

Zbigniew Perski

ZAKRES INTERPRETOWALNOŚCI OSIADAŃ TERENU ZA POMOCĄ SATELITARNEJ INTERFEROMETRII RADAROWEJ (InSAR)

Streszczenie

W ramach pierwszego etapu prac badawczych związanych z projektem ESA AO-3 127, dotyczącym interferometrycznych badań osiadań terenu nad wyrobiskami podziemnymi GZW, użyto 13 obrazów SAR otrzymanych z satelitów ERS-1 i ERS-2, na podstawie których wygenerowano łącznie 29 interferogramów. Dane te obejmują cztery części obszaru GZW w różnych okresach wegetacyjnych. Na podstawie analiz interferogramów i obrazów koherencji oraz ich interpretacji w oparciu o dane naziemne dokonano oceny interpretowalności danych ERS InSAR dla obszaru GZW. W artykule przedstawiono analizę jakości wybranej części opracowanych danych. Oszacowano wpływ poszczególnych czynników tak zewnętrznych (pogoda, klimat, charakter zagospodarowania powierzchni) jak i wewnętrznych systemu obróbki interferometrycznej na jakość otrzymanych wyników. Na konkretnym przykładzie przedstawiono sposoby wykorzystania danych InSAR w zakresie wykrywania osiadań.

1. Satelitarna interferometria radarowa

Satelitarny system interferometrii radarowej InSAR wykorzystuje zdjęcia SAR wykonane sekwencyjnie – w czasie kolejnych nalotów. Podczas dokonywania obserwacji antena SAR rejestruje intensywność i fazę odbitej od powierzchni terenu fali radarowej jak i jej. Przetwarzanie informacji fazowych zawartych w cyfrowych zapisach zdjęć SAR – obliczanie różnic fazy dwóch obrazów SAR a następnie korygowanie tych wartości w zależności od szeregu parametrów takich jak: wysokość lotu, prędkość nazywamy OBRÓBKĄ INTERFEROMETRYCZNĄ. Jej rezultatem jest obraz różnic fazy dwóch obrazów radarowych zwany intrferogramem. W celu uzyskania interferogramu przedstawiającego osiadania terenu (Ryc. 1) użyte obrazy SAR muszą przedstawiać dokładnie ten sam obszar (dane uzyskane przy małych różnicach pozycji satelity na orbicie podczas wykonywania kolejnych zdjęć). Obserwowana na interferogramie zmiana fazy o pełny cykl (360°) jest równa połowie długości fali sygnału radarowego (Massonnet 1997). W przypadku satelitów ERS-1 i ERS-2 długość fali wykorzystywanej przez urządzenie SAR wynosi 5.6 cm (FAO/ESA 1993), czyli pełna sekwencja prążków interferometrycznych obrazuje osiadanie o wielkości 2.8 cm w kierunku do satelity (Coulson 1996). Odpowiada to pionowym ruchom powierzchni terenu o 2.57 cm.

2. Dekorelacja sygnału radarowego (koherencja)

Koherencja przedstawia wielkości zmian jakie dokonały się pomiędzy wykonaniem kolejnych zdjęć - fazy i intensywności pomiędzy sąsiednimi pikselami dwóch obrazów. (Villasenor, Zebker 1992, Cattabeni et al. 1994, Pratti et al. 1994). Od wielkości tego parametru zależy czytelność generowanego interferogramu. Obraz przedstawiający w odcieniach szarości wartość koherencji (tzw. MAPA KOHERENCJI) w bezpośredni sposób ukazuje jakość i wiarygodność użytych danych. Obszary o słabej koherencji (ciemne) wyznaczają miejsca, w których pierwotna faza sygnału została zmieniona przez czynniki zewnętrzne (Ryc. 2,3).

Na wartość koherencji największy wpływ mają następujące czynniki (Pratti et al. 1994):

- odległość bazowa (dekorelacja geometryczna): jeśli pozycje satelity podczas kolejnych obserwacji tego samego obszaru różnią się od siebie znacznie, wówczas rozmiary terenowe piksela będą inne co spowoduje niemożliwość precyzyjnego współrejestrowania obu zdjęć,
- wielkość szumów sygnału radarowego i defekty fazy związane z aparaturą (SNR – *Signal to Noise Ratio*),
- błędy współrejestrowania obu zdjęć w trakcie obróbki danych,
- fizyczne zmiany środowiska jakie zaszły pomiędzy kolejnymi zdjęciami.

