

**OCENA DOKŁADNOŚCI ORTOREKTYFIKACJI OBRAZÓW SSC
Z SATELITY TERRASAR-X ORAZ WERYFIKACJA GEOMETRII
PRZETWORZONYCH OBRAZÓW DOSTARCZANYCH
PRZEZ DYSTRYBUTORA**

**ACCURACY ASSESSMENT OF TERRASAR-X ORTHORECTIFICATION AND
GEOMETRY VERIFICATION OF GEOCODED IMAGES SUPPLIED BY THE
DISTRIBUTOR**

Piotr Janusz Koza, Sebastian Różycki

Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska

SŁOWA KLUCZOWE: TerraSAR-X, SAR, ortorektyfikacja, geometria, EEC, GEC, SSC

STRESZCZENIE: Mikrofalowy sensor satelity TerraSAR-X umożliwia pozyskanie całej gamy różnorodnych produktów mogących znaleźć zastosowanie w zarządzaniu kryzysowym, kartografii, hydrologii, rolnictwie, leśnictwie i geologii. Artykuł prezentuje wyniki analizy dokładności geometrycznej produktów z satelity TerraSAR-X o rozdzielczości około 4 metrów oraz 1 metr, jak również przedstawia dokładność wyników ortorektyfikacji obrazów SSC o metrowej rozdzielczości.

1. WSTĘP

Będący na orbicie od 15 czerwca 2007 roku satelita TerraSAR-X jest pierwszym cywilnym satelitą SAR (Synthetic Aperture Radar – radar z syntetyzowaną anteną) umożliwiającym pozyskiwanie obrazów o rozdzielczości sięgającej 1 metra. Pojawienie się tego systemu ma ogromne znaczenie dla satelitarnych technik obserwacji powierzchni Ziemi. Cywilne satelitarne systemy mikrofalowe zbliżyły się swoją rozdzielczością do granicy jednego metra – pokonanej przez systemy optyczne już siedem lat wcześniej. Możliwe stało się to dzięki wykorzystaniu technik syntetyzowania apertury, wzroście częstotliwości próbkowania sygnału oraz stosowaniu coraz krótszych fal. Obecnie są to fale radarowe z zakresu X (zakres X to fale elektromagnetyczne o długości 2.8-3.4 cm).

Satelitarne systemy mikrofalowe mają zasadniczą przewagę nad systemami operującymi w zakresie optycznym – są systemami aktywnymi, wykorzystującymi zakres promieniowania elektromagnetycznego silnie penetrujący chmury, co umożliwia pozyskanie zobrażeń niezależnie od warunków pogodowych, zarówno w ciągu dnia jak i w ciągu nocy. Właściwie jedynie grad i bardzo silne opady znacząco tłumią ten zakres promieniowania. Niezależność od warunków pogodowych w połączeniu z możliwością kierowania wiązką obrazującą umożliwia znaczące skrócenie rzeczywistego czasu pozyskania serii obrazów dla danego terenu. Co więcej, dzięki dokładnie znanej charakterystyce sygnału wysyłanego, możliwe jest pozyskiwanie

informacji o absolutnym odbiciu wiązki mikrofalowej od obiektu. Jeśli doda się do tego możliwość pomiarów polarymetrycznych (TerraSAR-X umożliwia dowolną kombinację polaryzacji sygnału wysyłanego i rejestrowanego), to otrzymujemy system pozwalający na precyzyjną interpretację obiektów. Dzięki faktowi, że promieniowanie z pasma X słabo wnika w pokrywę roślinną oraz grunt, to obrazy pozyskane z systemów operujących w tym zakresie są łatwiejsze w interpretacji pokrycia terenu oraz obiektów terenowych, a pod względami interpretacyjnymi mogą być niekiedy porównywane z systemami optycznymi o odpowiednio mniejszej rozdzielczości.

2. CEL PRACY

TerraSAR-X jest relatywnie nowym systemem, jednocześnie pierwszym umożliwiającym pozyskanie obrazów o tak wysokiej rozdzielczości. Satelita może pracować w trzech trybach o różnej rozdzielczości: Spotlight (1 m.), StripMap (3 metry) i ScanSar (16 metrów). Dodatkowo użytkownik przy zamówieniu musi zdecydować się na jeden spośród czterech poziomów przetworzenia geometrycznego. Niezależnie od korekcji geometrycznej obraz może zostać wzmocniony radiometrycznie, lub przestrzennie. Wobec wszystkich powyższych faktów za zasadne uznano potrzebę weryfikacji obrazów z tego systemu. Weryfikacja obejmuje zarówno zawartość informacyjną tych obrazów, jak i ich dokładność geometryczną. W publikacji skupiono się na tym drugim aspekcie, zawartość informacyjna i czytelność obrazów TerraSAR-X jest przedmiotem innych opracowań (Wolniewicz *et al.*, 2008). Oczywiście, tam gdzie konieczne, poruszona zostaje również kwestia możliwości interpretacyjnych z wykorzystaniem tych obrazów oraz ich jakości radiometrycznej.

