

**ZASTOSOWANIE METOD INTERFEROMETRII RADAROWEJ INSAR DO  
BADANIA NATURALNYCH RUCHÓW POWIERZCHNI TERENU W POLSCE.  
PROJEKT GEO-IN-SAR**

**APPLICATION OF SAR INTERFEROMETRIC (INSAR) METHODS FOR THE  
STUDY OF NATURAL EARTH SURFACE DISPLACEMENTS IN POLAND.  
GEO-IN-SAR PROJECT**

**Zbigniew Perski<sup>1</sup>, Marek Mróz<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji, Uniwersytet Warmińsko - Mazurski w Olsztynie

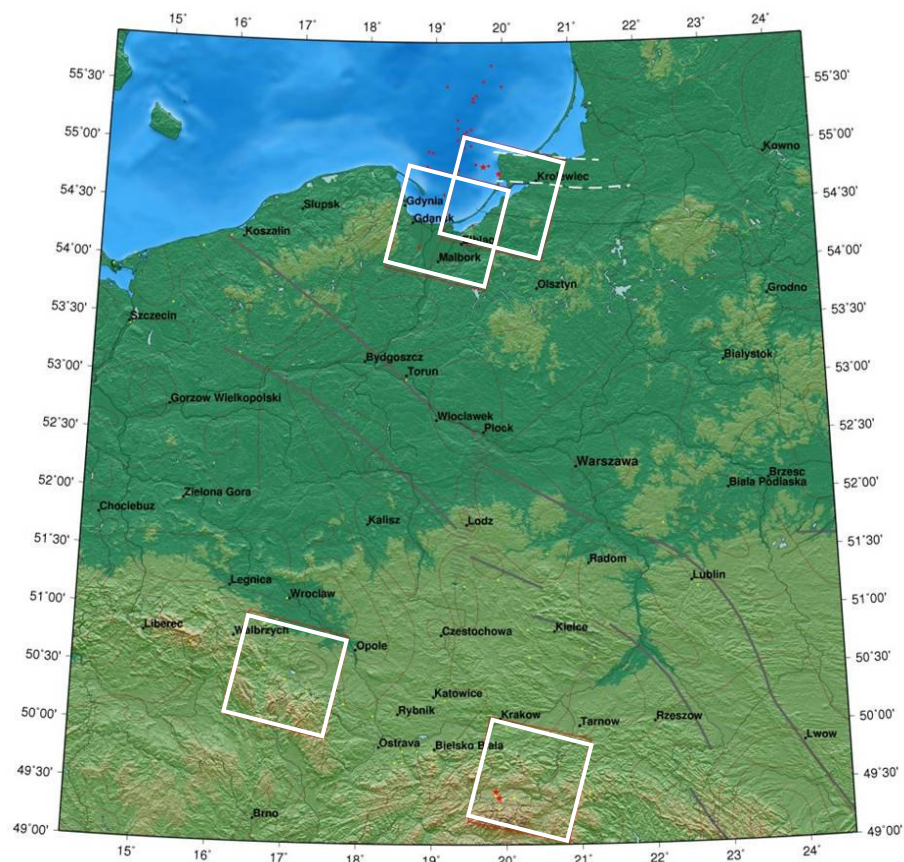
**SŁOWA KLUCZOWE:** satelitarna interferometria radarowa (InSAR), pionowe ruchy skorupy ziemskiej, pomiary deformacji, teledetekcja satelitarna, geodynamika

**STRESZCZENIE:** W artykule przedstawiono problematykę wykorzystania metod satelitarnej interferometrii radarowej InSAR i jej najnowszej odmiany PSInSAR bazującej na obiektach punktowych tzw. rozpraszaczach stabilnych, do badania współczesnej geodynamiki wybranych obszarów Polski. Scharakteryzowane zostały poligony badawcze „Warmia”, „Podhale” i „Otmuchów”. Omówiono zastosowaną metodykę PSInSAR a także problemy związane z przetwarzaniem danych ich analizą oraz interpretacją wyników. Z uwagi na ograniczenia techniczne w ramach projektu analiza PS przeprowadzona została dotychczas jedynie dla wybranych obszarów w ramach poligonów badawczych. We wszystkich przypadkach uzyskano zadowalające zagęszczenie rozpraszaczy stabilnych (PS). Otrzymane wyniki pomiarów deformacji są obecnie poddawane wnikliwym analizom. Wstępne analizy wykazały, że w niektórych przypadkach konieczne będzie powtórne generowanie punktów PS dla nieco większego obszaru. Wykazano, że analizy punktów PS dla celów geodynamicznych nie da się prowadzić w oderwaniu od samej metodyki PSInSAR. Dotychczasowe wyniki pozwalają mieć nadzieję, że dane PSInSAR w istotny sposób przyczynią się do wzbogacenia wiedzy na temat współcześnie zachodzących deformacji na terenie Polski oraz zweryfikowania lub zmodyfikowania hipotez o charakterze deformacji i w niektórych przypadkach pozwolą na uszczegółowienie modeli geofizycznych deformacji.