Szczególnie duże znaczenie ma ten ostatni czynnik: odbita wiązka radarowa jako fala elektromagnetyczna zależy od własności dielektrycznych powierzchni odbijającej. Sucha gleba charakteryzuje się stałą dielektryczną o wartości 3-8, podczas gdy dla gleby wilgotnej wartość ta wynosi ok. 80 (FAO/ESA 1993). Podobny, negatywny wpływ na wartość fazy w przypadku obserwacji powtarzalnych mają obszary leśne, uprawy, aktywna roślinność. Przy długości 5,7 cm (ERS-1, ERS-2) fala elektromagnetyczna jest zdolna penetrować jedynie górne partie koron drzew i przypowierzchniowe partie gleby.

Dekoherencja (utrata koherencji) jest również funkcją czasu pomiędzy wykonaniem zdjęć (Villasenor, Zebker 1992). Dla obrazów SAR z satelitów ERS wpływ bazy czasowej jest bardzo duży wskutek małej długości fali (Usai, Hanssen 1997).

3. Zastosowane kryteria wyboru danych SAR dla badań górniczych osiadań GZW

W przypadku interferometrycznych badań osiadań, gdzie stosuje się pary zdjęć o dużych bazach czasowych, o jakości uzyskanych interferogramów decyduje odpowiedni dobór danych SAR. Do wyselekcjonowania danych z obszaru Górnego Śląska zastosowano następujące kryteria:

- a) baza czasowa: zastosowano bazy czasowe pomiędzy zdjęciami „master” i „slave” wynoszące odpowiednio 35 i 70 dni. W celach porównawczych zastosowano również dane o ekstremalnie długiej (1118 dni) i ekstremalnie krótkiej (24 godziny) bazie czasowej,
- b) odległość bazowa: zastosowano pary zdjęć SAR, których odległość bazowa była mniejsza niż 100 m,
- c) pora roku wykonania zdjęć: okresy charakteryzujące się powolnym wzrostem roślinności i małą ilością opadów: późne lato - wczesna jesień i późna jesień,

- d) warunki atmosferyczne: brak opadów podczas wykonywania zdjęć jak również w interwale 24 godzin poprzedzających ich wykonywanie; do kontroli warunków atmosferycznych wykorzystano dane meteorologiczne (ilość opadów, zachmurzenie, wilgotność gruntu) ze stacji naziemnych IMiGW w Katowicach – Muchowcu, Bieruniu i Głubczycach oraz satelitarne zdjęcia meteorologiczne z satelitów NOAA-12, NOAA-14, METEOSAT.

Ostatecznie do obróbki interferometrycznej wytypowano 13 scen ERS SAR spełniających powyższe kryteria (Tabela 1):

Tabela 1. Charakterystyki użytych par interferometrycznych

lp. pary	numer ścieżki	MASTER			SLAVE			odl. baza wa [m]	baza czasowa
		satelita	orbita	data	satelita	orbita	data		
1	222	ERS-1	21753	12.09.95	ERS-2	02080	13.09.95	76	24 h
2	222	ERS-1	05377	26.07.92	ERS-2	0159	09.08.95	7	1118 dni
3	222	ERS-1	06880	08.11.92	ERS-1	06389	04.10.92	54	35 dni
4	222	ERS-1	07381	13.12.92	ERS-1	06880	08.11.92	8	35 dni
5	222	ERS-1	07381	13.12.92	ERS-1	06389	04.10.92	62	70 dni
6	494	ERS-1	11661	08.10.93	ERS-1	11160	03.09.93	20	35 dni
7	494	ERS-1	11661	08.10.93	ERS-1	12162	12.11.93	77	35 dni
8	494	ERS-1	12162	12.11.93	ERS-1	11160	03.09.93	53	70 dni
9	222	ERS-1	20751	04.07.95	ERS-1	21753	12.09.95	58	70 dni
10	222	ERS-1	20751	04.07.95	ERS-2	02080	13.09.95	9	71 dni

