

**SATELITARNA INTERFEROMETRIA RADAROWA (INSAR) WYSOKIEJ  
ROZDZIELCZOŚCI Z WYKORZYSTANIEM DANYCH TERRASAR-X**

**HIGH RESOLUTION SAR INTERFEROMETRY (INSAR)  
WITH TERRASAR-X DATA**

**Zbigniew Perski<sup>1</sup>, Artur Krawczyk<sup>2</sup>, Petar Marinkovic<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Katedra Geologii Podstawowej, Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski

<sup>2</sup>Katedra Ochrony Terenów Górniczych Geoinformatyki i Geodezji Górniczej,  
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska,  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

<sup>3</sup>Delft Institute of Earth Observation and Space Systems  
Delft University of Technology

SŁOWA KLUCZOWE: interferometria radarowa, wysokorozdzielcze zobrazowania mikrofalowe, SAR, LGOM, TerraSAR-X, deformacje terenu

STRESZCZENIE: W artykule autorzy przedstawiono pierwsze spostrzeżenia na temat interferometrycznego przetwarzania danych TerraSAR-X, który jest pierwszym na świecie wysokorozdzielczym satelitą obrazującym w zakresie mikrofal. W opracowaniu zostały użyte dane SAR zarejestrowane w trybie StripMap o rozdzielczości przestrzennej ok. 3.3m. Dane te, obejmujące swym zasięgiem obszar LGOM posłużyły do wygenerowania interferogramu przedstawiającego deformacje terenu wywołane eksploatacją rud miedzi. Z uwagi na wysoką rozdzielczość przestrzenną i małą długość fali nie można było do danych tych wprost zastosować istniejących algorytmów interferometrycznych. Otrzymany interferogram TerraSAR-X charakteryzuje się bardzo dobrą koherencją. Wykazano, że dane radarowe w paśmie X bardzo dobrze nadają się do monitoringu deformacji, a wysoka rozdzielczość umożliwia również śledzenie bardzo drobnych zmian wysokościowych. Wskazano, że czynnikiem znacznie poprawiającym koherencję jest jak wysoka rozdzielczość przestrzenna danych: charakterystyka rozpraszania sygnału jest bowiem częściej zbliżona do odbicia typu powierzchniowego niż tzw. odbicia objętościowego.

## **1. CHARAKTERYSTYKA SYSTEMU TERRASAR-X**

TerraSAR-X wyniesiony został na orbitę 15 czerwca 2007 roku za pomocą rosyjskiej rakiety DNIEMPR-1 i po zakończeniu fazy testowej od 9 stycznia 2008 dostarcza zobrazowań. Czas trwania misji przewidziano na 5 lat. Satelita został umieszczony na orbicie okołobiegunowej heliosynchronicznej o nachyleniu 97,44° i wysokości 515 km. Okres rewizyty (tj. powtórzenia tej samej ścieżki podsatelitarnej dla danego obszaru) wynosi 167 cykli czyli 11 dni. Podobnie jak w przypadku innych współczesnych satelitów, do kontroli położenia wykorzystywany jest system GPS. TerraSAR-X to lekki, specjalizowany satelita wyposażony w jedno urządzenie

do zbierania danych, którym jest wysokiej rozdzielczości radiolokator SAR pracujący w paśmie X. Zastosowana tu długość fali wynosi 3.1 cm a częstotliwość 9.65 GHz.

TerraSAR-X to pierwszy niemiecki satelita wybudowany w partnerstwie publiczno-prywatnym: państwowej DLR (Niemieckiej Agencji Kosmicznej) i paneuropejskiej firmy EADS Atrium. Umowę o utworzeniu konsorcjum podpisano w 2002 roku. Całość projektu kosztuje około 130 mln. euro. Firmy do obsługi projektu powołały spółkę zależną Infoterra GmbH. Spółka realizuje obsługę zamówień natomiast DLR koordynuje naukowe wykorzystanie danych z satelity.

Podstawową charakterystykę trybów obrazowania systemu SAR TerraSAR-X przedstawia tabela 1. Poszczególne tryby obrazowania pozwalają na uzyskiwanie produktów różniących się rozmiarami sceny i rozdzielczością.

