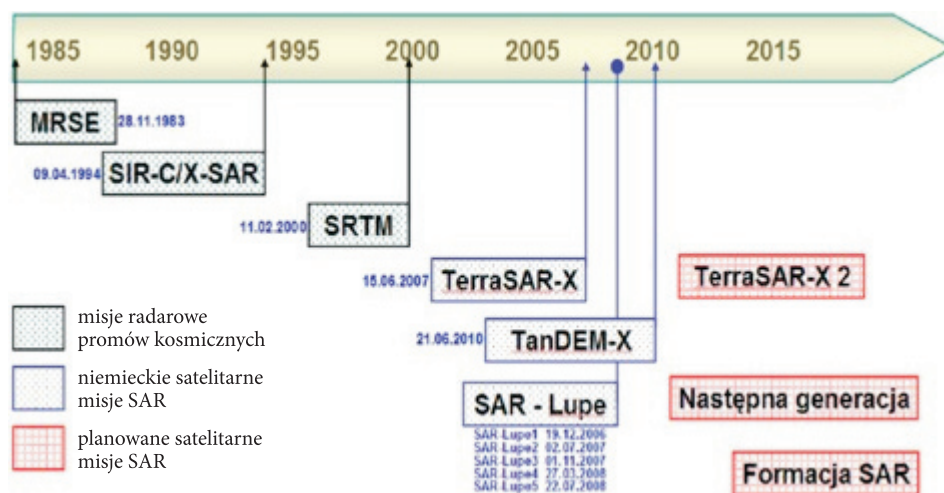


Rys. 15. Niwelowanie błędów pomiarów radarowych przez zmianę konfiguracji orbity i łączne opracowanie danych [22]

4. Stan i perspektywy niemieckiego programu obserwacji radarowych

Udział Niemiec w satelitarnych misjach radarowych został skrótowo przedstawiony na rysunku 16. Niemiecki program zastosowania promieniowania mikrofalowego w teledetekcji zapoczątkowany został na początku lat osiemdziesiątych. W 1983 roku miała miejsce pierwsza misja, w której zastosowano system radarowy na pokładzie promu kosmicznego [11]. Misja MRSE (*Microwave Remote Sensing Experiment*) była początkiem pasma sukcesów zastosowań technologii SAR na promach kosmicznych i satelitach okołoziemskich. Jej kontynuacją były systemy operacyjne lat 90. XX wieku oraz misja SRTM promu ENDEAVOUR z lutego roku 2000.

Dnia 15 czerwca 2007 roku na orbicie znalazł się pierwszy z pary satelitów radarowych programu TanDEM-X Niemieckiego Centrum Kosmicznego. 21 czerwca

