

Edward POPIOŁEK, Artur KRAWCZYK, Paweł SOPATA  
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków  
Cezary BACHOWSKI  
„Cuprum”, Wrocław

## WYKORZYSTANIE METODY INSAR W MONITORINGU I PROGNOZOWANIU DEFORMACJI POWIERZCHNI TERENU

**Streszczenie.** W ostatnich latach w dziedzinie ochrony terenów górniczych coraz częściej wykorzystywana jest Satelitarna Interferometria Radarowa (InSAR). Technika ta pozwala na radarowe skanowanie dużych obszarów powierzchni Ziemi w krótkim czasie. Odpowiednia obróbka wykonywanych okresowo zdjęć radarowych umożliwia pozyskiwanie informacji przestrzennych o zmianach wysokościowych terenu. Interferometryczne obrazy powierzchni Ziemi uwidaczniają rejony pionowych jej ruchów w subcentymetrowym przedziale dokładności.

Badania nad zastosowaniem metody InSAR w Polsce rozpoczął w 1996 roku dr Z. Perski (Uniwersytet Śląski). Dotyczyły one rejonu Górnos Śląskiego Zagłębia Węglowego. Od 2000 roku badania tego typu zostały podjęte przez zespół Katedry Ochrony Terenów Górniczych i Geoinformatyki AGH w Krakowie. Prowadzono je w warunkach Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego. Badania wykazały, że metoda InSAR ma szerokie możliwości wykorzystania w wielu aspektach monitorowania i prognozowania pogórnich deformacji powierzchni terenu. Dotychczas wykonano już pierwsze ekspertyzy opierając się na InSAR w największych zagłębiach górniczych kraju. Bazują one na potwierdzonej badaniami wiarygodności wyników radarowych skanowań satelitarnych. Prezentowana w niniejszej pracy ta nowoczesna technika teledetekcji z powodzeniem staje się kolejną metodą monitoringu deformacji terenów górniczych, celem ich ochrony i profilaktyki.

## THE APPLICATION OF THE INSAR METHOD IN MONITORING AND CALCULATING OF THE DEFORMATIONS OF THE TERRAIN SURFACE

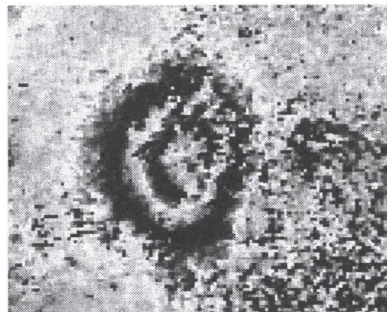
**Summary.** In recent years in the protection of mining areas the method of the Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) has been applied more and more often. This method allows scanning of large areas of Earth in a short time. A proper processing of periodically taken radar images allows obtaining spatial information on the altitude changes in the area. Interferometric images of the Earth surface show the regions of vertical movements in a sub-centimetre interval of accuracy.

Dr Z. Perski (Silesian University) was the first in Poland to start the studies over the application of the InSAR method. The studies started in 1996 and referred to the region of the

Upper Silesian Coal Mining Area. Since 2000 the studies of this kind have been carried out by the team of the Chair of the Protection of Mining Areas and Geoinformatics of AGH-UST in Krakow. They were carried out in the conditions of the Legnica-Głogów Copper District. The applied nowadays InSAR method has significant possibilities of application in many aspects of monitoring and forecasting of post-mining deformations of the terrain surface. First expertises have already been made in the largest mining areas of Poland. They are based on the confirmed reliability of radar satellite measurements. Presented in this paper modern remote sensing technique is successfully becoming a subsequent method of deformation measurements carried out in mining areas to protect them and monitor them on-line.

