

**INTERPRETACJA DANYCH ENVISAT/ASAR O PRZEMIENNEJ
POLARYZACJI NA OBSZARACH ZURBANIZOWANYCH
W KONTEKŚCIE CHARAKTERYSTYKI
STABILNYCH ROZPRASZACZY (*PERSISTENT SCATTERERS*)**

**SAR PERSISTENT SCATTERERS: TARGETS CHARACTERIZATION
IN URBANIZED AREAS WITH ENVISAT ALTERNATING
POLARISATION DATA**

Zbigniew Perski¹, Gini Ketelaar¹, Marek Mróz²

¹ Delft Institute of Earth Observation and Space Systems, Delft University of Technology

² Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

SŁOWA KLUCZOWE: interferometria SAR, *persistent scatterers*, polarymetria, ERS, ENVISAT

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono próbę wykorzystania danych ENVISAT/ASAR zarejestrowanych w różnych trybach polaryzacji przemiennej i przy różnej geometrii padania wiązki radarowej do scharakteryzowania rozpraszaczy stabilnych (*Persistent Scatterers - PS*) w kontekście określenia ich mechanizmu odbicia. Rozpraszacze stabilne wykorzystuje się w satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR) w tzw. metodzie interferometrii rozpraszaczy stabilnych (*Persistent Scatterers SAR Interferometry - PSInSAR*). Zagadnienie to jest szczególnie istotne dla określenia charakteru mierzonej metodą PSInSAR deformacji w danym punkcie. Największe skupiska PS (pow. 100 PS/km²) spotyka się na obszarach zabudowanych, gdzie pozwala na to geometria obiektów składająca się z płaszczyzn, materiałów, brak rozpraszania objętościowego powodowanego przez roślinność, a także stabilność w czasie. Dla przeprowadzenia omawianych badań wytypowano miasto Malbork z uwagi na niewielkie rozmiary (łatwa identyfikacja obiektów) i dobre pokrycie danymi ASAR w trybach polaryzacji przemiennej uzyskane w projekcie ESA AO-783. Zbiór rozpraszaczy stabilnych dla obszaru Malborka uzyskano metodą PSInSAR na podstawie serii 55 rejestracji ERS-1/2 SAR pozyskanych w ramach projektu ESA C1P.3915. Łącznie wyznaczono 5 683 punkty a następnie przeprowadzono analizę amplitudy i fazy dla wybranych obiektów na obrazach ASAR. Badano zależności fazy auto-interferogramów obrazów AP (alternate polarization) oraz zależności amplitudy od zmiany kąta padania wiązki. Otrzymane wyniki porównano z modelami odbicia fali radarowej od 3 elementarnych typów reflektorów: jednościennych, dwuściennych i trójściennych. Wstępne wnioski potwierdzają przydatność obrazów o polaryzacji przemiennej i różnym kącie padania wiązki do rozpoznawania charakterystyki PS.

1. WSTĘP

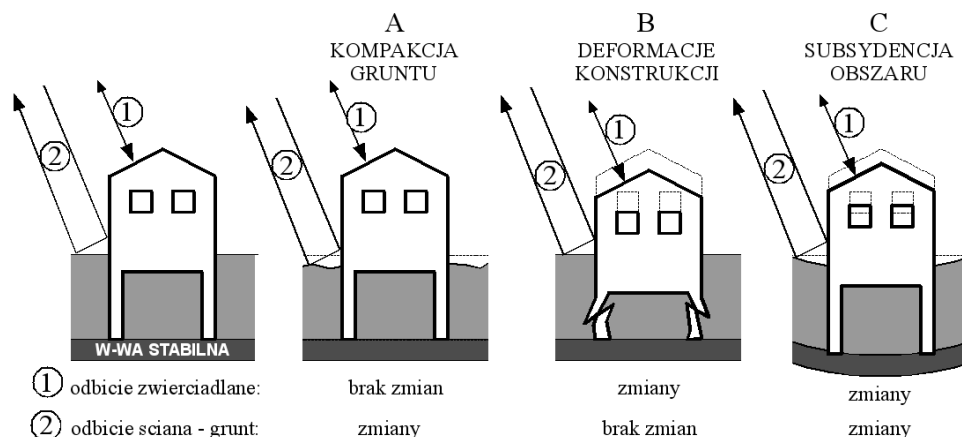
PSInSAR jest w ostatnich sześciu latach najdynamiczniej rozwijającą się gałęzią satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). InSAR to metoda wykorzystująca wzajemne różnice fazy sygnału dwóch zobrażeń radarowych SAR (Synthetic Aperture Radar)

wykonywanych najczęściej sekwencyjnie podczas kolejnych przelotów satelity nad tym samym obszarem. Dane InSAR umożliwiają łatwe i szybkie wykonywanie numerycznego modelu terenu lub map deformacji, jakie zaszły w czasie pomiędzy kolejnymi obserwacjami (Bamler, Hartl, 1998). Metoda InSAR wykazała swoją wysoką przydatność w badaniach różnych typów deformacji (Feigl, Massonet, 1998), w tym również wywołanych działalnością górniczą (Perski, Jura, 1999). Dotychczas główną wadą ograniczającą przydatność metody InSAR w praktyce była jej wrażliwość na dekoherencję (dekoherencję) interferogramu wywołaną różnicami w geometrii obrazowania i zmianami środowiska wskutek warunków atmosferycznych czy zmian w pokrywie roślinnej. Ograniczenia te powodowały, że dla uzyskania czytelnych interferogramów o wysokiej koherencji z obszaru Polski stosowano obrazy SAR zarejestrowane przy jak najkrótszej bazie czasowej i geometrycznej, tj. odległości orbit satelity w czasie wykonywania kolejnych zobrażeń.

