

*Anna Szafarczyk*

**MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA  
NAZIEMNEJ INTERFEROMETRII RADAROWEJ  
W MONITORINGU OSUWISK**

---

**APPLICABILITIES OF USING  
GROUND RADAR INTERFEROMETRY  
IN LANDSLIDE MONITORING**

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono przykład wykorzystania technologii naziemnej interferometrii radarowej do monitoringu osuwiska położonego w Milówce (województwo śląskie). Skrótowno przedstawiono przyczyny powstawania osuwisk oraz elementy rzeźby osuwiska. Odniesiono się do dotychczas stosowanych geodezyjnych technologii monitoringu osuwisk oraz przedstawiono charakterystykę zastosowanej technologii pomiarowej. Naziemna interferometria radarowa pozwala wyznaczyć przemieszczenia z niespotykaną dotąd precyzją, w czasie rzeczywistym i bez potrzeby wstępu na monitorowany obiekt. Możliwości zastosowania naziemnej interferometrii radarowej przetestowano wykonując kilkanaście serii pomiarowych w ciągu dwóch dób. Na przykładzie wykonanych pomiarów przemieszczeń można stwierdzić, iż wykorzystanie naziemnej interferometrii radarowej pozwala na wyznaczenie wartości przemieszczenia z dokładnością milimetrową, przy jednoczesnym skróceniu czasu pomiaru, ograniczeniu składu wykwalifikowanego zespołu pomiarowego do jednej osoby i natychmiastowym uzyskaniu wartości występujących przemieszczeń. Pozyskiwanie i analiza danych w czasie rzeczywistym stwarza potencjalne możliwości ostrzegania o utracie stateczności gruntu, co ma niewątpliwie znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa mieszkańców i ich domostw znajdujących się na terenach osuwiskowych.

**Słowa kluczowe:** monitoring osuwisk, naziemna interferometria radarowa

### Summary

*In the article there was described the example of using ground radar interferometry technique for landslide's monitoring. Monitored object is located in Milówka (Poland). Author described shortly the causes of landslide occurring and the geological elements of typical landslide. Reference was made to monitoring surveying techniques according to characterization of used technique. Ground radar interferometry technique allows us to determine displacement of never before seen precision, in a real time and without the need to enter the monitored object. Possibilities of using ground radar interferometry has been tested by performing several measurement series in two days. For example, the displacement of measurements can be concluded that the use of ground radar interferometry allows to determine the displacement of a millimeter accuracy, while reducing the measurement time, limit the composition of the team qualified for the measurement of one person and get immediate occurring value of displacements. Acquisition and analysis of data in real time creates the potential for warning about the loss of soil stability, which is certainly important for the safety of residents and their homes were located in the landslide areas.*

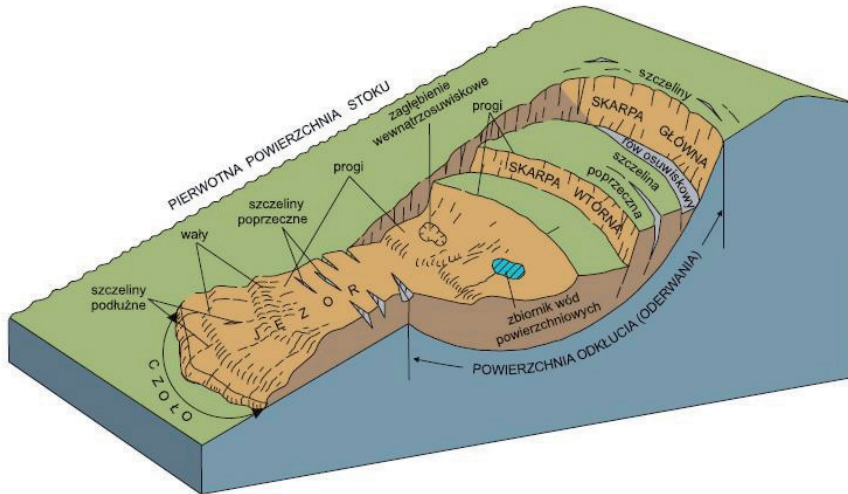
**Key words:** landslide monitoring, ground radar interferometry