4. Ogólna ocena jakości uzyskanych interferogramów

W niniejszym artykule przedstawiono szczegółową analizę jakości danych z roku 1993. Należą do nich sceny ERS SAR z września, października i listopada. Dane te umożliwiły utworzenie interferogramów z okresów 35 dniowych i 70 dniowego (pary 6,7,8). Bardzo dobre warunki atmosferyczne sprawiły że wszystkie interferogramy charakteryzują się dobrą koherencją i nadają się do interpretacji. Najwyższą jakość prezentuje interferogram wygenerowany na podstawie pary zdjęć nr 6 (Tab. 1, Ryc. 3a). Interferogram 7 (październik) wykazuje obniżoną koherencję (Ryc. 3b). Spadek koherencji należy tłumaczyć różnicami sezonowymi w wegetacji jakie zachodzą na przełomie października i listopada. Interferogram obejmujący okres 70 dni (Ryc. 3c): wrzesień i październik wykazuje koherencję zbliżoną do pozostałych.

5. Interpretacja interferometrycznego obrazu osiadań gómiczych

W przypadku postępującej eksploatacji podziemnej, proces osiadania występuje na powierzchni po ok. 3-14 miesiącach od momentu eksploatacji a ruchy obniżające zanikają po upływie ok. 2 lat (Borecki 1980). Interferogramy obejmujące okresy 35 dni przedstawiają chwilowy stan postępującego procesu osiadania

– przyrosty osiadań. W obrazie prążków interferometrycznych zapisane zostają jedynie zjawiska zachodzące na aktywnym sklonie tworzącej się niecki osiadań (Perski, Jura 1999). Z obserwacji geodezyjnych wynika, że największe przyrosty osiadania w jednostce czasu występują w środkowej części aktywnego skłonu tworzącej się niecki osiadań. Na interferogramie, obszar ten odpowiada występowaniu zespołów koncentrycznych prążków interferometrycznych, które identyfikują obszary najszybciej obniżające się w czasie 35 dni. Interferogram obejmujący okres 70 dni przedstawia zdwojone w stosunku do 35 dni przyrosty osiadań. Interferogramy o bazie czasowej dłuższej niż 365 dni pozwolą na zaobserwowanie pionowych deformacji ustalonych, a nawet resztkowych. Przy założeniu że zmiany fazy interferometrycznej o $\pi/2$ odpowiada najmniejszym ruchom powierzchni dającym się zinterpretować jako osiadania, minimalna, obserwowana średnia prędkość osiadań wynosi 0.018 cm/dzień (dla danych o bazie czasowej 35-dni). W przypadku bazy czasowej taka sama zmiana fazy będzie odpowiadać średniej prędkości osiadań 0.009 cm/dzień.

6. Jakość danych InSAR

Na możliwości interpretacji zasięgu obszaru objętego ruchem największy wpływ ma koherencja interferometryczna. Na podstawie analizy przedstawionych danych, jak również na podstawie porównań z wynikami dla innych obszarów (Usai, Hanssen 1997) można stwierdzić, iż progową wartością koherencji dla rozwijania fazy jest 0.2. W tym przypadku ma także znaczenie koherencja pikseli sąsiednich, gdyż w praktyce, w procesie rozwijania fazy biorą udział piksele wykazujące wartości koherencji większe niż 0.3 oraz ich otoczenie do wartości 0.2. Jednak dla interpretacji wizualnej mogą być również użyte obszary cechujące się wartością koherencji z przedziału 0.2 - 0.15: przy tej bowiem wielkości koherencji możliwe jest jeszcze rozróżnienie granic poszczególnych prążków interferometrycznych. O jakości przydatności do analizy interferometrycznej - danych InSAR decyduje zatem nie tyle minimalna lub maksymalna wartość koherencji, ile udział pikseli, których koherencja jest większa od przedstawionych powyżej wartości granicznych oraz ich rozmieszczenie. W przypadku występowania dużych, wysoce-koherentnych obszarów - interferogram będzie cechował się obecnością wysokiej jakości prążków nadających się do przetworzenia poprzez rozwijanie fazy (Ryc. 3a). Tego typu koherencja jest charakterystyczna dla obszarów zurbanizowanych, które wykazują koherencję nawet w przypadku długich baz czasowych (Ryc. 2) czy złych warunków atmosferycznych. Obszary rolnicze, wysoką koherencję wykazują w okresach mało intensywnej wegetacji. Jeśli zbiory upraw miały miejsce w okresie poprzedzającym wykonanie zdjęcia „slave” interferogram będzie zawierał obszary słabej koherencji swym kształtem nawiązujące do zasięgu zebranych upraw (Ryc. 2). W przypadku występowania rozproszonych – wysoce koherentnych punktów w otoczeniu obszarów o bardzo niskiej koherencji. Słaba jakość tak uzyskanych danych nie pozwala na rozwinięcie fazy i uniemożliwia określenie wielkości przyrostów osiadania gdyż występowanie pikseli o słabej koherencji uniemożliwia prawidłową interpretację. Jeśli nie jest ono zbyt duże, otrzymamy obraz możliwy do wizualnej interpretacji zasięgu prążków interferometrycznych na z reguły dużym obszarze. Możliwości interpretacyjne interferogramów są uzależnione od stopnia rozproszenia pikseli koherentnych