Ze specyfiki obrazowania mikrofalowego SAR wynika, że wartość zarejestrowanego sygnału jest koherentną sumą odbić od obiektów elementarnych znajdujących się wewnątrz komórki rozdzielczości (*resolution cell*). Moc odebranego sygnału zależy od nachylenia powierzchni odbijającej w stosunku do kąta padania fali radarowej, właściwości dielektrycznych powierzchni oraz jej szorstkości. Oczywiście w zależności od rodzaju pokrycia terenu tylko część sygnału ulegającego rozproszeniu zostaje odbita w stronę anteny SAR. Ten typ rozproszenia nazywamy rozproszeniem wstecznym (*backscattering*). Jeśli w obrębie komórki rozdzielczości występuje obiekt charakteryzujący się bardzo wysokim rozpraszaniem wstecznym to właśnie jego amplituda będzie sygnałem dominującym dla wartości pikseli. Dla obiektów tego typu, obie składowe sygnału: faza i amplituda wykazują bardzo wysoką stabilność w czasie (w przypadku kolejnych obserwacji). Obiekty takie, dzięki swoim właściwościom, nazywane są obiektami koherentnymi (*coherent targets*), rozpraszaczami koherentnymi (*coherent scatterers*) albo rozpraszaczami stabilnymi (PS: *persistent scatterers, permanent scatterers*). Rozpraszacze stabilne wykorzystuje się w satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR) w tzw. metodzie interferometrii rozpraszaczy stabilnych (PSInSAR). Technika ta, opracowana przez naukowców z Politechniki w Mediolanie (Ferretti *et al.*, 2000, 2001), pozwoliła przezwyciężyć podstawowe ograniczenie klasycznej interferometrii SAR wynikające z dekoherencji sygnału. Metoda PSInSAR pozwala ponadto wykorzystywać wszystkie obrazy SAR zarejestrowane dla danego obszaru (dla tej samej ścieżki i kadru – *track and frame*) niezależnie od odległości bazowej i warunków pogodowych w czasie rejestracji. W metodzie tej dokonuje się identyfikacji PS za pomocą badania dyspersji amplitudy dla poszczególnych pikseli na kolejnych obrazach SAR (Ferretti *et al.*, 2001). Po zidentyfikowaniu PS bada się ich różnice fazy w stosunku do obrazu referencyjnego podobnie jak w klasycznej metodzie InSAR. W efekcie opracowania produktem PSInSAR jest zbiór punktów, dla których obliczono wartości wysokości, przyrostu deformacji (przy założeniu określonego modelu - najczęściej liniowego) oraz wartości deformacji dla poszczególnych epok obserwacyjnych (zobrazowań SAR). Podobnie jak w metodzie InSAR wszystkie otrzymane wartości deformacji są wielkościami względnymi: względnymi w czasie - w stosunku do rejestracji SAR przyjętej za referencyjną oraz w przestrzeni - w stosunku do punktu wybranego jako referencyjny. Metoda PSInSAR umożliwia pomiar deformacji o przyrostach rzędu 1 mm/rok. Jak już wspomniano pomiary są dokonywane w punktach a nie dla całej powierzchni jak w przypadku klasycznych

interferogramów. Zagęszczenie PS będzie oczywiście zależało od sposobu zagospodarowania terenu. Dla obszarów miejskich może ono wynosić nawet powyżej $100 \text{ PS}/\text{km}^2$ (Ferretti *et al.*, 2001). Na obszarach rolniczych jest ono znacznie mniejsze, ale tam każdy niemal budynek stanowi PS (Ketelaar *et al.*, 2005). Dyskretny w przestrzeni charakter danych wymusza konieczność ich interpolacji. Interpolacja PS jest zagadnieniem bardzo trudnym przy tak dużej czułości w wykrywaniu deformacji. Rozpraszacze stabilne, których dokładna charakterystyka zostanie opisana w dalszej części, są to najczęściej obiekty powstałe w wyniku działalności człowieka: ściany budynków, konstrukcje stalowe, betonowe itp. O tym, która część konstrukcji będzie stanowiła rozpraszacz decyduje usytuowanie ścian lub innych elementów odbijających konstrukcji w stosunku do kąta kierunkowego (azymutu) i kąta pionowego padania wiązki radarowej oraz wielkość obiektu w stosunku do długości fali. Warunki te sprawiają, że sąsiadujące ze sobą punkty PS mogą odzwierciedlać zupełnie różne obiekty terenowe, a w zarejestrowanym zapisie historii deformacji mogą odzwierciedlać się różne zjawiska. Najczęściej mamy do czynienia z trzema typami deformacji (Ketelaar, Hanssen, 2003):

1. Osiadanie wywołane eksploatacją surowców, ruchami tektonicznymi itp. (rys. 1a).
2. Deformacje konstrukcji budynku lub fundamentów (rys. 1b).
3. Osiadanie gruntu wokół budowli wywołane kompaktacją lub zmianami poziomu wód gruntowych itp. (rys. 1c).



Rys. 1. Trzy przypadki różnych rodzajów deformacji mierzonych za pomocą PSInSAR
(na podstawie Ketelaar, Hanssen, 2003)

Odpowiednie zaklasyfikowanie PS do jednej z grup o dominującym reżimie deformacji *a*, *b* lub *c* umożliwia ich wiarygodną interpretację i następnie właściwą interpolację. Zagadnienie klasyfikacji PS wymaga dokładnego rozpoznania charakterystyki rozpraszaczy stabilnych, tj. mechanizmu odbicia, jaki w nich zachodzi. Czy jest to odbicie pojedyncze zwierciadlane, czy wielokrotne np. podwójne czy potrójne, i czy otrzymany sygnał rzeczywiście odpowiada odbiciu od pojedynczego obiektu, czy jest to suma odbić od kilku dominujących obiektów pozostających wewnątrz pojedynczej komórki rozdzielczości.

Klasyfikacji PS dokonuje się zasadniczo trzema metodami:

1. Metodą GIS (Gehlot *et al.*, 2005), w której punkty PS analizuje się wspólnie z bazą danych GIS o terenie. Metoda ta jest obecnie rozwijana w TU Delft w oparciu o technologie web mapping. Wymaga to jednak dostępu do szczegółowych baz danych i z tego powodu może być przydatna jedynie na obszarach gdzie dane takie istnieją tj. najczęściej dużych aglomeracji miejskich.
2. Metodą PS, w której wykorzystuje się maksymalnie dużo informacji o obiektach, jakie można uzyskać z serii obserwacji SAR (Perissin, 2006).
3. Metodą polarymetryczną wykorzystującą zarejestrowane dla danego obszaru zobrazowania radarowe polarymetryczne (Schneider *et al.*, 2006) lub o przemiennej polaryzacji (Inglada *et al.*, 2004, Ferretti *et al.*, 2005).

W niniejszym artykule została przedstawiona próba wykorzystania do klasyfikacji rozpraszaczy zarówno danych o przemiennej polaryzacji jak i klasycznych obrazów SAR. Metoda ta ma w swoich założeniach umożliwić wykorzystanie wszystkich dostępnych danych SAR z danego obszaru dla wzbogacenia informacji o typie rozpraszania.

2. MODELE ROZPRASZANIA RADAROWEGO W OBSZARACH MIEJSKICH

Jak już wspomniano przez rozpraszacze stabilne rozumie się obiekty charakteryzujące się silnym rozpraszaniem wstecznym, które jest dominującym sygnałem dla danej komórki rozdzielczości. Obiekty takie można scharakteryzować za pomocą dużych wartości tzw. radarowego przekroju skutecznego RCS (Radar Cross Section). Najogólniej mówiąc RCS danego obiektu jest to ekwiwalent płaskiej powierzchni izotropowo odbijającej fale elektromagnetyczne, jaka byłaby potrzebna do odbicia tej samej mocy sygnału (Henderson, Lewis, 1998). Na obszarach zurbanizowanych mamy do czynienia z grupami obiektów zbudowanych z płaskich, gładkich powierzchni o różnym nachyleniu takimi jak ściany czy dachy budynków o niejednokrotnie wysokiej stałej dielektrycznej (powierzchnie metalowe). Obiekty takie stanowią idealne warunki dla zjawiska stabilnego rozpraszania.