Tabela 1. Porównanie charakterystyk produktów różnych trybów rejestracji TerraSAR-X

	Scan-SAR	Strip-Map	Spotlight	Hi-Res Spotlight
Pokrycie w kierunku azymutu	150 km	50 km	10 km	5 km
Pokrycie w kierunku zasięgu	100 km	30 km	10 km	10 km / 6-10 km
Rozdzielczość w kierunku azymutu	16 m	3.3 m	2 m	1.1 m
Rozdzielczość zasięgu	1,2 m	1.2 m	1.2 m	1.2 m / 0.6 m

## 2. OBSZAR BADAŃ

Na terenie Legnicko – Głogowskiego Zagłębia Miedziowego (LGOM) znajduje się 8 obszarów górniczych, w których prowadzona jest eksploatacja górnicza przez 3 zakłady górnicze (Rys. 1). Łącznie obszary górnicze kopalń LGOM zajmują teren ok. 400 km<sup>2</sup>. W zasięgu wpływów bezpośredniej eksploatacji górniczej znajdują się dwa miasta: Lubin i Polkowice oraz kilkanaście wsi. Prowadzona od końca lat 60-tych eksploatacja rud miedzi powoduje powstanie deformacji ciągłych w postaci obniżeń terenu wywołanych zarówno eksploatacją podziemną jak i odwodnieniem górotworu. Wielkości obniżeń całkowitych na terenie LGOM w obszarach intensywnej eksploatacji prowadzonej systemem filarowo-komorowym osiągają średnie wartości od 1,8 do 2,6 m (Cuprum 2006). Pomiary geodezyjne jak i wyliczenia teoretyczne wskazują, że średnia prędkość ujawniania się tego typu obniżeń nad eksploatacją zawałową nie przekracza 1,25 mm/dobę.

Na obniżenia wywołane eksploatacją kopaliny nakładają się również zmiany wysokościowe powierzchni terenu powodowane tworzeniem się tzw. wielkopowierzchniowej niecki odwodnieniowej, której wartości obniżeń od rozpoczęcia odwadniania złoża nie przekraczają 3 m. Maksymalną wielkość obniżeń wywołanych odwodnieniem zanotowano w obszarze górniczym „Lubin I” i wyniosła ona 7,1 m. Maksymalna prędkość narastania obniżeń nie przekroczyła 30 mm/rok (Popiołek, 1997).

### 3. INTERFEROMETRIA TERRASAR-X

Interferometria SAR (InSAR) to technika służąca do uzyskiwania informacji dotyczących względnych danych wysokościowych (Goldstein et al., 1988). Wykorzystuje ona różnice fazy sygnałów radarowych pochodzących z dwóch obserwacji mikrofalowych typu SAR tego samego obszaru. Wynik tej operacji – interferogram, przedstawia różnice fazy „zawinięte” w cykle 2PI a dzięki zastosowaniu technik tzw. rozwijania fazy jest możliwe zrekonstruowanie pełnego sygnału. Dobry przegląd metodyki i obszarów zastosowań InSAR można znaleźć w (Bamler and Hartl, 1998; Massonnet and Feigl, 1998; Rosen et al., 2000).

System SAR satelity TerraSAR-X został zaprojektowany między innymi z myślą o zastosowaniach interferometrycznych i w zasadzie dane rejestrowane we wszystkich trybach nadają się dla potrzeb interferometrii (Adam et al., 2008). Z uwagi na wysoką rozdzielczość przestrzenną i małą długość fali nie można do danych TerraSAR-X wprost zastosować istniejących algorytmów interferometrycznych. Dotyczy to przede wszystkim trybów SL (*SpotLight*) i HS (*High Resolutuion SpotLight*). Według Adam et al. (2008) największy problem stanowi etap współrejestracji, która musi zapewnić maksymalny błąd nie większy niż dziesiąte części piksela. W przeciwnym przypadku prowadzi to do znacznego zredukowania koherencji interferometrycznej. W klasycznej technice InSAR przesunięcia pikseli wynikające z ukształtowania terenu są usuwane przy zastosowaniu wielomianu niskiego rzędu dla całej sceny. W przypadku sensora wysokiej rozdzielczości takie podejście nie jest wystarczające i stosuje się metody oparte na geometrii obrazowania, tj. obliczające prawidłowe położenie piksela w oparciu o model numeryczny terenu i parametry orbity (np. Huanyin et al., 2004). Drugą ważną sprawą jest zróżnicowanie tzw. częstotliwości dopplerowskiej w kierunku azymutu dla danych rejestrowanych w trybach SL i HS. W przypadku wykorzystywanych dotychczas danych rejestrowanych metodą StripMap problem ten nie istniał (częstotliwość ta ma stałą wartość dla całej sceny). Niesie to za sobą konieczność modyfikacji algorytmów zmiany częstotliwości próbkowania (*resampling*) i filtracji przesunięć spektrum.