## **1. WSTĘP**

Celem projektu GEO-IN-SAR jest wykorzystanie najnowocześniejszych osiągnięć satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR) do pomiaru, zachodzących współcześnie, naturalnych ruchów powierzchni terenu na obszarze Polski i terenach przygranicznych. Do badań wytypowane zostały trzy poligony badawcze gdzie stwierdzono występowanie takich

zjawisk. Są to: rejon półwyspu Sambia, nawiedzonego przez silne trzęsienie Ziemi we wrześniu 2004 wraz z obszarem Warmii i Pomorza, obszar rowu tektonicznego Paczkowa, charakteryzujący się występowaniem współcześnie aktywnych uskoków tektonicznych a także rejon Podhala – obszar występowania wstrząsów tektonicznych, aktywności geotermalnej i młodej tektoniki, gdzie należy spodziewać się występowania mierzalnych deformacji powierzchni terenu (Rys.1).



Rys. 1. Zasięgi poligonów badawczych projektu GEO-IN-SAR na tle ukształtowania powierzchni terenu Polski i głównych elementów tektonicznych (strefa Teisseyre'a-Tornquista)

Naturalne, współczesne ruchy powierzchni skorupy ziemskiej nie były dotychczas przedmiotem badań InSAR na terenie Polski gdyż z uwagi na silne pokrycie roślinnością oraz zmienne warunki atmosferyczne z dużą liczbą dni deszczowych skutecznie wykluczały zastosowania tradycyjnych technik InSAR dla większości obszarów Polski. Spodziewane deformacje były niewielkie a wzrost dekorrelacji sygnału radarowego wraz ze wzrostem czasu pomiędzy użytymi do konstrukcji interferogramu rejestracjami SAR nie pozwalał na tego rodzaju badania. Tradycyjna metodyka InSAR została jedynie z sukcesem zastosowana w Polsce na obszarach o silnych deformacjach związanych z podziemnym wydobyciem surowców: na Górnym Śląsku (Perski i Jura, 1999), oraz na obszarze Legnicko-Głogowskiego zagłębia miedziowego LGOM (Krawczyk i Perski, 2000). Ostatnie, światowe osiągnięcia metodyczne w dziedzinie InSAR, metody oparte na analizie rozpraszaczy stabilnych PS (*Persistent Scatterers*) sugerują, że prowadzenie badań geodynamicznych tymi metodami jest już możliwe. Nawet na terenach rolniczych, charakteryzujących się zwykle słabą koherencją w przypadku klasycznej metody InSAR liczba znajdowanych PS jest zazwyczaj znacznie większa w stosunku do możliwych do pomierzenia punktów metodami tradycyjnymi (Ketelaar et al., 2006).

## **2. SATELITARNA INTERFEROMETRIA RADAROWA**

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 (*Synthetic Aperture Radar*) tego samego obszaru. Wynik tej operacji – interferogram, przedstawia różnice fazy „zawinięte” w cykle 2PI. Dzięki zastosowaniu technik tzw. rozwijania fazy jest możliwe następnie zrekonstruowanie pełnego sygnału. Dobry przegląd metodyki i obszarów zastosowań InSAR można znaleźć w (Bamler i Hartl, 1998; Massonnet i Feigl 1998; Rosen et al., 2000). Na łamach Archiwum Teledetekcji i Fotogrametrii tematyka InSAR była prezentowana już wcześniej (Perski 1999; Perski et al., 2001).