Zachodzące na obszarze zurbanizowanym rozpraszanie mikrofalowe można sprowadzić do trzech elementarnych przypadków tzw. rozpraszaczy podstawowych (*canonical scatterers* – Franceschetti, 2002), do których należą (Inglada *et al.*, 2004):

1. Rozpraszacz jednopowierzchniowy lub zwierciadlany (*specular scatterer*),
2. Rozpraszacz dwuścienny (*dihedral scatterer*).
3. Rozpraszacz trójścienny (*trihedral scatterer*).

R. Schneider i inni (Schneider *et al.*, 2006) wydzielają jeszcze:

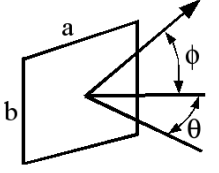
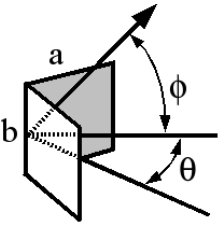
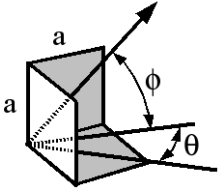
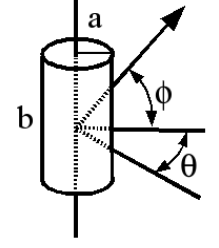
4. Rozpraszacz słupowy (*pole scatterer*).

Natomiast D. Perissin (Perissin, 2006) w swojej klasyfikacji rozróżnia rozpraszacze powierzchniowe w zależności od ich położenia:

5. Rozpraszacz jednopowierzchniowy naziemny (*ground-level*).
6. Rozpraszacz jednopowierzchniowy dachowy (*roof-level*).

Charakterystyki i geometrię poszczególnych typów rozpraszaczy elementarnych przedstawiono w tabeli 1.

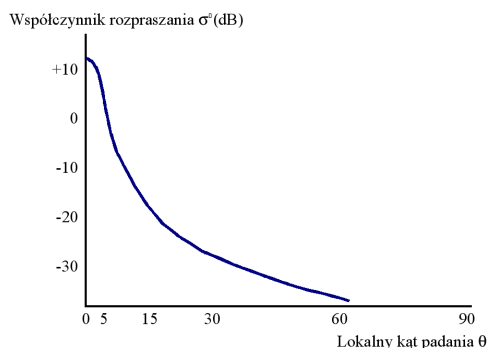
Tabela 1. Charakterystyka typów rozpraszaczy elementarnych

Typ rozpraszacza	Nazwa	RCS	Uwagi
	Jednopoверхniowy (Płaszczyznowy) (<i>Specular</i>)	$\sigma = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$	Rozpraszanie wsteczne największe przy prostopadłym ustawieniu reflektora.
	Dwupoверхniowy (Dwuścienny) (<i>Dihedral</i>)	$\sigma = \frac{8\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$	Rozpraszanie wsteczne zmniejsza się gwałtownie wraz ze zmianą kąta phi. Mała wrażliwość na zmiany kąta theta.
	Trójpoверхniowy (Trójścienny) (<i>Trihedral</i>)	$\sigma = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2}$	Największe rozpraszanie wsteczne w stosunku do innych typów, najmniejsza wrażliwość na zmiany kątów phi i theta.
	Słupowy (<i>Pole</i>)	$\sigma = \frac{2\pi a b^2}{\lambda}$	Mechanizm rozpraszania podobny jak w rozpraszaczu dwupoверхniowym. Niewrażliwy na zmiany kąta phi.

2.1. Zmienność współczynnika rozpraszania wstecznego (amplitudy)

Jak już wspomniano na wielkość zarejestrowanego sygnału największy wpływ mają szorstkość powierzchni, jej orientacja w stosunku do padającej wiązki oraz stała dielektryczna materiału rozpraszacza. W przypadku obszarów zurbanizowanych zagadnienie szorstkości możemy pominąć gdyż większość analizowanych rozpraszaczy

składa się ze ścian budynków i konstrukcji, które w przypadku fal pasma C zachowują się jak tzw. powierzchnie gładkie (Henderson, Lewis, 1998). Zagadnienie orientacji rozpraszacza należy traktować oddzielnie w kierunku azymutu (*azimuth*) i zasięgu (*range*). Dla kierunku zasięgu, w przypadku rozpraszacza jednopowierzchniowego największy wpływ na wartość rozpraszania wstecznego ma kąt nachylenia powierzchni rozpraszacza w stosunku do kierunku padania fal. Kąt ten jest zwany lokalnym kątem padania (*local incidence angle*) w odróżnieniu od kąta padania (*incidence angle*) mierzonego w stosunku do lokalnego promienia elipsoidy. Zależność współczynnika wstecznego rozpraszania od lokalnego kąta padania przedstawia rysunek 2. W naszych rozważaniach nachylenie powierzchni traktować będziemy jako stałe (stabilne budynki i konstrukcje), zmieniać się za to będzie kąt padania wiązki radarowej. Nie zmienia to jednak w żaden sposób sensu przedstawionej zależności.



Rys. 2. Zależność amplitudy rozpraszania wstecznego od lokalnego kąta padania wiązki radarowej (na podstawie Henderson, Lewis, 1998)

Z wykresu (rys. 2) wynika, że dla kątów zbliżonych do 0° rozpraszanie wsteczne jest największe i ulega gwałtownemu zmniejszeniu w zakresie 5° – 15° . Pomiędzy 15° – 80° rozproszenie wsteczne ma charakter dyfuzyjny z przewagą odbicia zgodnego z prawem Bragga (Henderson, Lewis, 1998). Dla rozpraszaczy dwu i trójściennych zagadnienie lokalnego kąta nie ma większego znaczenia. Dla kąta azymutalnego największe znaczenie ma tzw. kąt orientacji (Schneider *et al.*, 2006), tj. kąt poziomy zawarty między płaszczyzną pionową rozpraszacza a kierunkiem lotu (azymutem). Największe wartości rozpraszania wstecznego występują dla kątów zbliżonych do 0° . Gwałtowny spadek wielkości rozpraszania wstecznego następuje dla wartości z zakresu 0° – 5° . Powierzchnie pionowe są elementami reflektorów dwuściennych (np. ściana - grunt). Orientacja reflektora ma największe znaczenie dla kątów padania większych niż 30° i przypadków małej szorstkości powierzchni poziomej (Franceschetti *et al.*, 2002).