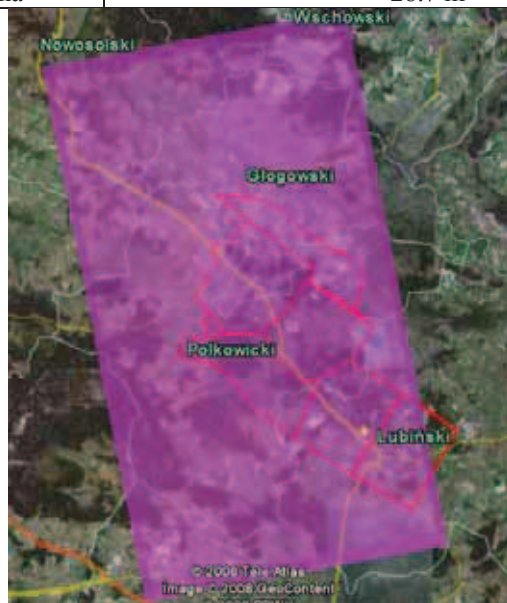
### 4. PRZETWARZANIE DANYCH DLA OBSZARU LGOM

Dla obszaru LGOM wykorzystano dwa zobrazowania TerraSAR-X wykonane w trybie StripMap (Tabela 1). Użyto produktów zawierających dane zespolone (*Single Look Complex*) w formacie COSAR (*COmplex SAR*) – Fritz (2005). Ich charakterystykę przedstawia Tabela 2 a zasięg przestrzenny Rys. 1.

Tabela 2. Charakterystyka scen TerraSAR-X wykorzystanych w opracowaniu

	1	2
Nr. Orbity	02408 ASCENDING	02575 ASCENDING
Data i czas rejestracji	2007-11-20 16:34:52.	2007-12-01 16:34:51
Kąt padania wiązki	31°	31°
Polaryzacja	HH	HH

Baza czasowa	11 dni
Baza geometryczna	-165.2 m
Czułość topograficzna	28.7 m

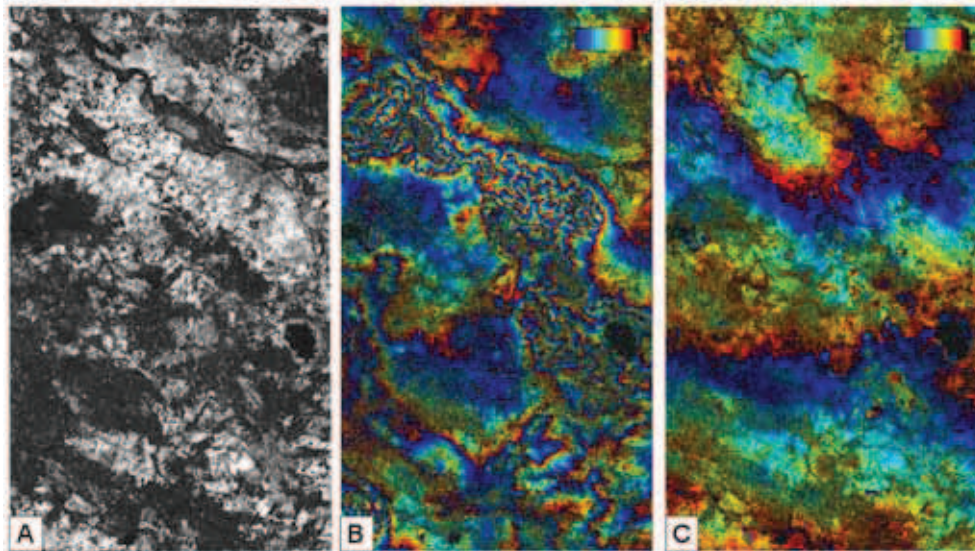


Rys. 1. Zasięg opracowanych danych TerraSAR-X na tle obszarów górniczych LGOM (dane prezentowane w systemie Googleearth)

Przetwarzanie interferometryczne przeprowadzono przy zastosowaniu dostępnego na licencji *Open Source* oprogramowania interferometrycznego DORIS (Kampes et al., 2003). Z uwagi na fakt, że użyto danych zarejestrowanych w trybie StripMap nie było konieczności wprowadzania istotnych ingerencji do zaimplementowanych w DORIS algorytmów (Marinković, 2008) a zmieniono jedynie szereg parametrów. Wprowadzone modyfikacje kodu polegały na stworzeniu modułu czytającego dane z formatu COSAR i konwertującego je na format wejściowy DORIS.