Największe ograniczenia metody InSAR wiążą się z tzw. dekorrelacją czasową, która związana jest ze zmianami właściwości elektromagnetycznych lub/i pozycją rozpraszacza wewnątrz komórki rozdzielczości. Kolejnym ograniczeniem metody InSAR jest występowanie tzw. artefaktów atmosferycznych. Zróżnicowana zawartość pary wodnej w atmosferze a także turbulentny charakter atmosfery są źródłem dodatkowej składowej fazowej sygnału nazywanej atmosferycznym obrazem fazy (*Atmospheric Phase Screen APS*). W przypadku pojedynczego lub kilku interferogramów efekty atmosferyczne są bardzo trudne lub wręcz niemożliwe do usunięcia stąd uzyskiwane dokładności pomiarowe są często dużo niższe od oczekiwanych. Z powodu wymienionych ograniczeń praktyczne użycie metody InSAR jest w większości przypadków zredukowane do danych o małych bazach czasowych, przypadków badania zjawisk o silnych deformacjach zachodzących w czasie pomiędzy kolejnymi rejestracjami, badania obszarów pozbawionych roślinności, przypadków, gdy oba obrazy użyte do konstrukcji interferogramu zostały zarejestrowane w tych samych bądź bardzo zbliżonych warunkach atmosferycznych.

Ominięcie podstawowych ograniczeń metody D-InSAR okazało się możliwe dzięki zastosowaniu metod punktowych, opartych na selekcji rozpraszaczy stabilnych. Pierwsze tego typu metody zostały opracowane w końcu lat '90 XX wieku przez zespół POLIMI z Politechniki w Mediolanie (Ferretti et al., 2001). Metody te wykorzystują właściwości naturalnych reflektorów radarowych zwanych rozpraszaczami stabilnymi PS (*Persistent Scatterers*, *Permanent Scatterers*), stąd ich nazwa PSInSAR (*Persistent Scatterers SAR interferometry*). Rozpraszacze takie, których właściwości omówiono w (Perski et al., 2007). Charakteryzują się bardzo stabilną fazą sygnału radarowego, praktycznie niewrażliwą na zmiany geometrii obrazowania oraz warunki atmosferyczne. Właściwość ta wynika z faktu, że dominującym dla piksela rozpraszacza PS jest odbicie od pojedynczego, punktowego obiektu o rozmiarach podpikselowych. Mogą nimi być dachy i narożniki budynków, fragmenty różnego rodzaju konstrukcji (mostów, ogrodzeń, itp.) czy też wysokie słupy telegraficzne czy latarnie. Na terenach pozbawionych obiektów infrastruktury rozpraszacze stabilne stanowią wychodnie skał.

Główną ideą metod PSInSAR jest dekompozycja serii interferometrycznych obserwacji fazowych na trzy podstawowe składowe: deformacji, wysokości względnej i APS. Oczywiście operacja ta jest możliwa do przeprowadzenia jedynie dla pikseli o fazie zachowującej warunek koherencji (PS). Podstawowym warunkiem prawidłowego przeprowadzenia operacji dekompozycji sygnału jest duża liczba obserwacji, stąd wymaganie, co najmniej 20 interferogramów. Duża liczba obserwacji umożliwia dokładne wyznaczenie modelu deformacji oraz modelu obrazu atmosfery (APS). Należy podkreślić, że w metodzie PSInSAR, podobnie jak w przypadku InSAR mamy do czynienia z wyznaczeniem wartości deformacji o charakterze względnym tak w czasie jak i przestrzeni.

## 2.1. Metodyka PSInSAR

Podstawy metodyczne i teoretyczne zostały przedstawione szczegółowo w niniejszym tomie (Porzycka i Leśniak, 2007). W artykule niniejszym większy nacisk położono na omówienie konkretnej implementacji metodyki PSInSAR oraz problematyki związanej z właściwą analizą i interpretacją danych PSInSAR.

Pierwszym etapem przetwarzania jest wybór tzw. sceny referencyjnej, będącej odniesieniem czasowym dla wszystkich pozostałych obserwacji. Wyboru tego dokonuje się w ten sposób, aby bazy czasowe i geometryczne pomiędzy sceną referencyjną i pozostałymi były jak najmniejsze. Następnie dokonuje się współrejestracji i wpasowania geometrycznego wszystkich pozostałych scen do sceny referencyjnej. Dokonuje się tego za pomocą metod stosowanych w InSAR. Po współrejestracji i wpasowaniu oblicza się interferogramy pomiędzy sceną referencyjną i poszczególnymi scenami. Warto zauważyć, że istnieją również techniki wykorzystujące nie tylko interferogramy liczone w stosunku do sceny referencyjnej, ale również pozostałe, bardziej optymalne pary interferometryczne zob. metoda SBAS (Berardino et al., 2002).

Kluczowym elementem metody PSInSAR jest wykrycie rozpraszaczy stabilnych a następnie wyodrębnienie informacji fazowej dla tych właśnie punktów. Detekcja ta jest oparta na wieloczasowej analizie amplitudy metodą dyspersji amplitudowej (Ferretti et al., 2001) wykorzystując ważną właściwość, jaką jest ścisły związek stabilności amplitudy ze stabilnością fazy interferometrycznej. Można jednak również zastosować analizę czasową koherencji (Berardino et al., 2002; Hooper et al., 2004).