2.2. Zmienność polaryzacji

Z zagadnieniem kąta orientacji reflektorów dwuściennych wiąże się jeszcze jedna ważna właściwość. Wynikowa polaryzacja wiązki po dwukrotnym odbiciu zmienia się o kąt równy dwukrotności kąta orientacji (Henderson, Lewis, 1989, Schneider *et al.*, 2006). To samo zjawisko występuje również dla przypadku rozpraszaczy jedno i trójściennych

(Kimura *et al.*, 2005). Generalnie, reflektory trójścienne wykazują najmniejszy wpływ na zmianę polaryzacji (Henderson, Lewis, 1989).

2.3. Zmienność fazy komponentów HH i VV

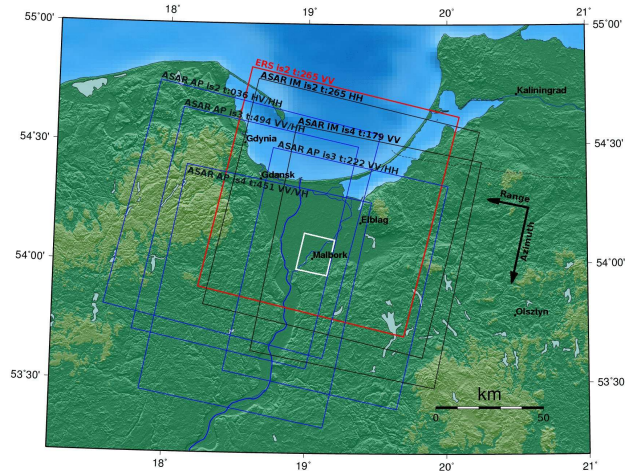
W przypadku zobrazowań polarymetrycznych występuje zjawisko zmiany kąta fazy pomiędzy komponentami VV i HH. Polega ono na wzajemnym przesunięciu o wielkość π (180 stopni) fazy pomiędzy HH i VV. Zjawisko to ma miejsce dla reflektorów dwuściennych (lub ogólniej dla parzystej liczby odbić) przy kątach padania wiązki w zakresie $20 \div 70^\circ$ (Inglada *et al.*, 2004). W przypadku zobrazowań o polaryzacji przemiennej ENVISAT/ASAR (*alternating polarization*) spektra azymutu są rozdzielne (stanowią jakby połówki pełnego spektrum obrazu jednopolarizacyjnego), przez co korelacja pomiędzy komponentami VV i HH nie jest zachowana. W przypadku analizy rozpraszaczy punktowych nie ma to jednak znaczenia gdyż zachowują one mimo wszystko koherencję (Inglada *et al.*, 2006). Zależność ta została potwierdzona także przez innych badaczy (Ferretti *et al.*, 2005, Ketelaar *et al.*, 2005).

3. OBSZAR TESTOWY MALBORK

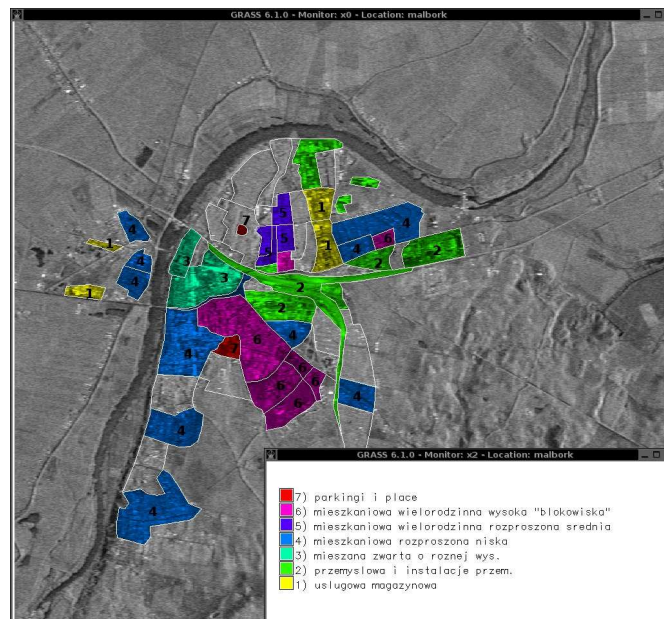
Okolice Malborka były już wcześniej poligonem badawczym, na którym prowadzono badania użyteczności obrazów radarowych satelity Envisat do opracowywania map pokrycia terenu i upraw rolniczych (grant KBN 5T12E03822). W ramach tego opracowania i dzięki projektowi ESA (AO-783) zarejestrowano 18 obrazów ASAR w różnych trybach polarymetrycznych i o różnych kątach padania wiązki (Mróz, Perski, 2003) (rys. 3). Miasto Malbork znalazło się wówczas w centrum obszaru badawczego i dzięki temu jest jedynym dużym obszarem miejskim zarejestrowanym na wszystkich pozyskanych wówczas zobrazowaniach. W ramach prowadzonych badań podjęto również próbę wykorzystania zarejestrowanych obrazów do interpretacji i kartowania obszarów miejskich Malborka (Mróz, Ciołkowska, 2004). Oprócz dostępności danych Malbork jest bardzo dobrym obiektem do badań modelowych z uwagi na:

- niewielką powierzchnię (17 km^2), co ułatwia przetwarzanie danych,
- niewielkie deniwelacje terenu zmniejszające wpływ ukształtowania terenu na lokalny kąt padania wiązki,
- zróżnicowany typ zabudowy (od historycznej po współczesną przemysłową),
- zróżnicowany układ ulic i dróg, przez co budynki w różnych częściach miasta mają różną orientację.

Jak już wspomniano obszar zurbanizowany miasta Malbork jest zróżnicowany pod względem wieku, przeznaczenia, rozmiarów i orientacji budynków. Rysunek 4 przedstawia uproszczoną charakterystykę zabudowy i zagospodarowania przestrzennego Malborka.



Rys. 3. Położenie obszaru badań oraz zasięgi wykorzystanych zobrażeń radarowych ERS-1/2 i ENVISAT; kolorem białym zaznaczono zasięg obszaru, dla którego przeprowadzono przetwarzanie danych



Rys. 4. Typy zabudowy na obszarze Malborka; opracowano na podstawie map topograficznych w skali 1:10 000 oraz zdjęć lotniczych barwnych w skali 1:26 000; w tle amplitudowy obraz SAR powstały przez uśrednienie amplitudy serii 55 obrazów ERS-1/2

3.1. Dane ENVISAT/ASAR

Spośród obrazów ASAR zarejestrowanych w ramach projektu ENVISAT AO-783 wykorzystano jedynie te, które zostały zarchiwizowane w postaci produktów SLC (Single Look Complex). Dane te zachowują pełną rozdzielczość przestrzenną (ok. 4×10 m) oraz obie składowe sygnału, tj. fazę i amplitudę. Łącznie seria danych poddanych omawianej analizie liczyła 12 obrazów, z czego 7 zarejestrowanych w trybie polaryzacji alternatywnej AP (tabela 2). W tabeli przedstawiono również zakresy kątów padania wiązki. Zostały one obliczone dla wycinka sceny w zakresie obszaru badawczego (rys. 3) nie zaś do całej sceny. Wszystkie obrazy zostały skalibrowane radiometrycznie. Na kalibrację składało się skorygowanie efektów radiometrycznych wywołanych przez różnicę kąta padania wiązki, diagram anteny, rozkład straty sygnału w kierunku azymutu oraz uwzględnienie bezwzględnej stałej kalibracyjnej.