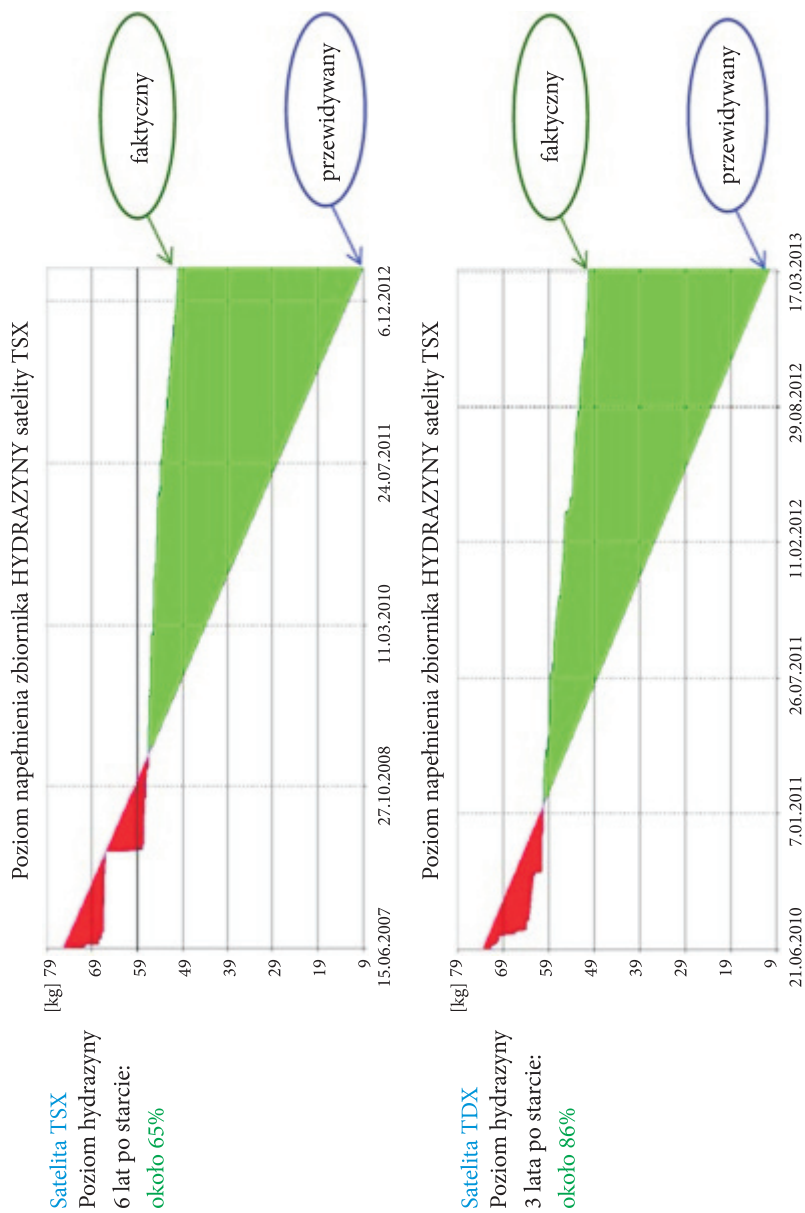


Rys. 16. Status Niemieckich Radarowych Misji Satelitarnych [1, 2, 16]

2010 roku dołączył do niego drugi satelita i od ponad czterech lat zespół satelitarny TSX i TDX realizuje program obserwacji radarowych, którego efektem będzie globalny, wysokiej dokładności DEM. Satelita TSX, którego czas operacyjny był planowany



Rys. 17. Zobrazowanie w trybie Staring Spotlight (góra) i SpotLight (HS) [27]



Rys. 18. Stan zapasu paliwa na satelitach [23]

na pięć lat, jest już ponad siedem lat na orbicie. Widoczna na rysunku 16 formacja SAR-Lupe to pierwsza niemiecka konstelacja radarowych satelitów wywiadowczych. Charakteryzują się one wysoką rozdzielczością obserwacji wynoszącą 0,5 m w trybie punktowym (*spotlight*) w rejonie 5,5 km² i 1 m w trybie pasmowym (*stripmap*) dla pasa obszaru 8 km * 60 km. Od ponad dwóch lat satelity systemu TanDEM-X testują tryb Staring Spotlight pozyskiwania danych wywiadowczych. Uzyskiwana rozdzielczość to 0,25 m dla scen o rozmiarach 4,0 km * 3,7 km.

Zachowane paliwo oraz stan baterii pokładowych obydwu satelitów wystarczy jeszcze na minimum dwa kolejne lata orbitowania i prowadzenia wspólnych obserwacji. Stan paliwa obydwu satelitów ilustruje rysunek 18. Na przełomie września i października 2014 roku satelity te zakończyły misję zbierania danych do generacji globalnego modelu terenu. Zgodnie z oświadczeniem DRL bliska formacja obydwu satelitów została oddalona wzdłuż orbity na odległość 76 km. Pozwoli to na prowadzenie oddzielnych testów i przygotowań do rozpoczęcia od 3 grudnia 2014 roku nowych zadań na orbicie.

Artykuł wpłynął do redakcji 18.06.2014 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 17.12.2014 r.