Współrejestrację przeprowadzono dwuetapowo. W etapie wstępnym wykorzystano dane o orientacji zewnętrznej sensora (tzw. orbity) zapisane w plikach nagłówkowych dostarczanych razem z danymi. W etapie współrejestracji precyzyjnej użyto znacznie większej aniżeli standardowa liczby okien (1000) oraz przeprowadzono optymalizację ich rozkładu przestrzennego (Perski et al., 2008). Takie rozwiązanie okazało się wystarczające dla rejestracji danych StripMap. Duża baza geometryczna pomiędzy rejestracjami sprawia, że topografia terenu jest bardzo silnie widoczna na otrzymanym interferogramie (Rys. 2). Wpłynęła na to tzw. czułość topograficzna (tzw. *Altitude of Ambiguity*) czyli wielkość deniwelacji terenu, jaka odpowiada zmianie fazy interferogramu o pełny cykl (2 PI). Do usunięcia składowej topograficznej z interferogramu użyto numerycznego modelu terenu o rozmiarach piksela odpowiadających 1 sekundzie kątowej. (DTED poziom 2). Z uwagi na znaczne różnice w rozdzielczości i szczegółowości pomiędzy DTED a danymi TerraSAR-X elementy topografii nie zostały w pełni usunięte. Transformację produktów interferometrycznych

do geometrii układu współrzędnych (Układ 2000 strefa 15°) dokonano w oparciu o parametry orientacji zewnętrznej (orbity) oraz dane wysokościowe DTED.



Rys. 2. Wyniki przetwarzania pełnych scen SAR TerraSAR-X: A – mapa koherencji; B – interferogram; C – skorygowany interferogram po odjęciu składowej topograficznej

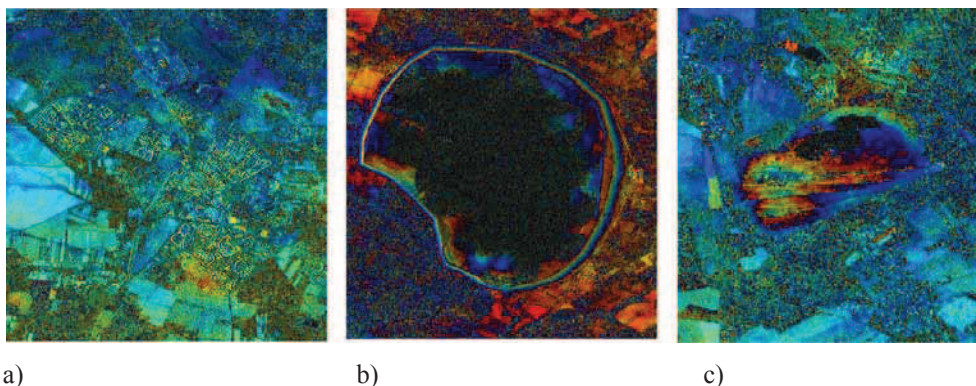
## 5. INTERPRETACJA OBRAZU INTERFEROMETRYCZNEGO TERRASAR-X

Obszar LGOM był już badany interferometrycznie przy wykorzystaniu danych SAR z satelity ERS-1 (Krawczyk, Perski, 2000a,b) a także ERS-2 i Envisat (Popiołek 2006). Wynikami bardzo szybko udało się zainteresować spółkę KGHM Polska Miedź SA w wyniku czego w latach 2003-2006 wykonano kilka opracowań naukowych z wykorzystaniem techniki InSAR. Ich wyniki zostały wykorzystane w monitorowaniu niecek obniżeniowych na terenach górniczych kopalń miedzi.