centralnych prążków. Centra eliptycznych prążków reprezentujące największe przyrosty osiadania zajmują bardzo małe obszary – nierzadko kilku lub kilkunastu pikseli.

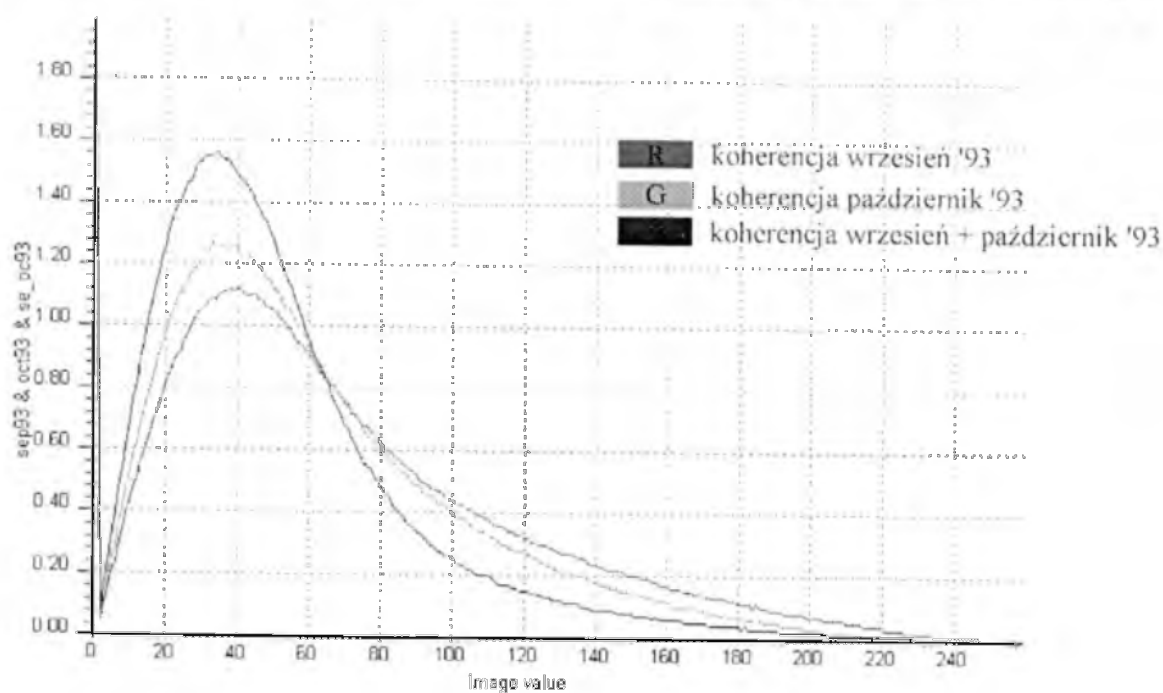
Z analizy przedstawionych map koherencji wynika, że wraz ze wzrostem bazy czasowej spada gwałtownie ilość wysoce-koherentnych pikseli i jednocześnie wzrasta wielkość obszarów o koherencji poniżej 0.15. Obszary o koherencji 0.23-0.15 zajmują w miarę stałą powierzchnię co wskazuje że pomimo ogólnego spadku koherencji obszar na którym możliwa jest interpretacja zajmuje wciąż taki sam obszar. W rzeczywistości jednak, pomimo że pikseli z przedziału 0.32-0.15 jest podobna ilość to wzrasta ich rozproszenie, przez co rzeczywista możliwość ich interpretacji maleje. Obszary o koherencji 0.23-0.15 nie pozwalają na wyznaczenie wartości przyrostu osiadania a jedynie zasięgu obszaru objętego osiadaniami. Zestawienie histogramów koherencji dla tego samego obszaru ukazuje przede wszystkim wpływ zmian sezonowych. Z powyższych rozważań wynika że jedynie 40-60 % badanego obszaru może być objęte wiarygodnym zdjęciem interferometrycznym.