## 1. Metoda InSAR

Metoda Satelitarnej Interferometrii Radarowej jest metodą różnicową [2]. Jej stosowanie wymaga wykonania minimum dwóch radarowych zobrazowań tej samej powierzchni terenu w różnym czasie. Na ich podstawie generuje się tzw. interferogram [4]. Analizy rastra interferogramu (rys. 1) dostarczają informacji o pionowych zmianach terenu. Można z nich odczytać m.in. wartości okresowych obniżeń i ich aktualny zasięg. Z tego względu metoda InSAR znajduje coraz szersze zastosowanie przy bieżącym monitoringu terenów górniczych. Spośród wielu stosowanych dotychczas metod pomiarowych InSAR jako jedyna pozwala uzyskać przestrzenny obraz niecek obniżeniowych, występujących nad prowadzoną podziemną eksploatacją górnictw na dużym obszarze. Umożliwia to wyznaczenie aktualnych rejonów zagrożeń górniczych. Przestrzenny model niecki obniżeniowej, przy zachowaniu odpowiednich kryteriów, dodatkowo daje możliwość wyznaczania parametrów teorii wpływów eksploatacji stosowanych w prognozowaniu, np. teorii Knothego.



Rys. 1. Fragment interferogramu z obrazem okresowych obniżeń powierzchni terenu  
Fig. 1. A fragment of the interferogram with the image of the period of subsidence

## 2. Metoda InSAR a pomiar geodezyjny

Porównanie wyników pomiarów geodezyjnych z wynikami uzyskanymi metodą InSAR w ramach badań Katedry Ochrony Terenów Górniczych i Geoinformatyki miało na celu potwierdzić wiarygodność oraz oszacować dokładność pomiaru satelitarnego. Za podstawę porównania przyjęto rezultaty pomiaru geodezyjnego, wykonanego precyzyjnymi instrumentami, których zastosowanie zapewniało dokładność obniżeń o około rząd wielkości wyższą od przewidywanej dokładności wyników metody satelitarnej. Bazę porównawczą stanowił precyzyjny pomiar niwelacyjny punktów linii obserwacyjnych, prowadzonych w obszarach górniczych LGOM nad eksploatacją złóż rudy miedzi. Porównania pomierzonych wartości przyrostów obniżeń powierzchni terenu dokonano w pionowych przekrojach interferometrycznych niecek obniżeniowych. Przebieg przekrojów zdeterminowany był usytuowaniem punktów geodezyjnych linii obserwacyjnych.

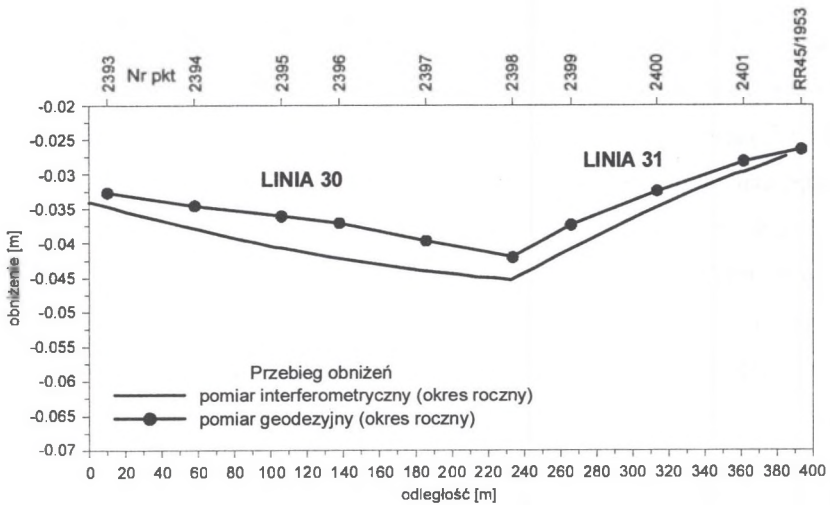
Analizy oparto na wynikach pomiarów geodezyjnych i satelitarnych wzajemnie zsynchronizowanych w czasie. W dalszej części pracy zaprezentowano rezultaty badań, w których udało się zsynchronizować pomiary w 12-miesięcznym cyklu obserwacji [8]. Rejon badań obejmował wschodnią część filara miasta Polkowice (O.G. „Rudna”). Eksploatację górniczą, celem ochrony zabudowy, prowadzono tam z podsadzkowym systemem likwidacji zrobów. W aspekcie pomiaru interferometrycznego był to istotny fakt, ze względu na stosunkowo niedużą dynamikę procesu deformacji. Dlatego, mimo dość długiej bazy czasowej (25.11.2005 r. - 10.11.2006 r.), na interferogramie udało się zarejestrować wyraźny skłon niecki obniżeniowej - rys. 2.