Poniżej przedstawiono krótki opis wybranych procedur implementacji algorytmu PSInSAR stworzonej i stosowanej przez *Radar Remote Sensing Group* w *Delft University of Technology* (Holandia).

Etap 1: Selekcja PSC Tzw. Etap estymacji wstępnej. W etapie tym selekcyonowany jest inicjalny zbiór PSC (*Persistent Scatterers Candidates*) metodą dyspersji amplitudowej (Ferretti et al., 2001) albo stosunku sygnału do zakłóceń pasywnych (*signal-to-clutter ratio* - SCR) (Adam et al., 2003).

Etap 2: Konstrukcja sieci. Punkty PSC łączy się ze sobą formując sieć, dla której dokonuje się obliczenia względnych różnic obserwowanej fazy dla każdego z segmentów. Użycie obserwacji względnych pozwala zminimalizować wpływ głównych źródeł błędów takich jak atmosferyczne opóźnienie sygnału czy błędy orbit. Definiowanie sieci odbywa się zgodnie z zasadami triangulacji Delaunay'a czy w inny sposób zapewniający większą redundancję (Leijen et al., 2006).

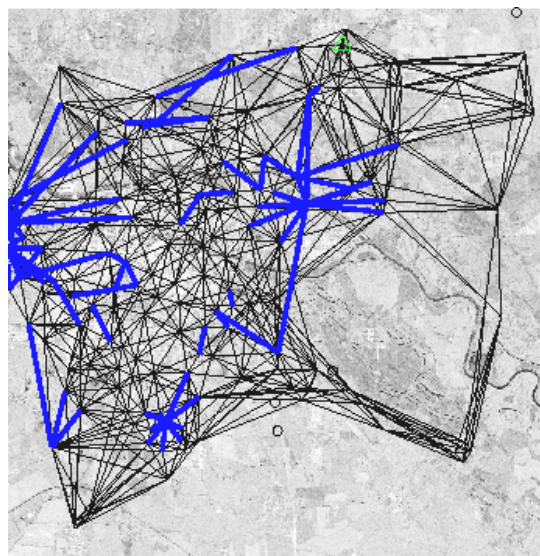
Etap 3: Rozwijanie fazy i estymacja parametrów dla poszczególnych segmentów. Po obliczeniu wartości faz względnych dla każdego z segmentów i dla każdego interferogramu, fazy te są rozwijane (względem czasu) wraz z estymacją wymaganych parametrów. Parametry te to np. różnice wysokości (wysokości względne) i deformacje względne. Zakładając liniowy model deformacji oblicza się wartości wysokości względnych oraz residua (tj. wartości resztkowe fazy po odjęciu komponentu liniowego). Składowe residuów są wydzielane następnie na etapie filtracji.

Etap 4: Przestrzenne rozwijanie fazy. Kiedy faza interferometryczna jest rozwinięta (względem czasu) i gdy wymagane parametry deformacji są obliczone dla poszczególnych segmentów sieci zachodzi potrzeba ich integracji w odniesieniu do pojedynczego punktu odniesienia, tak by otrzymać wartości względne dla każdego PSC. Dla prawidłowego rozwiązania wymagane jest by procent skorygowanych dwuznaczności był znacznie mniejszy od całkowitej liczby boków (np. <10%). Po otrzymaniu poprawnej sieci parametry są obliczane ponownie. Dla oceny jakości i propagacji błędów poprawionej sieci można zastosować standardowe algorytmy geodezyjne (Rys. 2).

Etap 5: Filtracja. Celem etapu filtracji jest oddzielenie składowej atmosferycznej (i błędów orbit) od składowej nieliniowej deformacji. Separacja jest wykonywana przy wykorzystaniu sekwencji filtrów (Ferretti et al., 2000). Filtracja to np. kombinacja filtrów dolnoprzepustowego w przestrzeni i górnoprzepustowego w czasie dla składowej atmosferycznej. Należy zauważyć, że przyjęcie odpowiednich parametrów filtracji ma bardzo duży wpływ na ostateczny wynik.