Projekt oceny danych TerraSAR-X realizowany był we współpracy z firmą Geosystems Polska, która jest wyłącznym dystrybutorem obrazów TerraSAR-X na Polskę i która była inicjatorem przeprowadzenia niezależnej weryfikacji zawartości informacyjnej oraz jakości geometrycznej obrazów z tego satelity. Pracami kierował dr hab. inż. Wiesław Wolniewicz.

3. CHARAKTERYSTYKA SYSTEMU

Satelita krąży po orbicie heliosynchronicznej o wysokości 514 kilometrów nad równikiem i orbitalnym cyklu rewizyty 11 dni. Wyposażony jest w antenę o długości 4.8 metra i szerokości 0.7 metra. Umożliwia ona pozyskiwanie obrazów o dowolnej polaryzacji (HH, VV, VH, HV), sensor może być wychylony od nadiru w zakresie od 20 do 55 stopni. Obrazy pozyskiwane są w kierunku na prawo od śladu orbity, lecz w wyjątkowych sytuacjach możliwe jest wykonywanie obrazów w kierunku w lewo od orbity. Możliwość sterowania kątem zobrazowania w praktyce może skrócić do dwóch i pół dnia czas pomiędzy dwoma zobrazowaniami tego samego terenu. Ze względu na dużą niezależność od warunków atmosferycznych, wszędzie tam, gdzie często występuje zachmurzenie uniemożliwiające pozyskanie obrazów optycznych, satelita ten może pozyskiwać serie wieloczasowe z częstotliwością nieosiągalną przez jakiegokolwiek systemy optyczne.

TerraSAR-X może pracować w czterech trybach, różniących się rozdzielczością, rozmiarem sceny oraz możliwymi kombinacjami wykorzystywanych polaryzacji sygnału:

- SpotLight (SL) – wysoka rozdzielczość zapewniona jest poprzez płynne zmienianie kąta zobrazowania wzdłuż orbity, dzięki czemu teren oświetlony zostaje większą liczbą wiązek i wzrasta długość syntetyzowanej anteny. Rozmiar sceny w tym trybie wynosi 10 na 10 kilometrów. Rozdzielczość azymutalna wynosi od 2 metrów dla obrazów o pojedynczej polaryzacji (VV albo HH) do 4 metrów dla obrazów o podwójnej polaryzacji. Natomiast rozdzielczość w kierunku poprzecznym do orbity wynosi od 1.34 metra dla dużych kątów nachylenia i maleje wraz ze zmniejszaniem się kąta nachylenia. Istnieje również tryb HighResolution SpotLight, który przy rozmiarze sceny 5 na 10 km pozwala pozyskiwać obrazy o rozdzielczości azymutalnej 1 metr dla pojedynczej polaryzacji, lub 2 metry dla podwójnej.

- StripMap (SM) – tryb do pozyskiwania obrazów o wysokiej rozdzielczości w pasach. Maksymalna długość pasa zobrazowania wynosi aż 1650 kilometrów. Rozdzielczość wzdłuż orbity wynosi 3 metry, natomiast w poprzek orbity zależna jest od kąta zobrazowania. Szerokość pasa zobrazowania w tym trybie wynosi 30 kilometrów dla obrazów o pojedynczej polaryzacji lub 15 kilometrów dla obrazów o podwójnej polaryzacji.

- ScanSAR (SC) – służy do pozyskiwania obrazów rozległych obszarów. Tworzony jest przez wielokrotne złożenie czterech przylegających pasów SM w jeden obraz. Poprzez niemal równoczesne pozyskiwanie czterech obrazów SM ich rozdzielczość jest degradowana do 16 metrów wzdłuż orbity. Wynikowy obraz może mieć szerokość do 100 kilometrów i długość nawet do 1650 km.

Obrazy z każdego trybu pracy mogą być udostępniane użytkownikowi na różnych stopniach przetworzenia geometrycznego, nazywanymi przez dystrybutora podstawowymi produktami obrazowymi:

- SSC (*Single Look Slant Range Complex*) – dane w formie zespolonej, w układzie lokalnym systemu pozyskującego, o różnej rozdzielczości wzdłuż i w poprzek orbity. Komplet danych zawiera również informacje o fazie, które umożliwiają pomiary interferometryczne. Ze względu na to, że jest to produkt typu „single look” jest on relatywnie silnie zasumiony, jednakże jest on dostępny najszybciej, a jego kompleksowość umożliwia wykonanie szeregu prac i przetworzeń, niedostępnych przy wykorzystaniu pozostałych produktów. Nie każde oprogramowanie może być stosowane do produktów o tym stopniu przetworzenia.