Tabela 2. Dane ENVISAT/ASAR wykorzystane w pracy

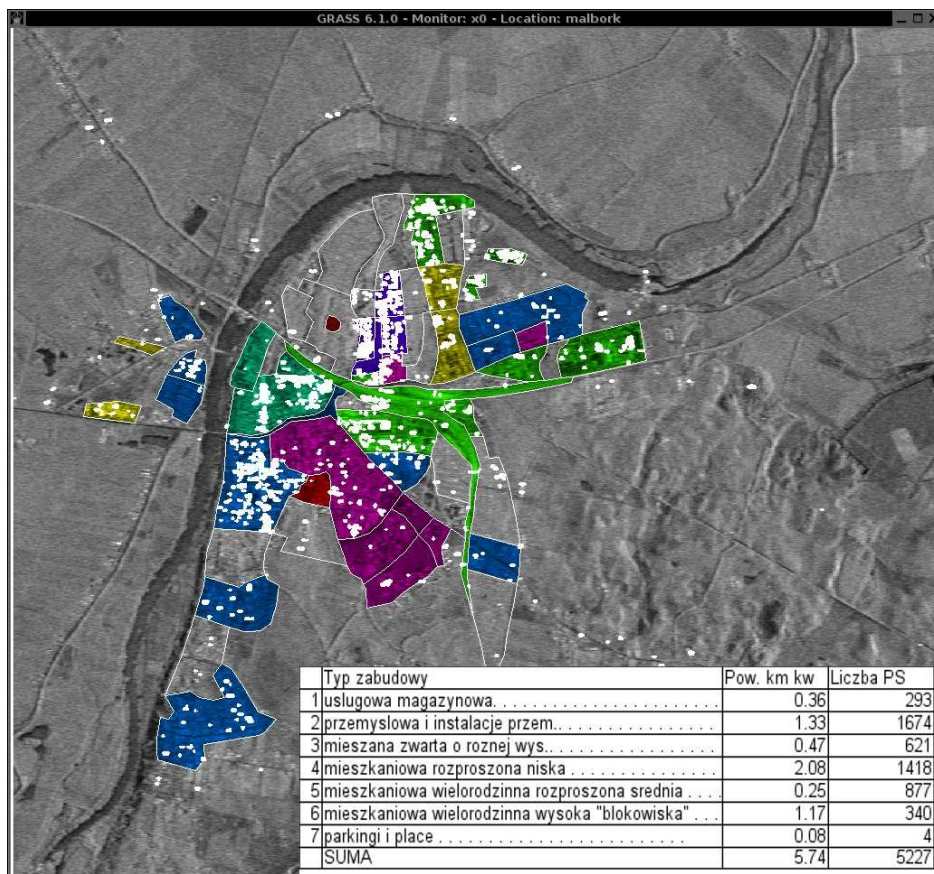
Swath	Track	Kanały AP		Nr. orbity	Data rejestracji	Kąt padania wiązki	
		MDS1	MDS2			near look angle	far look angle
IS2	265	HH		5830	20030412	21.995083	23.427937
				7333	20030726	21.961496	23.397097
IS2	36	HV	HH	6102	20030501	24.981432	26.158228
				6603	20030605	24.883003	26.113594
				7104	20030710	24.872892	26.104097
IS3	222	VV	HH	5787	20030409	27.617167	28.708572
IS3	494	VV	HH	7562	20030811	30.436987	31.202974
IS4	451	VV	VH	6016	20030425	34.836842	35.620609
				7018	20030704	34.752934	35.539864
IS4	179	VV		6245	20030511	32.024773	32.923023
				6746	20030615	31.942289	32.844017
				7247	20030720	31.944313	32.846027

Kalibracje wykonano zgodnie z zaleceniami ESA przy użyciu *Basic Envisat SAR Toolbox* (BEST). W przypadku danych AP dokonano ekstrakcji obu obrazów składowych a następnie ich kalibracji.

3.2. Dane PSInSAR

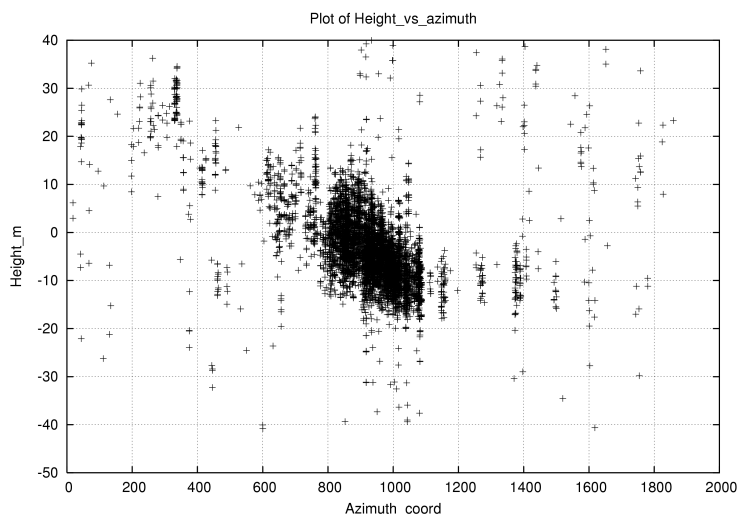
Dla obszaru Malborka pozyskano zbiór punktów PS na podstawie przetworzenia serii 55 obrazów SAR zarejestrowanych przez satelity ERS-1 i ERS-2 (rys. 3). Seria ta obejmuje rejestracje wykonane w ciągu ośmiu lat, tj. od 15-04-1992 do 23-12-2000. Przetwarzaniem danych objęto jedynie wytypowany obszar badań (rys. 3). Do przetwarzania wykorzystano implementację metody PSInSAR powstałą na Uniwersytecie w Delft oraz stworzone tam

oprogramowanie interferometryczne DORIS (Kampes *et al.*, 2004). W wyniku opracowania uzyskano zbiór 5 683 punktów PS obejmujący miasto Malbork oraz okolice. Dla samego obszaru miasta uzyskano 5 227 punktów. Ich rozmieszczenie oraz rozkład dla poszczególnych typów zabudowy przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Rozpraszacze stabilne PS na tle typów zabudowy Malborka i radarowego obrazu amplitudowego

Interferometryczne przetwarzanie obszaru Malborka wykonano jako studium metodyczne w ramach projektu GEO-IN-SAR (KBN: 4T12E04329) oraz projektu ESA C1P.3915. Wstępna analiza wyników potwierdziła, że na obszarze Malborka nie występują osiadania terenu ani też znaczące deformacje obiektów budowlanych. Stwierdzone przyrosty deformacji liniowych nie przekraczają 3 mm/rok. Wysokości względne (względem PS przyjętego za referencyjny) przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Zmienność wysokości względnych punktów PS wzdłuż kierunku azymutu;
wysokości względne obliczone metodą InSAR.