### WSTĘP

Osuwisko jest jedną z form ruchów grawitacyjnych, powodujących w efekcie osuwania szybkie przemieszczenie się mas skalnych zgodnie z siłami grawitacji. Prędkość przemieszczenia jest stosunkowo zróżnicowana i waha się w granicach od jednego metra w przeciągu kilku minut, godzin, czy dni, do jednego metra na miesiąc czy rok. Osuwiska zaliczamy do powierzchniowych ruchów masowych, które dodatkowo można podzielić na: odpadanie, obrywanie, osuwanie, zsuwy, spłyzywanie, osiadanie, zerwy, spływy [Wójcik 2010]. Elementy rzeźby osuwiska przedstawiono na rysunku 1.

Przyczyną części występujących osuwisk jest bezpośrednie powiązanie z warunkami klimatycznymi, gdzie głównym czynnikiem są opady atmosferyczne oraz wysycenie wodą roztopową. Inne osuwiska powstają na skutek procesów morfogenetycznych polegających na podcinaniu lub rozcinaniu stoku. W podobny sposób uaktywnienie osuwiska może być spowodowane przez obciążenie stoku przez budowę budynków, nasypów, przez występowanie obciążeń dynamicznych związanych z pracą maszyn czy też ruchem pojazdów mechanicznych. Warunkiem zaistnienia osuwisk jest duże nachylenie stoku oraz izoklinowa budowa geologiczna. Opierając się jedynie na obserwacji stoku i jego otoczenia niejednokrotnie można z dużym prawdopodobieństwem określić aktualność występowania zjawiska na danym obszarze. Należy szukać charakterystycznych zwiastunów jakimi mogą być przechylone ogrodzenia, słupy, wypiętrzenia

gruntu w dolnych częściach skarpy, otwarte szczeliny w górnej części skarpy, spękania i przemieszczenia obiektów budowlanych czy też uschnięta roślinność w wyniku zaburzonych stosunków wodnych [Cała NBI 2009].



**Rysunek 1.** Elementy osuwiska (źródło: Wójcik)  
**Figure 1.** Landslide's elements

Pierwsze próby zliczenia osuwisk na terenie kraju miały miejsce w latach 60 ubiegłego stulecia, które wykazały istnienie ponad 3000 osuwisk jedynie na samym obszarze karpackim. W kolejnym etapie rozpoznano ponad 20000 osuwisk w Karpatach, gdzie występuje ponad 95% wszystkich osuwisk w Polsce, a sam obszar stanowi jedynie 6% powierzchni kraju, co pokazuje intensywność zjawiska dla tego obszaru [Grabowski, Rączkowski PIG 2007].

Gwałtownie zachodzące zjawiska masowe jakimi są osuwiska, od samego początku niosły za sobą katastrofalne w skutkach oddziaływania dla ludzkości, jak liczne ofiary czy poważne zniszczenia zabudowy oraz całej infrastruktury zagospodarowanych części stoków czy rejonów u ich podnóża. Pomimo znanych głównych przyczyn i różnego typu systemów ostrzegania i zapobiegania ich występowaniu, niejednokrotnie dochodziło w ubiegłym stuleciu do poważnych katastrof z dużą liczbą ofiar.

## KLASYCZNE METODY MONITORINGU

Obecnie dostępne i stosowane w praktyce geodezyjnej klasyczne metody monitoringu opierają się na pomiarze sieci punktów kontrolowanych zastabilizowanych na powierzchni osuwiska. Wyniki tak prowadzonego monitoringu mają charakter dyskretny, a ich pozyskanie wiąże się z koniecznością wstępu na teren zagrożony. Po wykonaniu pomiaru następuje opracowanie wyników, pozwalające w dalszym etapie na porównanie wartości współrzędnych punktów wyznaczonych w kolejnych seriach. Pozwala to na wyciągnięcie wniosków co do występujących deformacji ale zawsze z pewnym opóźnieniem, zależnym od czasu potrzebnego na kameralne opracowanie wyników.