Otrzymany interferogram TerraSAR-X charakteryzuje się bardzo dobrą koherencją (Rys. 2). Pasmo X mikrofal charakteryzuje się mniejszą długością fali aniżeli pasmo C wykorzystywane w systemach ERS i Envisat (5,7 cm). Sprawia to, że wiązka radarowa ulega rozproszeniu od znacznie mniejszych obiektów co powoduje znacznie silniejszą dekoherencję. Efekt ten jest kompensowany przez zastosowanie krótszej bazy czasowej 11 dni w porównaniu z 35 dniami dla ERS/Envisat. Czynnikiem znacznie bardziej poprawiającym koherencję jest jak się okazuje wysoka rozdzielczość przestrzenna danych: charakterystyka rozpraszania sygnału jest bowiem częściej zbliżona do odbicia typu powierzchniowego niż tzw. odbicia objętościowego (Perski et al., 2007). Na zjawisko to zwrócili uwagę Adam et al. (2008) wykonując pierwsze testy zastosowania techniki PSInSAR. W przypadku omawianego interferogramu należy

zwrócić uwagę, że do jego wygenerowania posłużyły dane zarejestrowane na przełomie listopada i grudnia a więc w okresie kiedy nie następuje wzrost roślinności.

Przy analizie danych TerraSAR-X warto także wspomnieć o kilku ich cechach nie mających odpowiednika w systemach o niższej rozdzielczości (Rys. 3):



Rys. 3. Szczegóły obrazu interferometrycznego TerraSAR-X

Rys. 3a przedstawia miasto Lubin. Na interferogramie wyraźnie widać różnice fazy wynikające ze zróżnicowania wysokościowego budynków. Budynki nie były uwzględnione w modelu DTED stąd efekt ten nie został usunięty w trakcie przetwarzania danych. Rysunek 3b uwiadamia obwałowanie składowiska Żelazny Most. I w tym przypadku widoczne są prążki interferometryczne. Nie są one jednak wywołane deformacją a podwyższeniem obwałowania jakiego dokonano w ostatnich latach. Dane DTED są nieaktualne w tym przypadku. Rys. 3c przedstawia obszar kopalni piasku „Obora”, podobnie jak w poprzednim przypadku i tutaj dane DTED są nieaktualne, a obraz interferometryczny ukazuje różnice w topografii terenu. Wszystkie powyższe przykłady ukazują, że dane interferometryczne TerraSAR-X mogą być również wykorzystywane do aktualizacji sytuacji topograficznej na obszarach działalności górniczej.

## 6. WNIOSKI

Zastosowanie obrazów radarowych z satelity TerraSAR-X w stosunku do obrazów ASAR przynosi następujące korzyści:

1. Radykalna poprawa jakości kalibracji geometrycznej obrazu radarowego w treść topograficzną danego terenu (dzięki większej rozdzielczości).

2. Możliwość rejestracji znacznie krótszych okresów przyrostu deformacji terenu (nawet do 11 dni) co należy wykorzystać przede wszystkim w obszarach eksploatacji górnictwa węglowego. W tych rejonach notujemy na mniejszych obszarach większe przyrosty obniżeń.

3. Znacznie krótszy czas realizacji zlecenia wykonania skanowania radarowego, w wypadku TerraSAR-X zamówienie należy złożyć do 4 dni przed najbliższym

możliwym terminie przelotu satelity tak aby dane zostały zarejestrowane. W przypadku Envisat-a czas programowania bez dodatkowych kosztów wynosi 15 dni roboczych.

Badania sfinansowano w ramach projektu badawczego Ministerstwa Nauki nr 4T12E 001 26: „Możliwości wykorzystania satelitarnej interferometrii radarowej InSAR w monitoringu terenów górniczych i pogórnich”. Numeryczny model powierzchni terenu DTED poziom 2 został udostępniony przez Wojskowy Ośrodek Geodezji i Teledetekcji w ramach umowy o współpracy naukowej z Uniwersytetem Śląskim

## 7. LITERATURA

Adam N., Eineder M., Schatter B., Yague-Martines N. 2008. First TerraSAR-X interferometry evaluation, Fifth International Workshop on ERS/Envisat SAR Interferometry, 'FRINGE07', Frascati, Italy, CDROM.

Bamler R., Hartl P. 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14: R1-R54.

Cuprum 2008. Ocena wyników pomiarów sieci szczegółowej obserwacji wykonanych w 2007 roku przez CBPM Cuprum dla O/ZG „Rudna” Cuprum. Wrocław 2008, praca zbiorowa niepublikowana.

Fritz T., Eineder M. (red.) 2008. TerraSAR-X Ground Segment Basic Product Specification Document, TX-GS-DD-3302, [http://www.dlr.de/tsx/documentation/SAR\\_Basic\\_Products.pdf](http://www.dlr.de/tsx/documentation/SAR_Basic_Products.pdf)

Fritz T. 2005. TerraSAR-X Ground Segment Level 1b Product Format Specification TX-GS-DD-3307, [http://www.dlr.de/tsx/documentation/TX-GS-DD-3307\\_Level-1b-Product-Format-Specification\\_1.3.pdf](http://www.dlr.de/tsx/documentation/TX-GS-DD-3307_Level-1b-Product-Format-Specification_1.3.pdf)

Goldstein R.M., Zebker H.A., Werner, C.L. 1988. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23(4): 713-720.