4. WSTĘPNE WYNIKI CHARAKTERYSTYKI PS

Charakterystykę PS przeprowadzono w oparciu o zestaw metod, których podstawy teoretyczne przedstawiono powyżej. Dla rzetelnego, ilościowego przeanalizowania danych konieczna jest ich wspólna rejestracja („wpasowanie”) w tym samym układzie pikseli. Wymagania dokładnościowe takiej współ-rejestracji (*coregistration*) są bardzo wysokie, gdyż analizie mają podlegać pojedyncze piksele przy pełnej rozdzielczości obrazowania AR. Najdokładniejszymi metodami współ-rejestracji są stosowane w interferometrii algorytmy wykonujące działania na próbkach (oknach) danych w formacie zespolonym, dla których znajduje się odpowiadające sobie punkty na podstawie maksymalnej koherencji fazy. Na podstawie otrzymanych współrzędnych punktów dokonuje się obliczenia współczynników wielomianu, który zostaje następnie użyty w transformacji. Niestety algorytmy te nie są przydatne, gdy zniekształcenia obrazu pochodzące od obiektów o różnych wysokościach są bardzo duże, a z takimi właśnie mamy do czynienia na obszarach zabudowanych, gdzie wysokość reflektorów jest bardzo zróżnicowana. Algorytmy te nie uwzględniają również korekty sub-pikselowego położenia reflektora (Perissin *et al.*, 2006). Ponadto w przypadku danych zarejestrowanych dla sąsiednich ścieżek oraz różnych kątów padania wiązki zniekształcenia te są wielokrotnie większe i trudniejsze do skorygowania aniżeli w przypadku tradycyjnych serii danych interferometrycznych dla tej samej ścieżki. Z uwagi na brak możliwości właściwego wpasowania przytoczone tutaj wyniki mają jedynie charakter szacunkowy. Podjęte ostatnio prace nad nowym algorytmem współ-rejestracji opartym o numeryczny model terenu umożliwią w najbliższej przyszłości dokonanie pełnej analizy ilościowej danych.

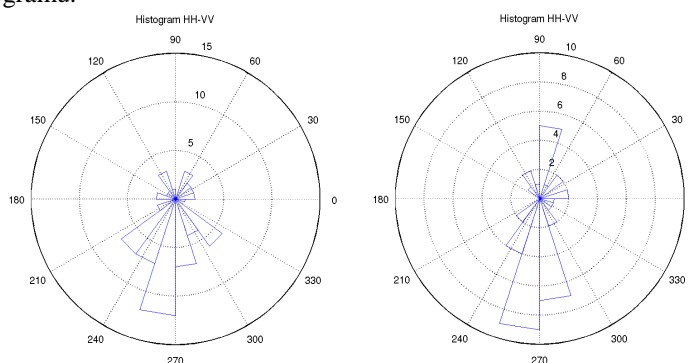
4.1. Analiza wysokości względnych

Metoda ta (Perissin, 2006) pozwala zidentyfikować rozpraszacze znajdujące się na poziomie gruntu i te znajdujące się na dachach budynków. Na podstawie analizy PS z obszaru Malborka stwierdzono, że (rys. 6) wysokości wykazują zróżnicowanie w zakresie 20 m, co wskazuje na przydatność danych wysokościowych do rozróżnienia reflektorów naziemnych od dachowych.

4.2. Analiza różnicy fazy komponentów HH i VV

Dla danych ASAR zarejestrowanych w trybie ko-polaryzacyjnym VV/HH przeprowadzono obliczenia różnicy fazy komponentów metodą zaproponowaną przez Ingładę (Inglada *et al.*, 2004, 2006). Obliczono parametry tzw. autointerferogramu: $\Phi_{hh} - \Phi_{vv}$ oraz $\Phi_{hh} + \Phi_{vv}$ dla pikseli o największych wartościach amplitudy (wartość progowa amplitudy = 500). Wskutek niemożności dokonania precyzyjnej współrejestracji danych nie udało się wykorzystać rzeczywistej lokalizacji PS. Piksele o najwyższej amplitudzie są jednak dobrym przybliżeniem gdyż to właśnie wysoka amplituda jest jedną z podstawowych cech selekcji PS (Feretti *et al.*, 2001). Niekiedy stabilne rozpraszacze nazywa się wręcz *strong scatterers*. Na rysunku 7 przedstawiono wykresy kąta fazy dla dwóch posiadanych obrazów VV/HH. Wykres dla sceny 7 562 (ścieżka 494) wykazuje typowy obraz gdzie różnica kątowa pomiędzy maksimami częstotliwości wynosi 180° .

W przypadku wykresu dla sceny 5 787 (ścieżka 222) uzyskano tylko jedno maksimum. Jest to spowodowane prawdopodobnie małą frekwencją pikseli o amplitudzie powyżej wartości progowej. Otrzymane wyniki generalnie potwierdzają spostrzeżenia innych badaczy, co do możliwości zastosowania do klasyfikacji rozpraszaczy kąta fazy autointerferogramu.