Alternatywą dla klasycznego monitoringu jest wykorzystanie nowej metody pomiaru przemieszczeń, jaką jest naziemna interferometria radarowa.

## NAZIEMNA INTERFEROMETRIA RADAROWA

Interferometria jest techniką radarową, pozwalającą na wyznaczenie wartości przemieszczeń monitorowanego obiektu. Pomiar następuje poprzez porównanie fazy fali elektromagnetycznej powracającej po odbiciu się od obiektu w minimum dwóch momentach czasowych. Podczas takiego pomiaru przyrząd (radar interferometryczny) zajmuje stałe położenie. Fala elektromagnetyczna odbijająca się od obiektu w różnych momentach czasowych różni się fazą jeśli nastąpiło przemieszczenie tego obiektu. Na podstawie zmiany fazy wyznaczane jest przemieszczenie obiektu z wzoru [IDS]

$$d = -\frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi, \quad (1)$$

gdzie:

- d – przemieszczenie,
- $\lambda$  – długość fali elektromagnetycznej,
- $\Delta\varphi$  – zmiana fazy.

Technologia interferometrii radarowej była pierwotnie stosowana z pułapu satelitarnego w celu wykrywania obniżeń lub wypiętrzeń występujących na dużych powierzchniowo obszarach terenu. Dzięki tej technologii możliwe jest śledzenie ruchów lodowców, aktywności wulkanów czy też zasięgu niecek obniżeniowych, powstałych na skutek prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej. Pomiar z wykorzystaniem technologii InSAR wykonywane są z rozdzielczością kilku metrów. Obecnie technika interferometrii radarowej jest wykorzysty-

wana w radarach instalowanych na powierzchni ziemi, co umożliwia wykonanie pomiaru z rozdzielczością poniżej jednego metra [IDS 2007, 2008].

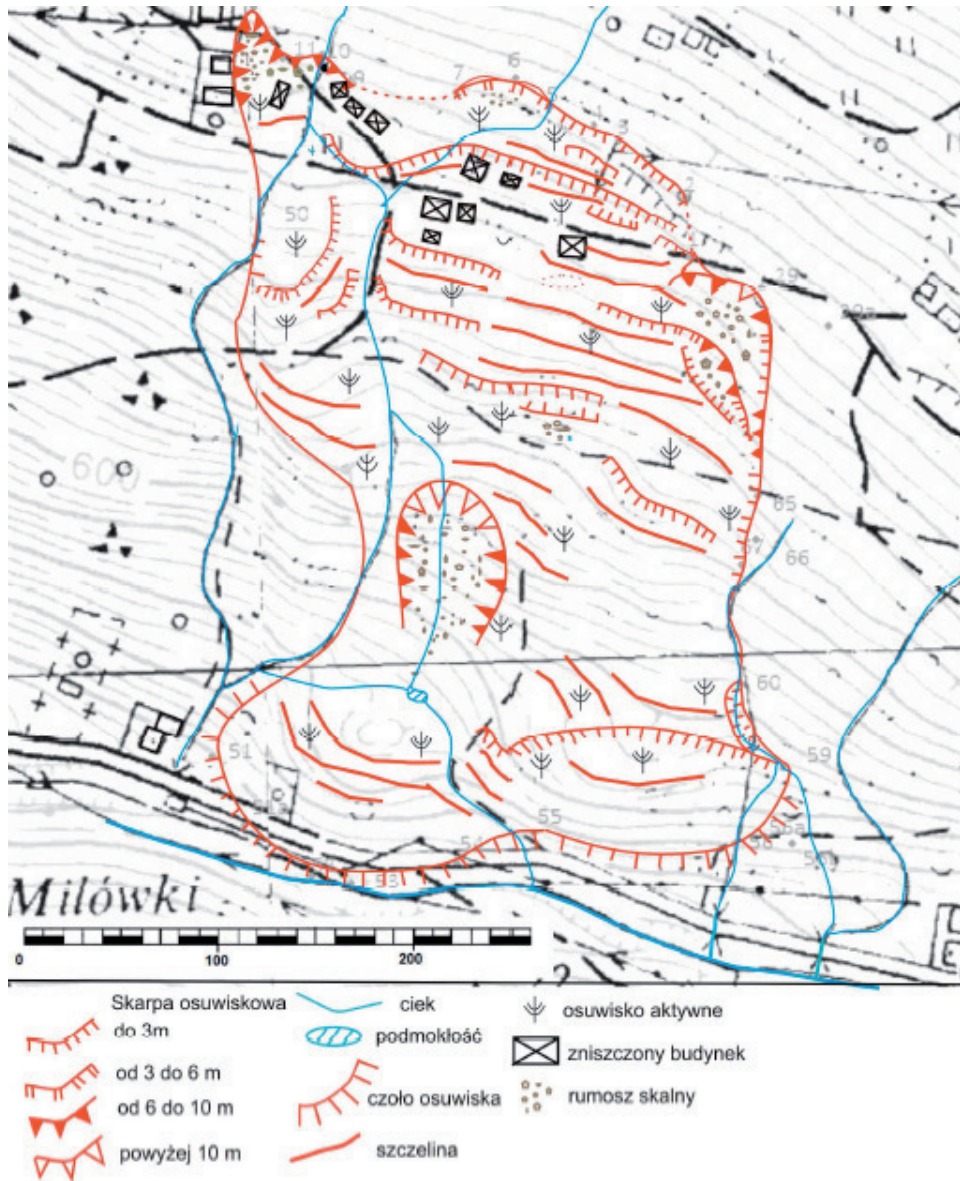
Dokładność wyznaczenia wartości przemieszczenia z wykorzystaniem naziemnej interferometrii radarowej zależy od intensywności powracającego sygnału. Intensywność określana jest parametrem SNR (signal to noise ratio) i wyrażana jest w dB.