- MGD (*Multi Look Ground Range Detected*) – produkt o jednakowej rozdzielczości wzdłuż i w poprzek orbity, o znacznie zmniejszonym zasumieniu i zwiększonej jakości radiometrycznej. Nie zostaje przeprowadzony obrót obrazu z układu współrzędnych wzdłuż i w poprzek orbity, dzięki czemu uniknięto interpolacji. Jednakże współrzędne na tym obrazie są mocno przybliżone i są bardzo niedokładne. Jest to produkt przeznaczony do dalszego przetwarzania.

- GEC (*Geocoded Ellipsoid Corrected*) – produkt geokodowany bez wykorzystania fotopunktów, rzutowany na średnią wysokość terenu w zasięgu sceny. Standardowo produkty o tym stopniu przetworzenia udostępniane są w formacie GeoTiff w układzie współrzędnych UTM.

- EEC (*Enhanced Ellipsoid Corrected*) – produkt ortorektyfikowany bez wykorzystania fotopunktów. Standardowo korekcja ze względu na ukształtowanie terenu przeprowadzona jest w oparciu o NMT z misji promu kosmicznego (SRTM) o rozdzielczości 90 metrów.

Każdy z powyższych produktów, poza SSC, może zostać poddany przez dystrybutora wzmocnieniom radiometrycznym lub przestrzennym. Wzmocnienie radiometryczne skutkuje zmniejszeniem ilości szumu na obrazie, jednakże również powoduje degradację rozdzielczości. W przypadku wzmocnienia przestrzennego sytuacja jest odwrotna. Co więcej, każdy z produktów może zostać udostępniony wraz z parametrami orbity na różnych poziomach dokładności – od 700 metrów dla orbity „przewidywanej” (*predicted*), poprzez 2 metry dla orbity wyznaczonej w sposób szybki (*rapid*), nawet do 20 centymetrów dla orbit poddanych szczegółowej obróbce w *postprocessingu* (*science*). Orbita o takiej dokładności przeznaczona jest do zastosowań naukowych i interferometrii. Oczywiście wybór oczekiwanej precyzji orbity wpływa znacząco na czas otrzymania danych. W literaturze podaje się, że w rzeczywistości błąd współrzędnych produktu EEC wynikający ze stosowania orbity *predicted* wynosi 11 metrów (Nonaka *et al.*, 2008).

4. MATERIAŁY I METODY

Wobec dużej liczby trybów pracy systemu postanowiono skupić się na dwóch – SpotLight oraz StripMap. Wybrano je z następujących względów – po pierwsze są to produkty o wysokiej rozdzielczości (zbliżone do 2 i do 3 metrów), tak więc wymagania co do dokładności przestrzennej są dla nich najwyższe, a po drugie są to obrazy mikrofalowe o rozdzielczościach dotąd rzadko lub wcale nie spotykanych. Poza TerraSAR-X obrazy o rozdzielczości 1 metra obecnie dostarczane są jedynie przez satelity z konstelacji Cosmo-Sky-Med. Natomiast obrazy o rozdzielczości 3 metrów dostarcza również satelita Radarsat-2. Pierwsze satelity konstelacji Cosmo-Sky-Med oraz Radarsat-2 umieszczone zostały na orbicie w 2007 roku.

W projekcie wykorzystano oprogramowanie ErdasImagine, zarówno w wersji 9.1, jak i 9.2, w obu przypadkach wraz z modułem Radar Suite. O ile produkty na poziomie przetworzeń geometrycznych MGD, GEC, EEC udostępniane są w formacie GeoTiff (wraz z metadanymi w formacie XML) i mogą być opracowane w dowolnym oprogramowaniu do przetwarzania obrazów, o tyle produkt SSC wymaga już dedykowanych narzędzi. Należy tu wspomnieć, że ErdasImagine od najnowszej wersji 9.2 wraz z Service Pack 1 jest w pełni zgodny z formatem SSC, jak i ze wszystkimi pozostałymi produktami TerraSAR-X. Dzięki temu większość przetworzeń można wykonywać w sposób półautomatyczny, gdyż parametry obrazów (metadane) są nierozdzielnie związane z danymi obrazowymi i są standardowo wczytywane przez wszystkie moduły oprogramowania, zarówno przy operacjach ortorektyfikacji, odszumiania, wykrywania krawędzi, przeliczeń wartości radiometrycznych, jak i importu oraz eksportu. Pliki w formacie SSC mogą być również opracowywane w wybranych programach, które są kompatybilne z formatami danych z satelity Radarsat-1. Wynika to z deklarowanej przez dystrybutora zgodności tego formatu z produktami SSC Radarsat.

Do testów wybrano dwa pola testowe – Wrocław oraz Kozienice. Ponieważ nie udało się uzyskać produktów GEC oraz EEC z jednego terminu, konieczne było wykorzystanie produktów pozyskanych w różnych terminach. Podstawowe informacje o produktach zawarte są w tabeli 1. Należy zwrócić uwagę, że podana w tabeli rozdzielczość jest wymiarem piksela udostępnionego obrazu, a rzeczywista rozdzielczość, szczególnie w przypadku obrazów wzmocnionych radiometrycznie, jest odpowiednio mniejsza.