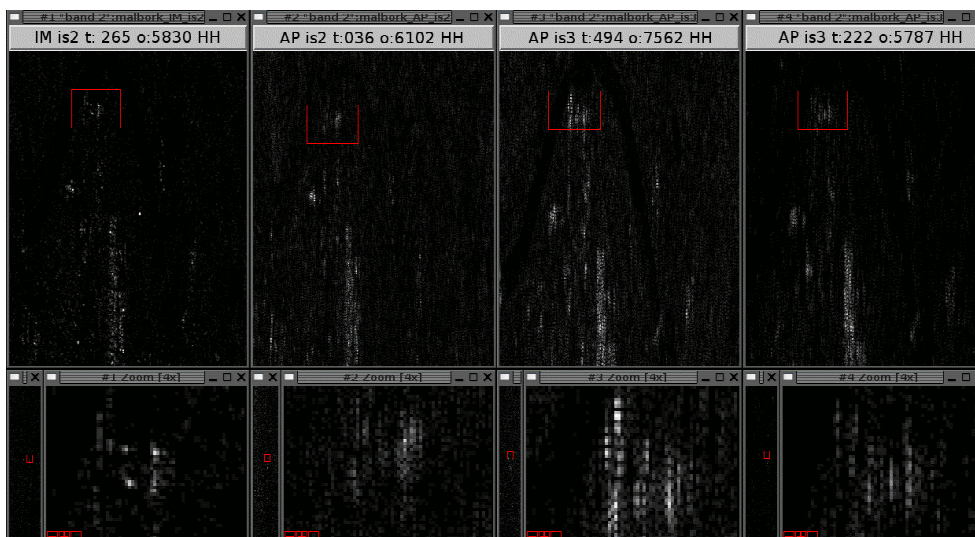


Rys. 7. Kąt fazy pomiędzy składowymi HH i VV obrazów ASAR Envisat zarejestrowanych w trybie polaryzacji przemiennej. Z lewej AP/IS2 ścieżka: 222, orbita: 5 787, z prawej AP/IS2 ścieżka: 494, orbita: 7 562

Otrzymana liczba potencjalnych rozpraszaczy dwuściennych dla obszaru Malborka nie jest zbyt duża z uwagi na małe rozmiary obszaru poddanego analizie, jednak metoda ta wykazała w tym przypadku swoją przydatność.

4.3. Analiza zależności amplitudy od zmienności kąta padania wiązki

Analizę przeprowadzono oddzielnie dla danych HH oraz VV w trybie *Image Mode* oraz *Alternating Polarization Mode*. Zmienność kąta dla badanego wycinka scen była dosyć duża. Od około 22.6° do 30.8° (tabela 2). Podobnie jak w poprzednich przypadkach pełna analiza ilościowa nie była możliwa, niemniej analiza porównawcza dla odpowiadających sobie obszarów pozwala stwierdzić, że badania tej zależności są bardzo obiecujące (rys. 8). Wykonane zestawienie fragmentów obrazów amplitudowych wskazuje, że dla różnych kątów padania amplituda jest bardzo zróżnicowana jednak bez dokładnej współ-rejestracji obrazów szczegółowa interpretacja nie jest możliwa. Niemniej jednak należy stwierdzić, że metoda ta jest obiecująca, jeśli chodzi o klasyfikowanie rozpraszaczy jednopowierzchniowych, gdyż to one są najbardziej czułe na zmiany kąta. Na rysunku 8 można również zauważyć piksele o wysokich wartościach amplitudy, których amplituda jest prawie tak samo wysoka dla wszystkich obrazów. Odpowiadają im najprawdopodobniej rozpraszacze dwu i trójścienne.

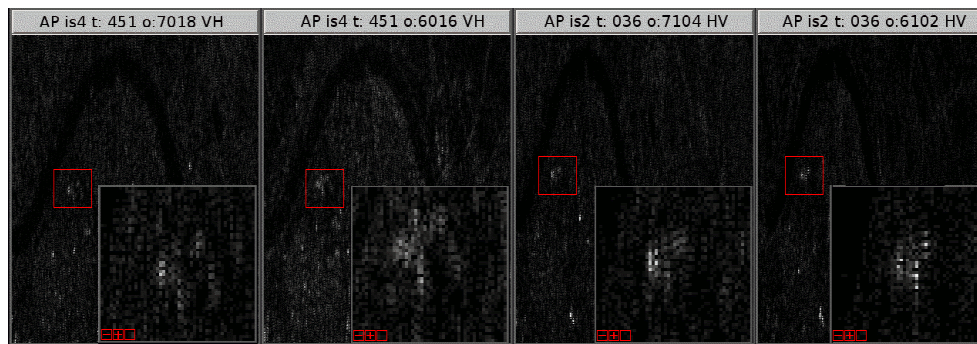


Rys. 8. Zestawienie fragmentów obrazów ASAR zarejestrowanych w trybie HH, o różnej wartości kąta padania wiązki (tabela 2); obrazy w pełnej rozdzielczości przestrzennej; rozmiar piksela ok. 4 m (azymut) \times 10 m (zasięg)

4.4. Analiza zmienności polaryzacji

Do wykrywania zmienności polaryzacji nadają się obrazy zarejestrowane w trybie polaryzacji ortogonalnej VH i HV, gdyż w przypadku braku zmiany polaryzacji wiązki amplituda sygnału dla danego obiektu powinna się zmniejszyć w stosunku do amplitudy dla rejestracji w trybach HH czy VV. Zjawisko to znajduje swoje potwierdzenie na obrazach HV i VH rejonu Malborka, na których amplituda terenów zabudowanych nie różni się od otaczających terenów rolniczych. Stwierdzono jednak kilka rozpraszaczy o wysokiej

amplitudzie (rys. 9), co może być spowodowane ich specyficzną orientacją w stosunku do kierunku azymutu. Zważywszy, że ich amplituda jest bardzo wysoka (porównywalna z amplitudą dla rozpraszaczy na obrazach HH i VV możemy założyć, że wystąpiła rotacja polaryzacji o pełne 90° , co wskazywałoby na zorientowanie rozpraszaczy pod kątem 45° do kierunku azymutu. Analiza zmienności polaryzacji umożliwia wykrywanie tak specyficznym zorientowanych rozpraszaczy dwuściennych i może być stosowana, np. jako metoda komplementarna do analizy kąta fazy. Wstępna analiza próbek przedstawionych na rysunku 9 wskazuje, że we wszystkich przypadkach, na podstawie ich wzajemnego usytuowania, możemy zidentyfikować te same rozpraszacze, niezależnie od wielkości kąta padania wiązki. Kierunki azymutu dla analizowanych scen są niemal równoległe do siebie, przez co zorientowanie rozpraszaczy na wszystkich obrazach jest takie samo w stosunku do kierunku azymutu.



Rys. 9. Zestawienie fragmentów obrazów ASAR zarejestrowanych w trybach polaryzacji ortogonalnej VH i HV, o różnej wartości kąta padania wiązki (por. tabela 2); obrazy w pełnej rozdzielczości przestrzennej; rozmiar piksela ok. 4 m (az.) \times 10 m (zasięg)

5. WNIOSKI

Przeprowadzone analizy wykazały duży potencjał zastosowań obrazów o polaryzacji przemiennej i obrazów zarejestrowanych przy różnych kątach padania do charakteryzowania typów PS. Przeanalizowane przykłady wykazały, że w zasadzie każdy z zastosowanych obrazów niesie dodatkowe informacje. Na ile mogą one być przydatne pokaże dopiero pełna analiza ilościowa po precyzyjnej współ-rejestracji obrazów.