LITERATURA

- [1] BARTUSCH M., ZINK M., MILLER D., *TanDEM-X Mission Status*, IGARSS 2011, Vancouver, 27 July-2011.
- [2] BARTUSCH M. et al., *The TanDEM-X Mission*, German Aerospace Center (DLR), Space Agency, 53227 Bonn-Oberkassel, Germany, 2006.
- [3] FIEDLER HAUKE et al., *TanDEM-X: A Global Mapping Mission*, Microwaves and Radar Institute, DLR, FIG Working Week, 2008.
- [4] FIEDLER HAUKE et al., *The TanDEM-X Mission: Overview and Status*, Microwaves and Radar Institute, DLR, Oberpfaffenhofen, 29.11.2007.
- [5] FIEDLER HAUKE et al., *The TanDEM-X Mission Proposal*, ISPRS Hannover Workshop, 2005.
- [6] KAZUO OUCHI, *Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics Remote Sensing*, 5, 2013, 716-807.
- [7] KRIEGER G., MOREIRA A., *Spaceborne bi- and multistatic SAR: potential and challenges*, IEE Proceedings — Radar, Sonar and Navigation, vol. 153, issue3, June 2006, 184-198.
- [8] KRIEGER G. et al., *TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 45, no. 11, November 2007.
- [9] KRIEGER G. et al., *TerraSAR-X Tandem*, DLR Technical Note, March 2003.
- [10] KRIEGER G. et al., *The TanDEM-X Mission Concept*, WorldDEM Summit, Köln, 18-Sep-2013.
- [11] KURCZYŃSKI Z., *Lotnicze i satelitarne obrazowanie Ziemi*, tom II, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2006
- [12] MOREIRA A. et al., *Advanced interferometric SAR techniques with TanDEM-X*, Radar Conference, RADAR '08, IEEE, 2008.
- [13] MOREIRA A. et al., *TanDEM-X: TerraSAR-X Add-On for Digital Terrain Elevation Measurements*, Mission Proposal for a Next Earth Observation Mission, DLR Document no. 2003-3472739, Nov. 2003.

- [14] MOREIRA A. et al., *TanDEM-X: A TerraSAR-X Add-On Satellite for Single-Pass SAR Interferometry*, German Aerospace Center (DLR), 2006, 82230 Oberpfaffenhofen, Germany.
- [15] PALUBINSKAS G. et al., *Traffic Monitoring With TerraSAR-X*, Proceedings of the 6th European Radar Conference, Drezno, 2006.
- [16] REINIGER K. et al., *The TanDEM-X Mission Design and Data Acquisition Plan*, DLR, Germany, 2006.
- [17] SAR-Guidebook, sarmap, October 2007.
- [18] www.radartutorial.eu/20.airborne/ab07.html
- [19] www.wipo.int/ipadvantage/en/details.jsp?id=2553
- [20] www/lms.seos-project.eu
- [21] YOUNIS M. et al., *Interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR) Missions Employing Formation Flying*, Microwaves and Radar Institute, DLR, Oberpfaffenhofen, Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2010.
- [22] YOUNIS M. et al., *Performance prediction of a phase synchronization link for bistatic SAR*, *Microwaves and Radar Institute*, DLR, Oberpfaffenhofen, Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, vol. 3, Issue 3, 2006.
- [23] ZINK M., *TanDEM-X Mission Status*, WorldDEM Summit, Köln, 18.08.2013.
- [24] ZINK M. et al., *The TanDEM-X Mission: Overview and Status*, Microwaves and Radar Institute, 29.11.2007.
- [25] ZINK M. et al., *The TanDEM-X Mission: Overview and Status*, Microwaves and Radar Institute, 04.12.2009.
- [26] ZINK M. et al., *The TanDEM-X Brochure*, DLR, June 2010, www.DLR.de/en
- [27] AIRBUS DEFENCE & SPACE www.astrium-geo.com/en/19-gallery?search=gallery&type=&sensor=&resolution=&continent=&application=2237&theme
- [28] www.radary.az.pl/historia.php
- [29] www.geog.edu/~jeff/115a/remote_sensing/radar/radar1.html
- [30] YANG W. et al., *Kalman filter for removal of scalloping and inter-scan banding in scansar images*, Progress In Electromagnetics Research, vol. 132, {443461}, School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China, 2012.

JERZY WIŚNIEWSKI

TanDEM-X the Earth surface observation project from space level — basis and mission status

Abstract. TanDEM-X is DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) the Earth surface observation project using high-resolution SAR interferometry. It opens a new era in space borne radar remote sensing. The system is based on two satellites: TerraSAR-X (TSX) and TanDEM-X (TDX) flying on the very close, strictly controlled orbits. This paper gives an overview of the radar technology and overview of the TanDEM-X mission concept which is based on several innovative technologies. The primary objective of the mission is to deliver a global digital elevation model (DEM) with an unprecedented accuracy, which is equal to or surpass the HRTI-3 specifications (12 m posting, relative height accuracy ± 2 m for slope $< 20\%$ and ± 4 m for slope $> 20\%$ [8]). Beyond that, TanDEM-X provides a highly reconfigurable platform for the demonstration of new radar imaging techniques and applications.

Keywords: remote sensing, Bistatic SAR, digital elevation model (DEM), Helix formation, SAR interferometry, HRTI-3, synchronization