Tabela 1. Parametry danych dla pól testowych Kozienice i Wrocław

Pole testowe	Data wykonania, czas w UTC	Kąt obrazowania od nadiru [st]	Poziomy geometryczne	Rozdzielczość [m]	Polaryzacja	Uwagi
Kozienice 1	2007.11.27 16:09	25	EEC	4,75	VV VH	Wzmocniony radiometrycznie
Kozienice 2	2008.01.26 16:17	38	GEC	3,75	VV VH	Wzmocniony radiometrycznie
Wrocław 1	2007.11.26 16:26	23	EEC	1,25	HH	Wzmocniony przestrzennie
Wrocław 2	2008.01.25 16:34	36	SSC		HH	
			MGD	0,75	HH	Wzmocniony przestrzennie
			GEC	1,75	HH	Wzmocniony radiometrycznie

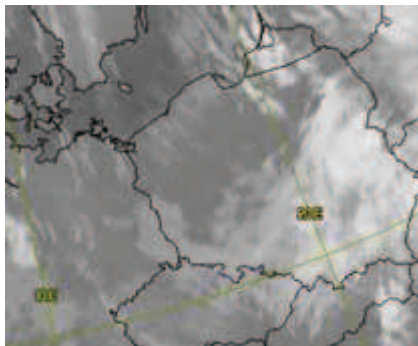
Dla pola testowego Kozienice dysponowano obrazami z trybu SM o rozdzielczości zbliżonej do 4 metrów, natomiast dla pola testowego Wrocław dysponowano obrazami z trybu SL o rozdzielczości zbliżonej do 1,5 metra. Różnice pomiędzy rozdzielczościami obrazów pozyskanych dla tego samego pola testowego w różnych terminach wynikały w dużej mierze z różnic kątów pozyskania danych oraz z faktu, że dla Wrocławia jedna scena wzmocniona była przestrzennie, a druga radiometrycznie. Wszystkie sceny zostały poddane przez dystrybutora korekcji geometrycznej z wykorzystaniem orbit typu „rapid”.

Teren pola testowego Kozienice ma wymiary około 15 na 55 kilometrów. Przez środek sceny z południa na północ przebiega rzeka Wisła. W centralnej części znajduje się elektrociepłownia Kozienice wraz z dojazdami kolejowymi. W południowej części pola testowego obraz obejmuje miasto Kozienice. Teren pokryty jest głównie lasami iglastymi oraz gruntami ornymi, przeważnie odkrytymi o tej porze roku.

Pole testowe Wrocław ma wymiary 10 na 10 kilometrów i obejmuje miasto Wrocław o zabudowie miejskiej i wielkomiejskiej oraz tereny podmiejskie o zabudowie niskiej. Ze wschodu na zachód pola testowego przebiega rzeka Odra wraz z kanałami i odnogami. Na obrzeżach pola testowego znajdują się niewielkie obszary wiejskie, natomiast w północno zachodniej części jest nieduży kompleks leśny. W obrębie pola testowego występują liczne drogi szybkiego ruchu z rozjazdami oraz linie kolejowe.

Nadmienić należy, że wszystkie obrazy wykorzystywane w projekcie zostały pozyskane w warunkach dużego lub całkowitego zachmurzenia, a nawet podczas przelotnych opadów śniegu (rys. 1.). Zachmurzenie tego stopnia uniemożliwiło

pozyskanie danych przez jakikolwiek system optyczny, podczas gdy system mikrofalowy pozyskał aż 4 sceny. Wpływ niekorzystnych warunków atmosferycznych jest widoczny jedynie na scenie dla pola testowego Wrocław 1. Podczas pozyskania tego obrazu wiał wiatr o sile w porywach do 54 km/h. W wyniku tego powierzchnia rzeki Odry pokryta była falami, które zwiększały odbicie promieniowania mikrofalowego, przez co obszar rzeki charakteryzuje się dużą szorstkością.



Rys. 1. Zachmurzenie w czasie pozyskania obrazu Kozienice 1 (dane EUMETSAT)

Jako dane referencyjne wykorzystano dwa komplety ortofotomap:

- dla Wrocławia – ortofotomapa w barwach naturalnych o rozdzielczości 20 centymetrów wytworzona z danych z cyfrowej kamery ADS-40. Do ortorektyfikacji wykorzystano NMT ze skaningu laserowego.

- dla Kozienic – ortofotomapa wytworzona z obrazów z satelity IRS-P6. Ortofotomapa była miała rozdzielczość 5 metrów i była utworzona z kanału niebieskiego (wytworzonego sztucznie), zielonego, czerwonego oraz podczerwieni.