6. LITERATURA

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

Feigl, Massonet D. 1998. Radar interferometry and its application to the changes in the Earth's surface. *Rev. Geophys.*, 36(4), s. 441–500.

Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR Interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 38, s. 202-2212.

- Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39, s. 8-20.
- Ferretti A., Perissin D., Prati C., Rocca F., 2005. On the physical nature of SAR permanent scatterers. Proceedings of URSI Com. Symposium - URSI 2005, Ispra (Italy). s. 20-21.
- Franceschetti G., Iodice A., Ricco D., 2002. A canonical problem in electromagnetic backscattering from buildings. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40, s. 1787-1801.
- Gehlot S., Perski Z., Hanssen R., 2006. Web-based framework for PS-INSAR data interpretation assisted by geo-spatial information fusion. ISPRS Mid-term Symposium Enschede (Netherlands) 8-11 May 2006.
- Henderson F.M., Lewis A.J., 1998. Principles and applications of imaging radar. *Manual of remote sensing*, 3rd edn, Vol. 2. John Wiley, New York.
- Inglada J., Souyris J-C., Henry C., 2004. ASAR multi-polarization images phase difference: assessment in the framework of persistent scatterers interferometry. Proceedings of the ENVISAT & ERS Symposium, 6-10 September 2004, Salzburg (Austria).
- Inglada J., Souyris J-C., Henry C., 2006. Incoherent SAR polarimetric analysis over point targets. *IEEE Geosci. Remote Sens. Letters* 3, s. 246-249.
- Kampes B., Hanssen R., Perski Z., 2003. Radar Interferometry with Public Domain Tools. In: Proceedings of FRINGE 2003, Frascati (Italy) 1-5 December 2003.
- Ketelaar G., Hanssen R., 2003. Separations of different deformations regimes using PS-INSAR data. Proceedings of FRINGE 2003, Frascati (Italy) 1-5 December 2003.
- Ketelaar G., van Leijen F., Marinkovic P., Hanssen R., 2005. On the use of point target characteristics in the estimation of low subsidence rates due to gas extraction in Groningen, The Netherlands. Proceedings of FRINGE 2005, Frascati (Italy) 28 Nov.- 2 Dec. 2005.
- Kimura H., Papathanassiou K., Hajnsek I., 2005. Polarization orientation effects in urban areas on SAR data. Proceedings of IGARSS 2005, Seoul (Korea), 25-29 July 2005.
- Mróz M., Ciołkowska M., 2004. Interpretacja satelitarnych obrazów radarowych ENVISAT-1/ASAR typu IMG i APG wykonanych dla obszarów zurbanizowanych. XI Sesja Naukowa "Aktualne problemy naukowe i techniczne prac geodezyjnych" UWM Olsztyn/AGH/OPGK Gdańsk, Olsztyn 16-17.09. 2004.
- Mróz M., Perski Z., 2003. Interferometric processing of ENVISAT-1 / ASAR / Image Mode and Alternating Polarisation Mode for application in land cover mapping. Proceedings of FRINGE 2003, Frascati (Italy) 1-5 December 2003.
- Perissin D., 2006. SAR super-resolution and characterization of urban targets. PhD thesis. Politecnico di Milano (Italy), s. 1-121.
- Perissin D., Prati C., Engdahl, M., Desnos Y.L., 2005. Validating the SAR Wavenumber Shift Principle With the ERS-Envisat PS Coherent Combination. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 44, s. 2343 – 2351.
- Perski, Jura 1999. ERS SAR interferometry for land subsidence detection in coal mining areas. *Earth Observ Quart.*, 63, s. 25–29.
- Schneider R., Papathanassiou K., Hajnsek I., Moreira A., 2006. Polarimetric and interferometric characterization of coherent scatterers in urban areas. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, s. 44971-984.

Badania sfinansowano w ramach projektu badawczego KBN nr 4T12E04329 "Zastosowanie metod interferometrii radarowej InSAR do badania naturalnych ruchów powierzchni terenu w Polsce" oraz projektów ESA: AO-789 i C1P.3915.

**SAR PERSISTENT SCATTERERS: TARGETS CHARACTERIZATION
IN URBANIZED AREAS WITH ENVISAT ALTERNATING
POLARISATION DATA**

KEY WORDS: Persistent Scatterers, SAR Interferometry, SAR Polarimetry, incidence angle, urban areas

Summary

The scope of presented work was to apply the ENVISAT/ASAR data acquired in different alternating polarization modes and under different viewing geometry to characterize Persistent Scatterers (PS) in the context of their scattering mechanism. Persistent Scatterers are explored by SAR interferometry (InSAR) in the Persistent Scatterers Interferometry (PS-InSAR) method. This technique is nowadays one of the most actively developing branches of InSAR. It utilizes coherent natural "radar reflectors" with a consistent reflectivity pattern in time. The PS-InSAR method is the first one to allow the exploration of almost all archived SAR data over a certain area and can retrieve a long-term series of the observations of the individual PS points. Despite this, PS-InSAR used as an operational method of the scattering mechanisms of individual PS is still not fully explored. It is usually not known if the scatterer has specular, dihedral or trihedral geometry and if the reflection comes from one individual strong target or a set of targets located within the resolution cell. Knowledge about scatterer characteristics is very important to separate scatterers representing different deformation regimes: e.g. subsidence, deformations of the construction, soil compaction. This problem becomes crucial if spatial interpolation of the deformation signal is required.

A high density of PS is typical for densely urbanized areas (> 100 PS/km²). Urban areas are also ones of the highest interests, in terms of inhabitants' safety. For purposes of this study, Malbork City in Northern Poland was selected because of its very good coverage of ASAR alternating polarization data acquired under different modes and incidence angles. The specific various ASAR acquisitions have been designed for the purposes of the ESA AO-783 project which was focused on environmental and agricultural classification. A set of Persistent Scatterers has been collected by processing a stack of 55 ERS-1/2 SAR scenes (ESA C1P.3915 project) using Delft University of Technology's implementation of the PSI method. The 5683 PS points have been obtained that have a coherent behavior. ASAR scenes were calibrated and an analysis of auto-interferogram phase and image amplitudes was performed. Further analysis of the ASAR data is focused on the relationship between incidence angle variations and amplitude, and on the change of polarization. The results were compared with the scattering models of canonical scatterers (specular, dihedral and trihedral). Preliminary results show that applications of variable incidence angle and alternating polarization data are a promising technique regarding scatterer characterization. However, to fully quantitatively analyze the data, precise coregistration is required.

Dr Zbigniew Perski
e-mail: Z.A.Perski@tudelft.nl
tel. +31 15 2782569

Inż. Gini Ketelaar
e-mail: V.B.H.Ketelaar@tudelft.nl
tel. +31 15 2782552

Dr inż. Marek Mróz
e-mail: marek.mroz@uwm.edu.pl
tel. +89 5234915