Etap 6: Obliczenie obrazów składowej atmosferycznej fazy (APS). Gdy składowa atmosferyczna zostanie wydzielona następuje jej interpolacja (metodą kriging'u) w celu obliczenia obrazu fazy atmosferycznej APS (*Atmospheric Phase Screen*) pokrywającego cały

interferogram. Po uzyskaniu APS wykonywana jest korekta poszczególnych interferogramów. Etapy 2-6 są następnie powtarzane iteracyjnie tyle razy dopóki otrzymane APS nie zmniejszą się poniżej założonej wartości progowej. Po zakończeniu ostatniego cyklu etapy 2-4 są powtarzane raz jeszcze w celu otrzymania wyników dla inicjalnego zbioru PSC. Punkty te posłużą w następnych etapach jako lokalne punkty odniesienia.



Rys. 2. Przykład sieci PSC po pierwszym etapie wyrównania. Linie pogrubione (niebieskie) to segmenty korygowane. Obszar Wrocławia

Etap 7: Rozwijanie fazy i obliczenie parametrów dla PS. W etapie tym następuje selekcja potencjalnych PS (PSP), rozwinięcie fazy interferometrycznej oraz obliczenie parametrów. Selekcja PSP może następować w oparciu o wyższy aniżeli dla PSC próg dyspersji amplitudowej lub testowaniu podlegać mogą na przykład wszystkie piksele. Faza każdego potencjalnego PS jest rozwijana niezależnie, w stosunku do 3 najbliższych PSC i otrzymane niejednoznaczności mogą być ponownie testowane metodą sieci, dzięki czemu wiarygodność wyników znacznie wzrasta. Dla tak wyselekcjonowanych PS obliczone zostają wysokość względna, deformacja wg. modelu liniowego i residuum fazy (deformacja nieliniowa) w odniesieniu do przyjętego punktu referencyjnego.

### **3. UWAGI DOTYCZĄCE PRZETWARZANIA DANYCH DLA OBSZARÓW TESTOWYCH**

Należy podkreślić, że wszystkie wyniki otrzymane metodą PSInSAR mają charakter względny tak w czasie – względem sceny referencyjnej użytej do konstrukcji interferogramów jak i przestrzeni – względem punktu referencyjnego, dla którego prowadzono obliczenia sieci. Szczególną uwagę należy zwrócić na punkty wykazujące względny ruch w górę o niewielkiej amplitudzie: najczęściej jest on spowodowany tym, że punkt referencyjny wykazuje w rzeczywistości obniżenie. W przypadku danych ERS-1/2 i ENVISAT o stosunkowo niskiej rozdzielczości znaczenia nabiera również dodatkowa składowa fazy wynikająca z podpikselowej lokalizacji rozpraszacza (Perissin et al., 2005). Jakość otrzymanych wyników zależy przede wszystkim od poszczególnych etapów a w szczególności:

Etapu współrejestracji obrazów - w przypadku złej rejestracji, obniżona zostanie koherencja i większość punktów PSC i PSP zostanie odrzucona

Rozwijania fazy PSC – złe rozwinięcie fazy spowoduje pomyłkę od całe 2PI stąd niebezpieczeństwo uzyskania zupełnie nierealistycznych wyników. Zdarza się to w przypadkach niejednorodnych sieci.

Filtracji APS – niebezpieczeństwo nieprawidłowego oddzielenia fazy atmosferycznej od deformacji nieliniowej.

Przetwarzanie danych metodami InSAR i PSInSAR prowadzono na czterech zestawach danych zawierających od 51 do 67 scen radarowych SAR. Z uwagi na ograniczenia sprzętowe i programowe przetwarzanie PSInSAR prowadzono nie dla obszarów pełnej sceny radarowej a jedynie studia dla małych obszarów o rozmiarach do ok. 25 x 25 km. Nawet przy tak stosunkowo niewielkich obszarach sumaryczna wielkość zbiorów wynikowych wahała się w granicach 100-150 GB a przetwarzanie danych trwało ok. 3 dni dla obszaru pomimo wykorzystania przetwarzania równoległego z użyciem klastra obliczeniowego (10 węzłów). Dla wszystkich obszarów testowych punkty PSInSAR zostały obliczone przy założeniu modelu liniowego, co w przypadku spodziewanych powolnych deformacji długookresowych wydaje się być rozwiązaniem właściwym.