Rys. 2. Interferometryczny obraz skłonu niecki obniżeniowej z rejonu filara Polkowic z usytuowaniem linii obserwacyjnych

Fig. 2. Interferometric image of the slope of the subsidence trough taken on protection pillar Polkowice with levelling lines

W okresie objętym interferogramem, w granicach miasta, wykonano wysokościowe pomiary geodezyjne na liniach obserwacyjnych, zaznaczonych na rysunku 2 w postaci czarnych linii. Przedstawiona sieć pomiarowa składała się z 9 linii obserwacyjnych, obejmujących łącznie ponad 140 punktów. Niektóre z wyników pominięto ze względu na wyraźne zaburzenia w przebiegach obniżeń, świadczące o uszkodzeniu punktu bądź istotnym błędzie pomiarowym. W wyniku analiz porównawczych stwierdzono zarówno jakościową, jak i ilościową zgodność obu metod. Przebiegi osiadań powierzchni terenu zachowywały współkształtność połączoną z niedużą różnicą wartości obniżeń w badanych punktach. Przykładowe porównanie wartości obniżeń wzdłuż łączących się linii obserwacyjnych 30 i 31 przedstawiono na wykresie – rys. 3.



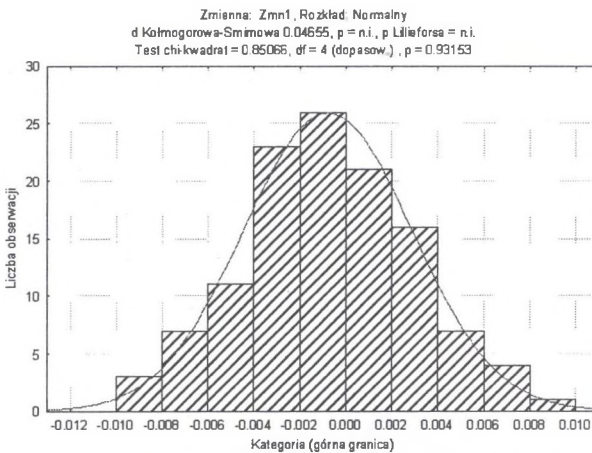
Rys. 3. Porównanie wartości obniżeń z pomiarów geodezyjnego i interferometrycznego  
 Fig. 3. The comparison of the values of the subsidence from geodesic and interferometric measurements

Różnice obniżeń analizowanych punktów nie przekraczały z reguły wartości 10 mm, w większości przypadków były mniejsze od 5 mm. W około 50% analizowanych punktów różnice obniżeń nie przekroczyły 3 mm. Granica 8 mm nie została przekroczona w 88% punktów. Szczegółowe zestawienie wyników analizy przedstawia tabela 1.

Tabela 1  
Rozkład różnic obniżeń porównanych punktów pomiarowych

Wartość różnicy [mm]	Ilość punktów	Ilość punktów [%]
0 ÷ 3	66	49,6
3 ÷ 5	32	24,1
5 ÷ 8	19	14,3
> 8	16	12,0
Suma	133	100

Wykonane statystyczne testy normalności wykazały, że różnice pomierzonych obniżeń mają rozkład normalny. Potwierdza to wykonany histogram – rys. 4.