5. WERYFIKACJA DOKŁADNOŚCI PRODUKTÓW GEC I EEC

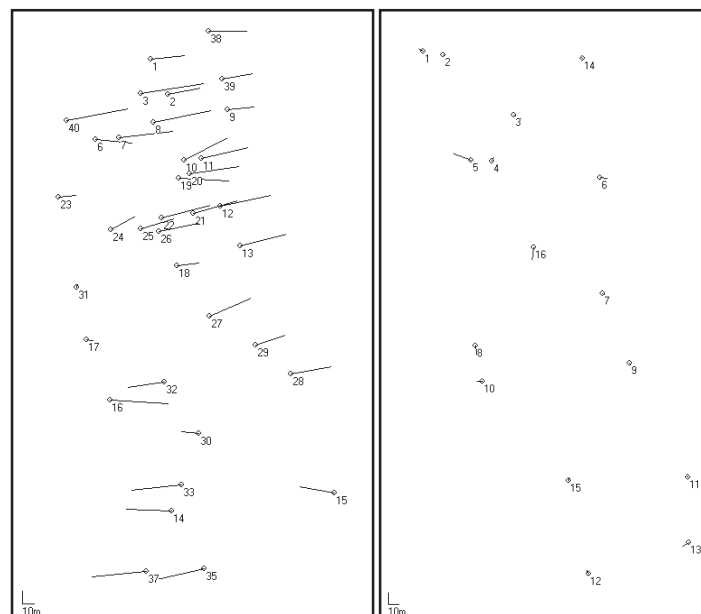
Dokładność geometryczną weryfikowano poprzez pomiar współrzędnych fotopunktów na materiałach referencyjnych i pomiar ich na obrazach TerraSAR-X. W tym celu dokonano przepróbkowania materiałów referencyjnych do układu UTM. Punkty kontrolne w zamierzeniu miałyby być rozmieszczone równomiernie w zasięgu badanej sceny, jednakże w przypadku pola testowego Kozienice nie zawsze możliwe było spełnienie tego warunku. Wynikało to z braku obiektów o wystarczająco dobrej identyfikacji w zasięgu sceny. Wszystkie punkty kontrolne wybierane były jako środki skrzyżowań dróg, lub narożniki dużych rozjazdów. O ile na obrazach radarowych nie zawsze można było jednoznacznie identyfikować krawędź drogi, o tyle wyznaczenie jej osi było znacznie prostsze. Proces identyfikacji punktów na metrowych obrazach z TerraSAR-X niekiedy był utrudniony przez rzędy drzew wzdłuż dróg. Mogły one powodować niedokładności w wyznaczeniu osi drogi, w szczególności na obrazach pozyskanych z dużych kątów. Identyfikacja niektórych dróg lokalnych przebiegała szybciej na obrazach wzmocnionych radiometrycznie. Obrazy wzmocnione przestrzennie charakteryzują się znacznym stopniem zaszumienia, przez co jednoznaczne wyznaczenie osi drogi może być obciążone pewnym błędem. Jednakże

ze względu na większą rozdzielczość obrazów wzmocnionych przestrzennie wprawny obserwator może znaleźć na nich większą liczbę dróg lokalnych spełniających warunki dla dobrego punktu kontrolnego.

W przypadku pola testowego Kozienice pomierzono na obrazie GEC 36 fotopunktów, natomiast na obrazie EEC 16 fotopunktów. Wyniki przedstawione są w tabeli 2 oraz na rysunku 2. Duży błąd współrzędnej Y, sięgający 32 metrów, wynika z nieuwzględnienia ukształtowania terenu i z geometrii pozyskania obrazu – system radarowy skierowany jest na prawo od orbity o inklinacji 97.44 stopnia, tak więc nieuwzględnienie ukształtowania terenu wpływa przede wszystkim na błędy w kierunku zbliżonym do osi wschód-zachód, a więc na współrzędną Y.

Tabela 2. Wyniki weryfikacji produktów GEC i EEC dla Kozienic

Pole testowe	Przetworzenie geometryczne	m (X) [m]	m (Y) [m]	m (XY) [m]
Kozienice 2	GEC	8,04	31,90	32,90
Kozienice 1	EEC	5,67	5,21	7,70



Rys. 2. Odchyłki na punktach kontrolnych, pole testowe Kozienice – po lewej dla produktu GEC, po prawej dla produktu EEC

Jak widać w załączonych wynikach produkt GEC, nie uwzględniający ukształtowania terenu charakteryzuje się błędem sięgającym nawet 8 pikseli, podczas gdy produkt EEC, uwzględniający ukształtowanie terenu charakteryzuje się błędem rzędu 2 pikseli. Wynika z tego, że produkty EEC, charakteryzują się wysoką dokładnością geometryczną, nawet pomimo faktu, że są to produkty, które poddane

zostały korekcji geometrycznej bez wykorzystania fotopunktów oraz z wykorzystaniem Numerycznego Modelu Terenu o relatywnie niskiej rozdzielczości (SRTM).