7. Wnioski

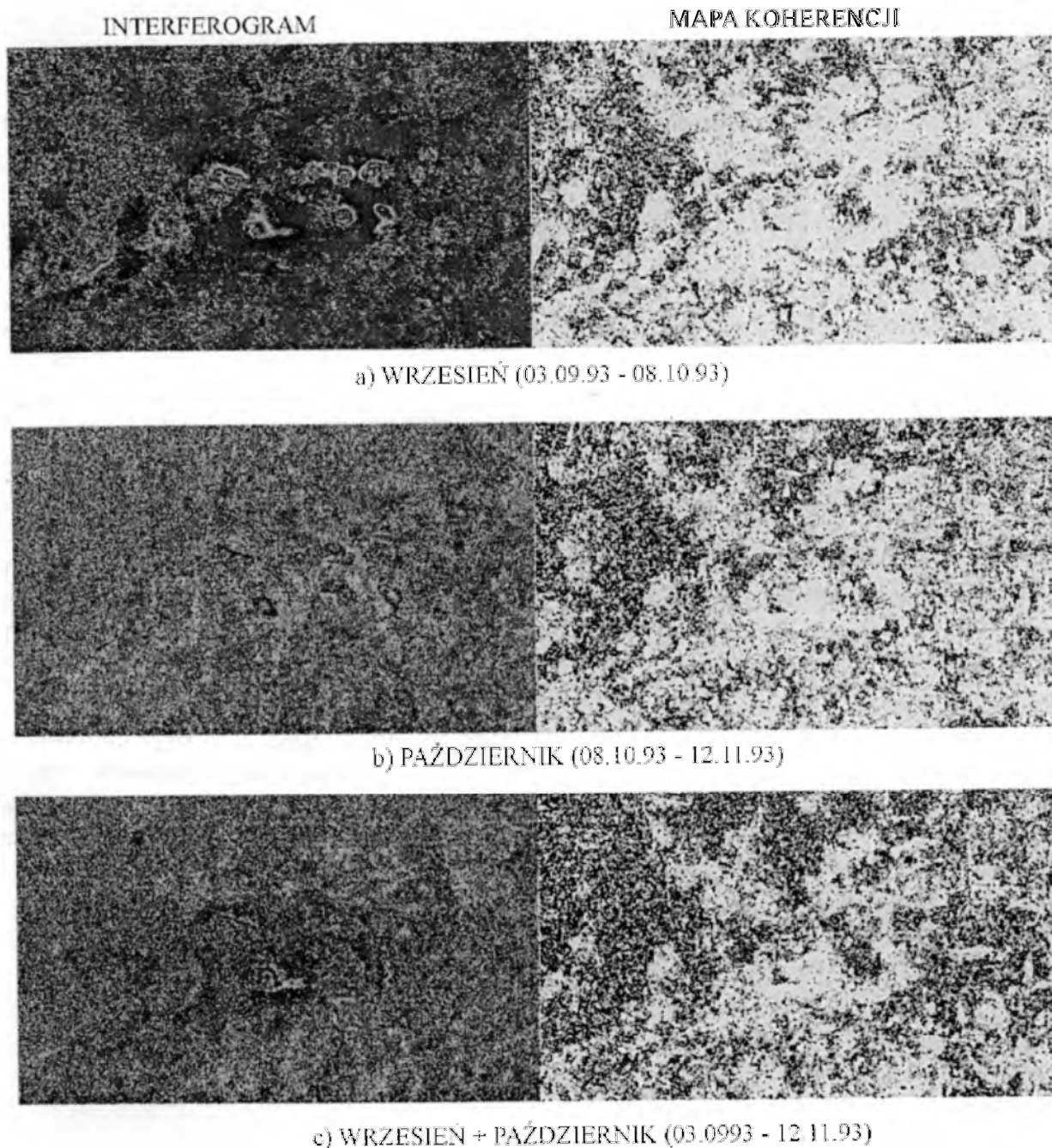
Z przeprowadzonych analiz i badań porównawczych z danymi naziemnymi (Perski 1999, Perski, Jura 1999) wynika iż satelitarna interferometria radarowa dostarcza wiarygodnych danych na temat osiadań terenu, które mogą być wykorzystane do monitoringu dynamiki powierzchni GZW na skalę lokalną jak i regionalną. Środowiskowa analiza interferogramów i map koherencji pozwala na oszacowanie wiarygodności przyrostów osiadań uzyskiwanych interferometrycznie. Na podstawie analizy charakteru użytkowania terenu oraz na podstawie analiz koherencji posiadanych danych można prognozować jakość interferogramów jeszcze przed ich wygenerowaniem. Takie analizy mogą znacznie przyspieszyć proces selekcji danych SAR oraz wyeliminować szereg błędów. Dzięki tej metodzie stanie się możliwe opracowanie mapy stosowalności danych interferometrycznych dla całego obszaru GZW.