Rys. 4. Histogram różnic obniżeń pomierzonych metodą InSAR i geodezyjną

Fig. 4. The histogram of the differences in subsidence measured by the InSAR method and geodesic method

Potwierdzenie normalności rozkładu przeanalizowanych różnic obniżeń umożliwiło oszacowanie dokładności metody InSAR opierając się na podstawowych statystykach. Obliczona średnia wartość różnic pomiaru InSAR w stosunku do wyników pomiaru geodezyjnego wyniosła  $s_r = 1,4$  mm. Wartość ta jest na poziomie zbliżonym do dokładności pomiaru niwelacyjnego (około  $\pm 1$  mm) i świadczy o zbieżności wyników obu metod. Za miarę dolnej granicy przedziału oszacowania dokładności metody InSAR przyjęto wyliczone odchylenie standardowe, wynoszące  $\sigma_{sr} = \pm 5,4$  mm. Górną granicę tego przedziału określono na poziomie  $\pm 8$  mm. W tym zakresie mieściło się bowiem około 90% wartości różnic obniżeń przebadanych punktów.

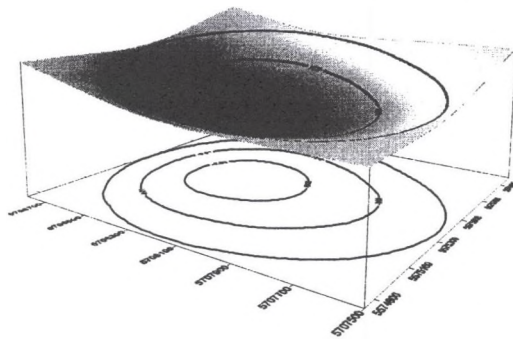
### 3. Objętość niecek obniżeniowych

Opis skutków procesu deformacji sporządzany na podstawie pomiarów geodezyjnych linii obserwacyjnych dotyczy w zasadzie tylko tzw. zagadnienia płaskiego. Stanowi je pionowy przekrój górotworu prowadzony wzdłuż założonej linii pomiarowej.

W rzeczywistości przyczyną powstawania deformacji terenu jest wybrana przestrzeń złoża, tworząca pustkę. Na powierzchni terenu ujawnia się to w postaci niecki obniżeniowej o pewnej objętości.

Metoda Satelitarnej Interferometrii Radarowej umożliwiła wykonanie przestrzennych opisów niecek obniżeniowych. Na ich podstawie, w sposób pośredni, określono objętości niecek okresowych. Wykorzystano do tego celu komputerowe metody obliczeniowe. Podstawę obliczeń stanowił każdorazowo utworzony numeryczny model niecki obniżeniowej – rys. 5. Był on wynikiem wektoryzacji obrazów rastrowych oraz nadawania odpowiednich atrybutów w przestrzennym modelu 3D. Operację numerycznego całkowania przeprowadzono opierając się na informacjach przestrzennych zapisanych w wygenerowanej uprzednio gęstej siatce grid (o rozdzielczości wyższej od rozdzielczości interferogramu).

Możliwość wyznaczania objętości i kształtu niecek obniżeniowych pozwoliła powiązać je z eksploatacją górnictw w ujęciu przestrzennym (w układzie trójwymiarowym). Informacje te wykorzystano do wyznaczania parametrów teorii wpływów.



Rys. 5. Numeryczny model niecki obniżeniowej  
Fig. 5. The numeric model of the subsidence trough

## 4. Parametry teorii wpływów

Prognozy deformacji ciągłych na terenach górniczych LGOM wykonuje się na podstawie teorii Knothego [3]. Obok współczynnika czasu uwzględnia ona dwa podstawowe parametry, opisujące ogólne własności górotworu. Są to tzw. parametr górotworu (tangens kąta zasięgu wpływów głównych) –  $tg\beta$  oraz współczynnik eksploatacji  $a$ .

### 4.1. Parametr górotworu

Wyznaczenie parametru  $tg\beta$  oparto na założeniu elementarności różnicowej niecki obniżeniowej. Założenie to jest zasadne do przyjęcia w warunkach LGOM, ponieważ przyrost niecki obniżeniowej związany jest z powiększeniem pustki pierwotnej na małym obszarze, z uwagi na znaczną miąższość złoża i małe postępy frontu, co pozwala uznać proces za liniowo stacjonarny. Wykorzystano niecki okresowe, które powstają w rejonach krawędzi rozwiniętych pól eksploatacji. Są one rejestrowane metodą InSAR.