### **4. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ**

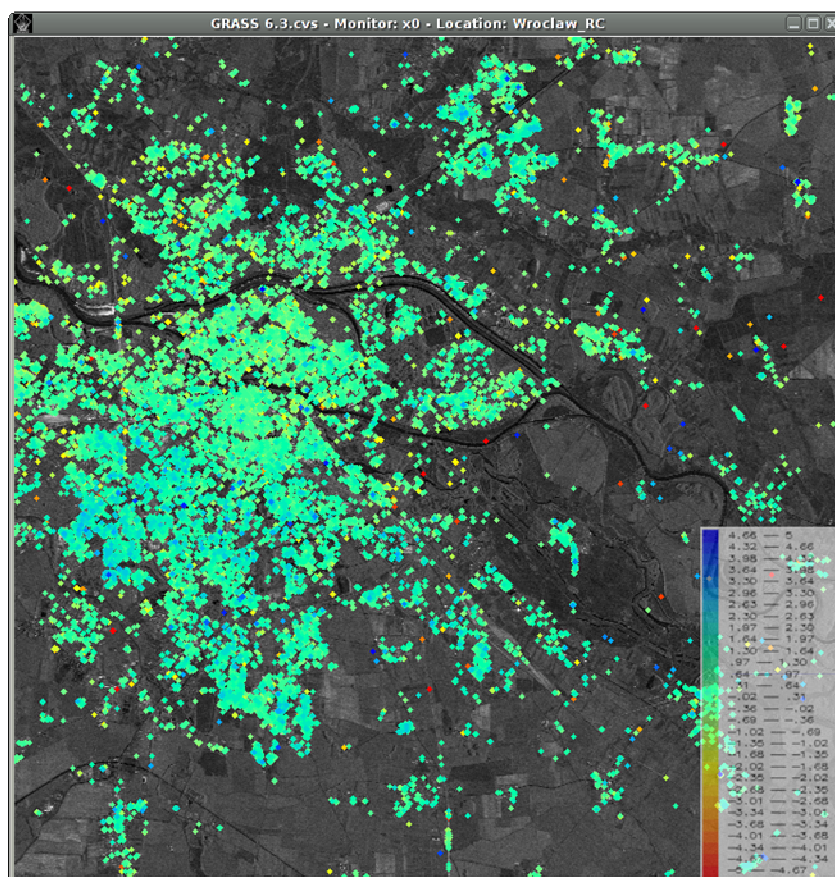
Z uwagi na ograniczoną objętość artykułu przedstawione zostaną jedynie wybrane wyniki badań, które z konieczności zostaną omówione jedynie w sposób bardzo ogólny.

#### **4.1. Deformacje terenu na obszarze miasta Wrocławia i w rejonie rowu tektonicznego Paczkowa**

Obliczenia dla rejonów Wrocławia i Paczkowa prowadzono w oparciu o ten sam zestaw danych radarowych. Opracowanie podzielono na dwa mniejsze obszary, dla których cały proces obliczeniowy prowadzono oddzielnie, przy założeniu tej samej sceny referencyjnej oraz parametrów obliczeniowych.



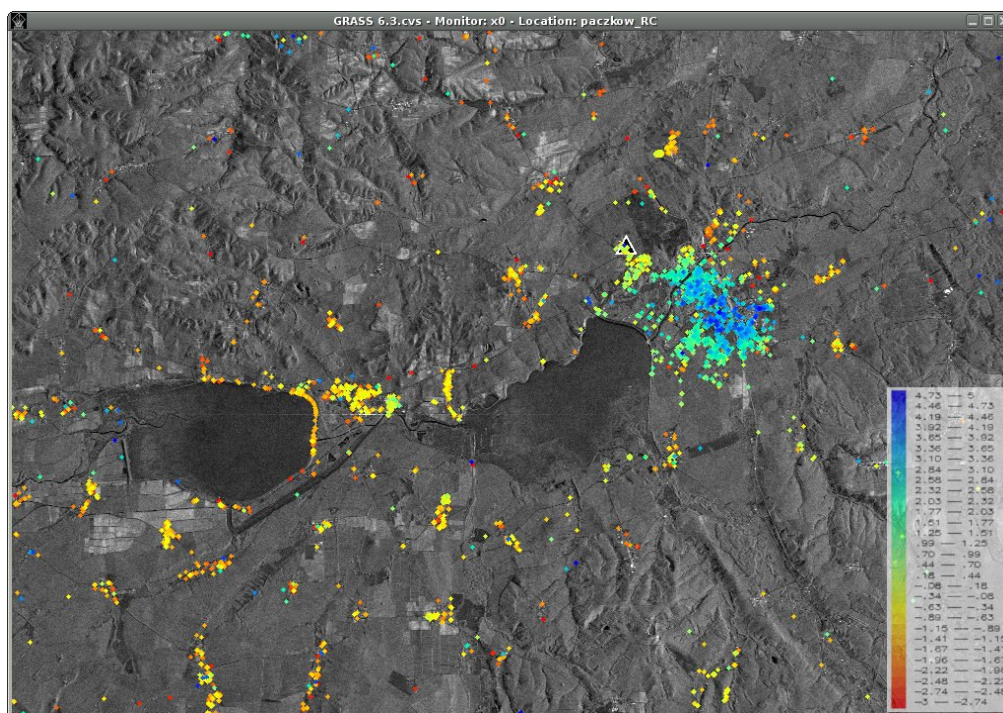
Dla rejonu Wrocławia otrzymany zbiór PS wykazuje bardzo małe względne prędkości deformacji. Część miasta w pobliżu koryta Odry obniża się o ok. 2 mm/rok w stosunku do południowo zachodniej części miasta. Wyniki te są generalnie zgodne z rezultatami niwelacji precyzyjnej (Grzempowski i Caboń, 2005). Dane niwelacyjne wykazują, największe obniżenia poza centrum miasta i obniżanie Wrocławia następuje w sposób blokowy. W świetle tych wyników dane PSInSAR powinny obejmować znacznie większy obszar i wymagane jest ich ponowne wygenerowanie (Rys. 3).