Huanyin Y., Hanssen R., Kianicka J., Marinkovic P., Leijen F., Ketellar G. 2004. Sensitivity of topography of InSAR data coregistration, ENVISAT & ERS Symposium, Salzburg, Austria, 6-10 September, 2004, CDROM.

Kampes B.M., Hanssen R.F., Perski Z. 2003. Radar Interferometry with Public Domain Tools, Third International Workshop on ERS SAR Interferometry, 'FRINGE03', Frascati, Italy, 1-5 Dec 2003, CDROM.

Krawczyk A., Perski Z. 2000a. Application of satellite radar interferometry on the areas of underground exploitation of copper ore in LGOM – Poland, 11th International Congress of the International Society for Mine Surveying. AGH, Kraków: 209-218.

- Krawczyk A., Perski Z. 2000b. Okiem radaru. Zastosowanie satelitarnej interferometrii radarowej na terenach eksploatacji rud miedzi w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym, *Geodeta*, 10: 50-54
- Marinković P. 2008. New developments in Earth Observation: using TerraSAR-X satellite data for monitoring geophysical parameters. NAC-9, Netherlands Aardwetenschappelijk Congres, 18 - 19 March 2008, Veldhoven. – poster
- Massonnet, D. & Feigl, K.L. 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4): 441-500.
- Perski Z. 1999. Osiadania terenu GZW pod wpływem eksploatacji poziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). *Przegląd Geologiczny*, 2: 171-174.
- Perski Z., Hanssen R., Marinković P. 2008. Deformation of The Margin of Sudety Mountains (Southern Poland) Studied by Persistent Scatterers Interferometry, Fifth International Workshop on ERS/Envisat SAR Interferometry, 'FRINGE07', Frascati, Italy, CDROM.
- Perski Z., Ketelaar G., Mróz M., 2007. Interpretacja danych Envisat/ASAR o przemiennej polaryzacji na obszarach zurbanizowanych w kontekście charakterystyki stabilnych rozpraszaczy (persistent scatterers). *Archiwum Fotogrametrii i Teledetekcji*, 16: 467-482.
- Popiołek E. 1997. Analiza rozwoju wielkopowierzchniowej niecki obniżeniowej terenu na obszarze LGOM wywołanej odwodnieniem warstw trzeciorzędowych i czwartorzędowych AGH, Kraków 1997. Niepublikowane.
- Popiołek E. (red.) 2006 . Analiza przemieszczeń pionowych terenów górniczych kopalń KGHM „Polska Miedź S.A. z wykorzystaniem techniki interferometrii satelitarnej. Stowarzyszenie Naukowe im. S.Staszica w Krakowie. Niepublikowane.
- Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R.M. 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3): 333-382.



## **HIGH RESOLUTION SAR INTERFEROMETRY (INSAR) WITH TERRASAR-X DATA**

KEY WORDS: SAR interferometry, InSAR, TerraSAR-X, Envisat, Legnica-Głogów Copper Ore Mining Area

### **Summary**

The paper presents preliminary results of interferometric analysis of the high-resolution TerraSAR-X data for a deformation monitoring applications. The interferogram was computed for the Legnica-Głogów Copper Ore Mining Area with a dominant terrain deformation signal. This is the first interferogram of this type computed for any area in Poland. In addition, general characteristics of TerraSAR-X system were reviewed with a particular reference to different SAR acquisition modes and their significance for interferometric applications. Due to its shorter temporal baseline, the TerraSAR-X interferogram shows only a fraction of the deformation detected by Envisat, but the average velocity still remained almost identical, as shown by the selected examples. The comparison of the two SAR systems showed their detectability and measurability to be similar.

dr Zbigniew Perski  
e-mail: Zbigniew.Perski@us.edu.pl  
tel. +48 323689226  
fax: +48 322915865

dr inż. Artur Krwczyk  
e-mail: artkraw@agh.edu.pl  
tel. +48 895234915  
fax: +48 895233210

inż. Petar Marinković  
e-mail: p.marinkovic@tudelft.nl  
tel. +31 15 278 8143  
fax: +31 15 278 3711