Do wyznaczenia parametru teoretycznie wystarczą dwa punkty z obszaru niecki elementarnej, z których jeden to punkt o maksymalnym obniżeniu  $w_1$ . Drugi punkt – to dowolny punkt skrzydła niecki (o obniżeniu  $w_2$ ), leżący w odległości  $x_2$  od punktu pierwszego. Parametr  $tg\beta$  wyznaczyć można wówczas z zależności [1]:

$$tg\beta = \frac{H \sqrt{\lg(w_1 : w_2)}}{1,17x_2} \quad (1)$$

gdzie:  $H$  oznacza głębokość eksploatacji.

Praktyczne wyznaczanie wartości parametru realizują się z wykorzystaniem dużej ilości punktów z obszaru niecki. Ostateczną wartość stanowi uśrednienie uzyskanych poszczególnych wyników. Wykorzystywane do celów obliczeń niecki muszą spełniać wiele kryteriów [8]. Ogólnie ujmując, muszą być one odpowiednio małe, niezaburzone nadmiernie efektem superpozycji wpływów.

Wyznaczone dotychczas, na przestrzeni ponad 10 lat, parametry górotworu na terenie LGOM wskazują na wiarygodność zastosowanej metody. Zróżnicowanie ich wartości w zakresie 1,4÷1,7 odpowiada wynikom uzyskiwanym z metod geodezyjnych, bazujących na asymptotycznym stanie deformacji. Wynika stąd podstawowa zaleta metody, którą jest możliwość poznania parametru  $tg\beta$  już w trakcie eksploatacji złoża, z chwilą wystąpienia pierwszych obniżen powierzchni terenu.

## 4.2. Współczynnik eksploatacji

Metoda InSAR, ze względu na możliwości określania objętości niecek obniżeniowych, pozwoliła na klasyczne podejście do wyznaczenia współczynnika eksploatacji. W teorii jest on zdefiniowany zazwyczaj jako stosunek objętości niecki obniżeniowej na powierzchni terenu do objętości wybranego złoża, która powoduje powstanie tej niecki.

Obliczenie objętości powstałych niecek i objętości wyeksploatowanej ilości rudy nie nastręcza dużych trudności. Problemem staje się określenie fragmentu eksploatacji, który spowodował na powierzchni terenu obserwowany w postaci obniżenia terenu skutek. Wynika to z opóźnienia czasowego w ujawnianiu się wpływów. Z tego powodu współczynniki  $a$  można wyznaczać tylko w określonych warunkach. Podstawowy warunek stanowi rozwinięte pole eksploatacji o w miarę równomiernym i ciągłym prowadzeniu wydobywania w czasie. Wówczas występuje liniowa (lub zbliżona do liniowej) zależność pomiędzy przyrostem eksploatacji a przyrostem deformacji (w ujęciu objętości) [10].

Wyznaczone w ten sposób współczynniki eksploatacji na terenach górniczych LGOM, wykazują zbieżność z przyjmowanymi dotychczas wartościami, określanymi na podstawie linii geodezyjnych. Zgodność tę uzyskano zarówno dla zawałowych ( $a$  równe około 0,5), jak i podsadzkowych ( $a$  równe około 0,2) systemów likwidacji zrobów.

Znajomość wiarygodnych parametrów pozwala na dokładne modelowanie procesu deformacji powierzchni terenu, uzupełniając na tej drodze niepełny czasowo obraz obniżenia uzyskiwany z metody InSAR.

## 5. Podsumowanie

Przedstawione w artykule rezultaty opracowania pomiarów, wykonanych metodą Satelitarnej Interferometrii Radarowej, świadczą o jej dużych możliwościach przy monitorowaniu i prognozowaniu deformacji powierzchni na terenach górniczych. Przestrzenny charakter danych InSAR rozszerza także niektóre aspekty stosowanych dotychczas metod geodezyjnych. Uwidacznia się to szczególnie w zakresie opisu niecek obniżeniowych, a także w innym podejściu do wyznaczania parametrów teorii wpływów.