Rys. 3. Obszar opracowania i zbiór punktów PS dla obszaru miasta Wrocławia



W rejonie Paczkowa otrzymano znacznie mniejsze zagęszczenie punktów PS z uwagi na znacznie bardziej rozproszoną zabudowę. Spójne wyniki (dobrze zagęszczona sieć) dotyczą przede wszystkim miejscowości takich jak Nysa i Paczków oraz korony zapory zbiornika Otmuchowskiego. Prędkości deformacji wykazują ciekawą anomalię na obszarze miasta Nysy, które ulega względnemu podnoszeniu o 2-5 mm/rok (Rys. 4). Bardzo gęsta sieć PSC o krótkich segmentach oraz duża liczba PS wykluczają występowanie błędów systematycznych jednak wynik ten musi zostać zweryfikowany i traktować go należy z dużą ostrożnością. W świetle dotychczasowych pomiarów niwelacyjnych prowadzonych po wybudowaniu zapory może wskazywać na stabilizację dynamiki terenu, który po znaczącym obniżeniu wykazuje obecnie podnoszenie. Współcześnie zachodzące pulsacyjne ruchy obniżająco - wznoszące były opisywane na tym obszarze już wcześniej (Gierwielaniec i Woźniak, 1981).



Rys. 4. Obszar opracowania i zbiór punktów PS dla rejonu Paczkowa

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały bardzo duży potencjał metody PSInSAR w zastosowaniu do badań geodynamicznych. Skomplikowane i bardzo wymagające przetwarzanie danych powoduje, że dla otrzymania wiarygodnych wyników w zakresie geodynamiki oraz pełnego opisu błędów konieczna jest znajomość użytych algorytmów i zastosowanych parametrów. Na obecnym etapie projektu nie jest jeszcze jasne na ile otrzymane wyniki wzbogacą wiedzę o współczesnych ruchach skorupy ziemskiej na obszarze Polski. Przetwarzanie danych dla kilku zaplanowanych obszarów (np. półwysep Sambia) nie zostało jeszcze zakończone a inne (np. Wrocław) wymagają ponownego przetworzenia. Konieczna jest także wnikliwa analiza i weryfikacja założonych punktów odniesienia dla konstrukcji sieci PS oraz zasadność użycia modelu liniowego. Planuje się także wykonanie testów z innymi modelami deformacji oraz algorytmami adaptacyjnymi (tj. pozwalającymi testować wiele modeli). W artykule przedstawiono jedynie z konieczności bardzo ogólnikowy opis i interpretację otrzymanych prędkości przemieszczeń. W chwili obecnej prowadzona jest szczegółowa ich analiza oraz zestawianie z dotychczas publikowanymi wynikami innych pomiarów.

## 6. LITERATURA

- Adam, N., Kampes, B.M., Eineder, M., Worawattanamatekul, J., Kircher, M., 2003. The development of a scientific permanent scatterer system, *ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space, Hannover, Germany*, . s. 6 CD-ROM
- Bamler, R., Hartl, P., 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14, s. R1-R54.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E., 2002. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40(11), s. 2375-2383.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2000. Nonlinear Subsidence Rate Estimation using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 38(5), s. 2202-2212.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39(1), s. 8-20.
- Gierwielaniec, J., Woźniak, J., 1981. Ocena Współczesnej aktywności tektonicznej uskoku sudeckiego brzeżnego w świetle archiwalnych materiałów niwelacyjnych, *III Symposium Współczesne i Neotektoniczne Ruchy Skorupy Ziemskiej w Polsce*, Wrocław, s. 109-123.
- Goldstein, R.M., Zebker, H.A., Werner, C.L., 1988. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, Vol. 23(4), s. 713-720.
- Grzempowski, P., Cacoń, S., 2005. The cause analysis of benchmark movements in the city of Wrocław. *Reports on Geodesy*, Vol. 74(3), s. 271-281.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., Kampes, B., 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other non-urban areas using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L23611, doi:10.1029/2004GL021737.