Podobne wyniki dla produktu EEC uzyskano dla obrazów z trybu SL dla pola testowego Wrocław (tabela 3, rysunek 3). Zarówno dla produktu GEC, jak i EEC uzyskano wyniki w granicach 3.5 piksela. Ponieważ produkty GEC i EEC dla pola testowego Wrocław mają różną rozdzielczość, to błąd produktu EEC jest mniejszy o jeden metr. Relatywnie duża dokładność produktu GEC, w porównaniu z polem testowym Kozienice, wynika z kilku faktów. Rozmiary sceny są relatywnie niewielkie (10x10 km), przez co średnia wysokość relatywnie dobrze aproksymuje ukształtowanie terenu. Dodatkowo deniwelacje nie są tak duże, jak w przypadku pola testowego Kozienice. Ponieważ punkty kontrolne rozmieszczone były na przecięciu osi dróg, to poniższe wyniki mogą być niereprezentatywne dla terenów o urozmaiconej orografii, lecz pozbawionych dróg (np. skarpy rzeczne). Dla takich terenów należy spodziewać większej różnicy w dokładności pomiędzy produktami uwzględniającymi i nie uwzględniającymi ukształtowania terenu. Dla produktu GEC pomierzono 14 punktów kontrolnych, natomiast dla produktu EEC pomierzono 21 punktów kontrolnych.

Tabela 3. Wyniki weryfikacji produktów GEC i EEC dla Wrocławia

Obraz	Przetworzenie geometryczne	m (X) [m]	m (Y) [m]	m (XY) [m]
Wrocław 2	GEC	3,18	4,90	5,84
Wrocław 1	EEC	3,34	3,48	4,82



Rys. 3. Odchyłki na punktach kontrolnych, pole testowe Wrocław – po lewej dla produktu GEC, po prawej dla produktu EEC

Weryfikacja dla pola testowego Wrocław potwierdziła wysoką kartometryczność produktu EEC.

6. ORTOREKTYFIKACJA

Wobec faktu wysokiej kartometryczności produktów geokodowanych skorygowanych o wpływ ukształtowania terenu (EEC) udostępnianych przez dystrybutora pojawia się pytanie, czy zasadnym jest przeprowadzenie przez użytkownika ortorektyfikacji. Fundamentalną jest kwestia, czy użytkownik jest w stanie w sposób szybki i ekonomicznie uzasadniony przeprowadzić ortorektyfikację dającą wyniki o wyższej dokładności niż produkty dostarczane przez dystrybutora.

By odpowiedzieć na to pytanie przeprowadzono ortorektyfikację obrazów SSC, czyli obrazów nieprzetworzonych geometrycznie, dla pola testowego Wrocław. Punkty referencyjne i kontrolne pomierzono na cyfrowej ortofotomapie ADS-40. Wybrano punkty leżące na powierzchni ziemi, by uniknąć wpływu wysokości ponad teren (Werner *et al*, 2002). Do ortorektyfikacji wykorzystano NMT utworzony ze skaningu laserowego. Zastosowano NMT zdegradowany do rozdzielczości 1 metra.

Przed przystąpieniem do ortorektyfikacji przeprowadzono korekcję modelu SAR oraz orbity dostarczonej przez dystrybutora razem z danymi. Wykorzystano do tego narzędzia modułu ErdasImagine Radar Suite. Pozwalają one korygować model zarówno wzdłuż orbity (korekcja po azymucie), jak i w poprzek (korekcja po zasięgu). Ze względu na objętość pracy zasady korekcji modelu nie będą tu szczegółowo opisane. Czytelnik może je znaleźć w literaturze oraz materiałach towarzyszących oprogramowaniu (Erdas Field Guide).

W eksperymencie wykazano, że zastosowanie już 7 fotopunktów pozwala na osiągnięcie wewnętrznej dokładności korekcji na poziomie jednego piksela (tabela 4). Niestety, wykorzystywane narzędzia nie pozwalają w pełni przeprowadzić analizy dokładności korekcji modelu, gdyż pozwalają jedynie na wyznaczenie błędów średnich kwadratowych korekcji na fotopunktach uczestniczących w korekcji i nie jest w pełni możliwe wprowadzenie niezależnych punktów kontrolnych. Prawdopodobnie ten problem zostanie rozwiązany w kolejnej wersji pakietu.

Tabela 4. Wyniki wyrównania korekcji modelu (błąd średni na fotopunktach dla korekcji wzdłuż i w poprzek orbity)

Liczba punktów	m (XY) [m]
5	1,48
6	1,37
7	1,35
8	1,09
9	0,99
10	0,96

Przeprowadzono analizę zastosowanych parametrów korekcji modelu. Dla modelu korygowanego z wykorzystaniem 10 fotopunktów przeprowadzono korekcję: wzdłuż orbity, w poprzek orbity, wzdłuż i w poprzek orbity. Wyniki wyrównania modelu korekcyjnego przedstawione są w tabeli 5. Jak widać, dominującym błędem jest błąd w poprzek orbity. By osiągnąć największą dokładność należy stosować obie korekcje modelu, które zapewniły wewnętrzną zgodność modelu na poziomie jednego metra.