Maksymalna odległość od obserwowanego obiektu wynosi 4 kilometry, przy czym w miarę zwiększania odległości dokładność pomiaru maleje. Niższa dokładność występuje również przy słabej zdolności odbijania fal przez obserwowany obiekt. Można temu zaradzić poprzez instalowanie reflektorów odbijających w miejscach, których przemieszczenie powinno być wyznaczone z największą precyzją. Sztuczne reflektory powinny być również zamontowane w miejscach uznawanych za nieruchome w celu wprowadzania poprawek atmosferycznych, przy pomiarach o wysokiej precyzji. W takich przypadkach ewentualne przemieszczenia wykazane dla zamontowanych reflektorów uznaje się za równe zeru, co automatycznie powoduje wprowadzenie redukcji do wszystkich pozostałych, wyznaczonych przemieszczeń.

### **CHARAKTERYSTYKA BADANEGO OBIEKTU**

Naturalne osuwisko objęte monitoringiem z wykorzystaniem naziemnej interferometrii radarowej położone jest na terenie Karpat fliszowych w miejscowości Milówka (rys. 2).

Najnowsze odkucie mas koluwalnych nastąpiło w sierpniu 2010 roku po długotrwałych, obfitych opadach deszczu. Osuwisko zajmuje powierzchnię 11 ha, a jego rozpiętość pionowa wynosi 117 metrów. W obrębie całego osuwiska występują szczeliny, które świadczą o jego aktywności. Skarpa główna ma maksymalną wysokość 7 metrów, a pozostałe, liczne skarpy wtórne w górnej, środkowej i dolnej części mają wysokości od 0.5 do 11 metrów. Na terenie kolumium występują liczne spękania podłużne i poprzeczne gruntu o długościach do 25 metrów. Czoło osuwiska o wysokości 15 metrów zeszło do granicy potoku Salamonka i drogi asfaltowej w dolnej części stoku, odcinając tym samym jedyne dojazdy do gospodarstw położonych na wschód od osuwiska, w Kolonii Prusów. W wyniku uaktywnienia się osuwiska uszkodzone zostały cztery budynki mieszkalne oraz pięć gospodarczych, a ponadto nieprzejezdne stały się wszystkie drogi gruntowe stanowiące dojazdy do gospodarstw położonych zarówno na zboczu osuwiska, jak i poza nim, po jego wschodniej stronie. Osuwisko, nadal aktywne stwarza zagrożenie dla czterech kolejnych budynków, infrastruktury komunikacyjnej i linii przesyłowych [Kupka, Kozłowski 2011].