Uzyskiwane metodą InSAR wiarygodne wartości, zbieżne z wynikami metod geodezyjnych, pozwalają obecnie na wykonywanie ekspertyz i opracowań o charakterze użytkowym. Stanowią one już często materiał opiniotwórczy i dowodowy w sprawach



sądowych [9]. Zaletą prezentowanej metody satelitarnej, obok pozyskiwania danych na dużym obszarze w krótkim czasie, jest jej bezinwazyjność. Polega ona na braku konieczności wykonywania w terenie jakichkolwiek prac (np. stabilizacji punktów). Związane są z tym również ważne aspekty ekonomiczne.

Dalszy rozwój systemu łączy się z coraz nowocześniejszym sprzętem detekcyjnym, który instalowany jest na kolejnych nowych satelitach. Nowe metody obróbki danych, jak np. metoda PS InSAR, umożliwia analizowanie wielu (ponad 25) interferogramów równocześnie. Daje to możliwość badania niewielkich ruchów powierzchni terenu w długim, nawet kilkuletnim przedziale czasu. Dodatkowe stosowanie naziemnych reflektorów kątowych podwyższa dokładność otrzymywanych z InSAR wyników. Postępujący rozwój przedstawionej metody pozwala na ugruntowanie jej pozycji wśród stosowanych dzisiaj technik pomiarów na terenach górniczych.

## LITERATURA

1. Batkiewicz W., Popiołek E.: Prognozowanie wpływu eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu w warunkach LGOM. Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej PAN, Geodezja 14, Kraków 1972.
2. Gabriel A.K., Goldstein R.M., Zebker H.A.: Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry *Journal of Geophysical Research: Solid Earth and Planets*, Vol. 94, No. B7, July 10, 1989, p. 9183 -9191.
3. Knothe S.: Prognozowanie wpływów eksploatacji górniczej. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1984.
4. Krawczyk A., Perski Z.: Application of Satellite Radar Interferometry on the areas of underground exploitation of copper ore in LGOM - Poland. *International Society of Mining, Cracow 2000*.
5. Popiołek E., Bachowski C., Krawczyk A., Sopata P.: The attempt to apply radar interferometry InSAR in the monitoring of the impact of the ore deposit exploitation in LGOM. *International Mining Forum. Proceedings of the fifth International Mining Forum 2004*.
6. Popiołek E., Hejmanowski R., Krawczyk A., Perski Z.: Application of satellite radar interferometry to the examination of the areas of mining exploitation, *Anwendung der Radarinterferometrie für die Untersuchung von Bergbauregionen, Surface Mining: Braunkohle & other minerals. vol. 54 no. 1, p. 74-82, 2002*.
7. Popiołek E., Sopata P.: Możliwości wykorzystania Satelitarnej Interferometrii Radarowej InSAR w monitoringu terenów górniczych. *Materiały szkoleniowe, Katalog wystawców X Międzynarodowych Targów GEA, Kraków 2004*.
8. Popiołek E. i inn.: Analiza przemieszczeń pionowych terenów górniczych kopalń KGHM „Polska Miedź” S.A. z wykorzystaniem techniki interferometrii satelitarnej. AGH, Kraków 2006 (praca niepublikowana).

9. Popiołek E. i in.: Określenie wielkości deformacji terenu w rejonie eksploatacji pokładu 413/1 ściany 4c z wykorzystaniem interferometrii satelitarnej (InSAR). AGH, Kraków 2005 (praca niepublikowana).
10. Sopata P.: Monitoring i prognozowanie wpływów górniczych z wykorzystaniem satelitarnej interferometrii radarowej InSAR. VI Naukowa Konferencja Doktorantów, Zagadnienia interdyscyplinarne w górnictwie i geologii, Szklarska Poręba, 23–25 marca 2006.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006 - 2007 jako projekt badawczy.*

Recenzent: Dr hab. inż. Jan Białek, prof. w Pol. Śl.