Tabela 5. Błędy średnie (w metrach) na 10 fotopunktach wykorzystanych w korekcji modelu

	m (X) [m]	m (Y) [m]	m (XY) [m]
Bez korekcji	1,46	3,26	3,57
Korekcja w poprzek osi	1,44	0,74	1,62
Korekcja wzdłuż osi	0,61	3,26	3,32
Korekcja wzdłuż i w poprzek	0,61	0,74	0,96

Ponieważ oprogramowanie nie umożliwiło wykorzystania punktów kontrolnych a wyniki wyrównania modelu jedynie na fotopunktach nie mogą być traktowane jako reprezentatywne dla całego korygowanego obrazu, to postanowiono wykonać kontrolę orientacji poprzez wygenerowanie ortofotomapy i przeprowadzenie analizy jej dokładności w sposób analogiczny do opisanego wcześniej dla produktów GEC i EEC. Do ortorektyfikacji wykorzystano NMT utworzony ze skaningu laserowego ALS-50. Źródłowe dane miały rozdzielczość 0,8 metra, ich filtracja została przeprowadzona w oprogramowaniu TerraSolid. Wynikowy NMT o rozdzielczości 1 metra został udostępniony na potrzeby projektu przez Geosystems Polska. W procesie ortorektyfikacji parametry ściśle modelu zostały wyznaczone w siatce 50x50 pikseli, natomiast dla pikseli pomiędzy tymi punktami parametry były interpolowane. Rozwiązanie to wynika z dużej złożoności obliczeniowej modelu, a im mniejsze oczko siatki, tym dystorsje pomiędzy punktami są mniejsze, jednakże wykładniczo wzrasta czas ortorektyfikacji. Wyniki kontroli na 21 punktach wynikowego ortobrazu zestawione zostały z wynikami kontroli produktu EEC w tabeli 6. Wpływ wykorzystanego NMT na wyniki ortorektyfikacji będzie przedmiotem późniejszych badań.

Tabela 6. Wyniki ortorektyfikacji (błąd średni w metrach)

Obraz	Przetworzenie geometryczne	m (X) [m]	m (Y) [m]	m (XY) [m]
Wrocław 1	EEC	3,34	3,48	4,82
Wrocław 2	Ortofoto własne	1,86	2,09	2,80

Przeprowadzenie własnej ortorektyfikacji pozwoliło podnieść dokładność do około 2 pikseli. Na ten wynik składają się przede wszystkim dwa czynniki: korekcja modelu z wykorzystaniem fotopunktów oraz zastosowanie dokładnego Numerycznego Modelu Terenu. Należy podkreślić, że ortorektyfikacja jest przeprowadzana na obrazach „surowych”, które dostarczane są najszybciej (w czasie zbliżonym do rzeczywistego). Tak więc, użytkownicy dysponującym odpowiednim oprogramowaniem i wiedzą są w stanie bardzo szybko przeprowadzić ortorektyfikację i uzyskać produkt o dokładności przewyższającej dokładność produktu EEC standardowo dostarczanego przez dystrybutora. Przy wykorzystywaniu produktów SSC, lub wstępnie przetworzonych MGD, użytkownik dysponuje kompletem danych pozwalającym na wygenerowanie we własnym zakresie produktów odpowiadającym produktom GEC i EEC. Dodatkowo może je dowolnie filtrować i przetwarzać, a produkt SSC pozwala mu w późniejszym czasie przeprowadzić interferometrię. Należy podkreślić, że cena obrazu TerraSAR-X jest stała dla poszczególnych trybów zobrazowania i nie zależy od stopnia przetworzenia geometrycznego. Tak więc, stosowanie produktów SSC jest uzasadnione nie tylko ze

względów dokładnościowych i oszczędności czasu, lecz również ze względów ekonomicznych.

7. PODSUMOWANIE

W artykule wykazano wysoki potencjał geometryczny produktów EEC z satelity TerraSAR-X – geokodowanych z uwzględnieniem ukształtowania terenu. Produkt EEC spełnia wymagania dokładnościowe większości użytkowników, jednakże Ci użytkownicy, którym zależy na najwyższej dokładności geometrycznej danych oraz chcą skrócić czas otrzymania ortofotomapy mogą przeprowadzić korekcję we własnym zakresie. Potwierdzona została również deklarowana przez producenta, firmę Leica Geosystems, zgodność pakietu ErdasImagine z formatami danych z satelity TerraSAR-X. Odradza się korzystanie z produktów GEC, ze względu na ich niedokładność geometryczną (do 8 pikseli). Z ekonomicznego punktu widzenia najefektywniejszym jest wykorzystywanie produktów SSC, ponieważ użytkownik posiadający odpowiednie oprogramowanie jest w stanie samodzielnie z produktów SSC wygenerować dokładne ortofotomapy, przewyższające dokładnością produkty EEC dystrybutora. Dodatkowo obrazy SSC mogą zostać wykorzystane do interferometrii.