- Ketelaar, G., Leijen, F.v., Marinkovic, P., Hanssen, R., 2006. On the use of Point Target Characteristics in the Estimation of Low Subsidence Rates due to Gas Extraction in Groningen, the Netherlands, *Fourth International Workshop on ERS/Envisat SAR Interferometry, 'FRINGE05'*, Frascati, Italy, 28 Nov-2 Dec 2005, s. 6 CD-ROM
- Krawczyk, A., Perski, Z., 2000. 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, s. 209-218.
- Leijen, F.J.v., Perski, Z., Hanssen, R.F., 2006. Error propagation and data quality assessment for ASAR persistent scatterer interferometry, *European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Dresden, Germany, 16-18 May 2006, s. 6. CD-ROM
- Massonnet, D., Feigl, K.L., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics*, Vol. 36(4), s. 441-500.
- Perissin, D., Prati, C., Engdahl, M., Desnos, Y.L., 2005. Validating the SAR wave-number shift principle with ERS-Envisat PS coherent combination. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 44(9), s. 2343 - 2351.
- Perski, Z., 1999. Zakres interpretowalności osiadań terenu za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). *Archiwum Fotogrametrii i Teledetekcji*, 9, s. 191-201.
- Perski, Z., Chybiorz, R., Nita, J., 2001. Monitoring osiadań terenu pod wpływem eksploatacji górniczej metodą satelitarnej interferometrii radarowej. *Archiwum Fotogrametrii i Teledetekcji*, Vol. 11, s. 35-40.
- Perski, Z., Jura, D., 1999. ERS SAR Interferometry for the Land Subsidence Detection in Coal Mining Areas, *Earth Observation Quarterly* 63, s. 25-29.
- 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*, Vol. 16, s. 467-482.
- Porzycka, S., Leśniak, A., 2007. Przetwarzanie obrazów radarowych techniką PSInSAR - opis metody. *Archiwum Fotogrametrii i Teledetekcji*, Vol. 17, w druku.
- Rosen, P., Hensley S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen S., Rodriguez, E., Goldstein R., 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 88(3), s. 333-382.

Badania sfinansowano w ramach projektu badawczego Ministerstwa Nauki nr 4T12E04329 "Zastosowanie metod interferometrii radarowej InSAR do badania naturalnych ruchów powierzchni terenu w Polsce" oraz projektu badawczego ESA: C1P.3915

**APPLICATION OF SAR INTERFEROMETRIC (INSAR) METHODS FOR THE  
STUDY OF NATURAL EARTH SURFACE DISPLACEMENTS IN POLAND.  
GEO-IN-SAR PROJECT**

**KEY WORDS:** SAR interferometry (InSAR), vertical earth crust movements, deformation measurements, satellite remote sensing, geodynamics

**SUMMARY:** This paper presents problems related to the applications of SAR interferometry and its newest branch Persistent Scatterers Interferometry in geodynamical research of selected areas in Poland. Three study areas of “Warmia”, “Podhale” and “Otmuchów” were characterized. The methodology employed was described and problems associated with analysis and interpretation of PSInSAR data were highlighted. Due to technical problems with large data processing, only some smaller areas were processed. In all cases, the resultant PS densities were high and thus allowed further analysis. However, in the recent stage of the project, the detection of deformation was possible, but its detailed interpretation is still very difficult. The preliminary interpretations show that, in some cases, the processed area was too small and the data needed reprocessing. It was shown that, in case of geodynamical analysis, the data cannot be interpreted separately, without in-depth knowledge of PSInSAR processing and the parameters applied. The authors hope that PSInSAR data will significantly improve the knowledge on recent dynamics of the Earth crust in Poland and give an input to verification of geophysical models and hypotheses.

dr Zbigniew Perski  
email: Zbigniew.Perski@us.edu.pl  
telefon: +48 323689226  
fax: +48 322915865

dr inż. Marek Mróz  
email: Marek.Mroz@uwm.edu.pl  
telefon: +48 895234915  
fax: +48 895233210