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru GZW z naniesionymi zasięgami zdjęć ERS SAR. Kolorem zielonym przedstawiono fragment obszaru prezentowany w artykule. Interferogram z naniesionymi obszarami górnictwa przedstawia przyrosty osiadań w ciągu 35 dni (wrzesień 1993) – por. Ryc. 2.



Ryc. 2. Kompozycja barwna i histogramy trzech obrazów koherencji z 1993. Obszary zabudowane o stabilnej, wysokiej koherencji przedstawiane w kolorze białym. Ciemne obszary – lasy, obszary w kolorach zielonym i czerwonym – zmiany koherencji spowodowane zbiorami upraw.



Ryc. 3. Różnice jakości danych interferometrycznych. Interferogramy i mapy koherencji z 1993 roku. Mapy koherencji zostały sklasyfikowane w oparciu o metodę „density slicing” przy użyciu progów pomiędzy klasami według następującego klucza: obszary nadające się do rozwijania fazy (koherencja powyżej 0.23 - żółty), interpretacji wizualnej (0.15 - 0.23 zielony) i nie nadających się do interpretacji (koherencja poniżej 0.15 niebieski). Klucz dobrano empirycznie podczas analizy interferogramów, jak również w oparciu o możliwości techniczne algorytmów.

Literatura

1. Borecki M. (red.), 1980, Ochrona powierzchni przed szkodami górnictwem. Wyd. "Śląsk", (Praca zbiorowa), Katowice, 1-967
2. Cattabeni M., Monti-Guarnieri A., Rocca F., 1994, Estimation and Improvement of Coherence in SAR Interferograms. Proceedings of IGARSS '94, Pasadena, California, 720-722.
3. Coulson, S.N., 1996, SAR Interferometry with ERS. Earth Space Review, Vol. 5, No. 1, 9-16.
4. FAO/ESA, 1993, Radar Imagery: Theory and interpretation. Lecture notes. (Lichtenegger J. Raney R.K., Schumman R.), FAO Remote Sensing Centre Series No.67, 103, Rome, 1-103.
5. Massonnet D., 1997, Satellite Radar Interferometry, Scientific American no.2, <http://www.sciam.com/0297issue/0297massonnet.html>
6. Perski Z., 1999, Osiadania terenu GZW pod wpływem eksploatacji podziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). Prz. Geol 2, 171-174
7. Perski Z., Jura D., 1999, ERS SAR Interferometry for Land Subsidence Detection in Coal Mining Areas, Earth Observation Quarterly (w druku).
8. Pratti C., Rocca F., Monti Guarnieri A., Pasquali P., 1994, Report on ERS-1 SAR interferometric techniques and applications. ESA report 10179/93/YT//SC 1-122. Frascati.
9. Usai S., Hanssen R., 1997, Long time scale InSAR by means of high coherence features. Proceedings of the Third ERS Symposium, Florence, Italy. <http://florence97.ers-symposium.org/data/usai/index.html>
10. Villasenor J., Zebker H., 1992, Temporal decorrelation in repeat-pass radar interferometry. Proceedings of IGARSS'92, 941-943.

Autor

mgr Zbigniew Perski
Katedra Geologii Podstawowej
Uniwersytet Śląski
41-200 Sosnowiec, ul. Będzińska 60
tel. (0-32) 291 83 81 w. 206
fax (0-32) 291 58 65
e-mail: perski@us.edu.pl

Recenzował dr inż. Zdzisław Kurczyński