Wysoki potencjał geometryczny obrazów z satelity TerraSAR-X, w połączeniu z krótkim czasem uzyskania danych, dzięki dużej niezależności od warunków pogodowych, predestynuje je do wykorzystania w zarządzaniu ryzykiem, ochronie środowiska, hydrologii, zastosowaniach militarnych. Jednocześnie obrazy te mogą stanowić świetne uzupełnienie archiwalnych danych optycznych o aktualną informację przestrzenną. Dzięki krótkiemu czasowi rewizyty oraz możliwości pomiarów polarymetrycznych system też jest odpowiednim narzędziem dla leśników oraz może znaleźć zastosowanie w rolnictwie.

Niedługo do satelity TerraSAR-X ma dołączyć bliźniaczy satelita, przez co powstanie TanDEM-X – niezwykle wydajny system którego głównym przeznaczeniem będzie pozyskiwanie obrazów do pomiarów interferometrycznych.

8. PODZIĘKOWANIA

Autorzy pragną podziękować dr hab. inż. Wiesławowi Wolniewiczowi, który kierował projektem oceny potencjału kartograficznego danych z satelity TerraSAR-X oraz firmie Geosystems Polska, która była inicjatorem badań opisanych w artykule.

9. LITERATURA

DLR. 2007. TerraSar-X Ground Segment. Basic Product Specification Document, wersja z 06.16.2007.

Leica Geosystems. Erdas Field Guide - ErdasImagine 9.2. s. 23, 339-346.

Nonaka T., Ishizuka Y., Yamane N., Shibayama T., Takagishi S., Sasagawa T. 2008. Evaluation of the Geometric Accuracy of Terrasar-X. *The international archives of the*

photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. Vol. XXXVII, Part B7. ISPRS Congress Beijing, s. 135-141.

Werner, C., Strozzi, T., Wegmuller, U., Wiesmann, A. 2002. „SAR geocoding and multi-sensor image registration”. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02. 2002 IEEE International Volume 2, 24-28 Czerwiec 2002. str. 902 - 904

Wolniewicz W., Koza P. J. 2008. TerraSAR-X – ocena dokładności geometrycznej i zawartości informacyjnej danych – referat. *III Konferencja Naukowo-Techniczna: Wykorzystanie współczesnych zobrazowań satelitarnych, lotniczych i naziemnych dla potrzeb obronności kraju i gospodarki narodowej*. Serock.

Geosystems Polska: <http://www.geosystems.pl>

Infoterra GmbH: <http://www.infoterra.de>

ACCURACY ASSESSMENT OF TERRASAR-X ORTHORECTIFICATION AND GEOMETRY VERIFICATION OF GEOCODED IMAGES SUPPLIED BY THE DISTRIBUTOR

KEY WORDS: TerraSAR-X, SAR, orthorectification, geometry, EEC, GEC, SSC

Summary

TerraSAR-X, a German satellite, works in three modes: SpotLight (SL), StripMap (SM), and ScanSAR (SS) with maximum azimuth resolutions of 1, 3, and 16 m, respectively. The images are distributed both in raw a raw or a georeferenced format. Due to the variety of products, it has been claimed that the geometry of those images should be investigated.

The first part of the paper presents verification of geometric precision of geocoded products generated by the distributor. Images at the EEC (Enhanced Ellipsoid Corrected) and GEC (Geocoded Ellipsoid Corrected) levels were examined. The EEC product affected by the terrain heights, while the GEC product is affected by the mean height of terrain. Two test areas were selected: one in Kozenice, with SM mode images and the other in Wrocław, with SL images. Control points were collected on reference orthophotomaps from the IRS-P6 satellite and with an ADS-40 airborne digital camera. The results showed the GEC product to have a low accuracy, while the EEC products are of a high accuracy (RMS error of 3-4 pixels).

The second part of the paper presents orthorectification results for the Wrocław test area. A raw image in the SSC format was used. It was shown that, with 10 control points and a SAR model correction both in azimuth and slant range direction, the accuracy of 2 pixels can be achieved.

Verification of TerraSAR-X geometry accuracy formed a part of a project carried out in cooperation with the Geosystems Polska, the distributor of TerraSAR-X images from Poland. All the work was conducted in the ErdasImagine environment.

mgr inż. Piotr Janusz Koza
e-mail: piotr.koza@wp.eu, piotr.koza@gik.pw.edu.pl
tel. +22 234 73 58, fax: +22 234 53 89

mgr inż. Sebastian Różycki
e-mail: s.rozycki@gik.pw.edu.pl
tel. +22 234 73 58, fax: +22 234 53 89