**Rysunek 2.** Osuwisko w Milówce (źródło: Kupka , Kozłowski 2011)  
**Figure 2.** Landslide in Milówka

## **POMIARY Z WYKORZYSTANIEM NAZIEMNEGO RADARU INTERFEROMETRYCZNEGO**

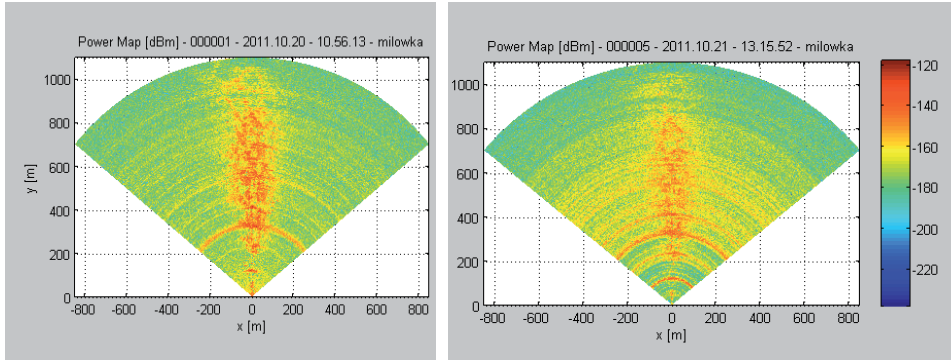
Na stoku, po przeciwnej stronie osuwiska, na specjalnie do tego celu wybudowanym betonowym postumencie, ustawiany jest radar interferometryczny, którego położenie odtwarzane jest w kolejnych seriach pomiarowych poprzez zastosowanie konstrukcji będącej analogią do centrowania wymuszonego w pomiarach z wykorzystaniem klasycznego sprzętu geodezyjnego (rys. 3).



**Rysunek 3.** Radar IBIS L podczas pomiaru osuwiska w Milówce  
(źródło: opracowanie własne)

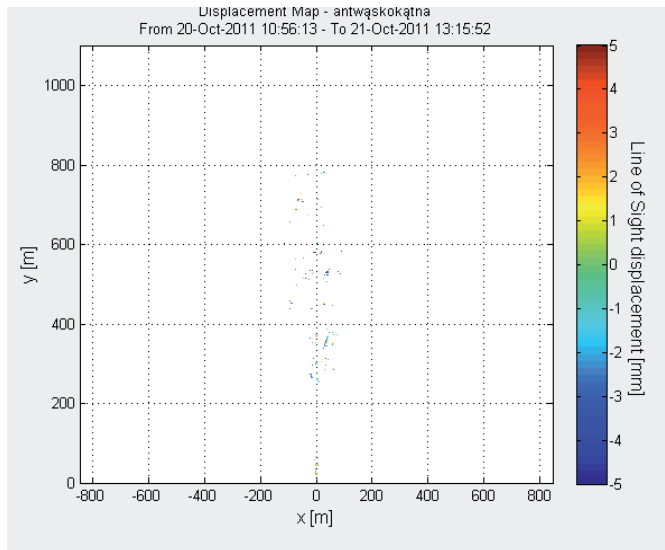
**Figure 3.** Radar IBIS L during landslide monitoring in Milówka

W dniach 20 i 21 października 2011 roku wykonano łącznie 10 serii pomiarowych z wykorzystaniem naziemnego radaru interferometrycznego IBIS L. Każdorazowym rezultatem pomiaru były mapy ilustrujące moc odbicia sygnału od poszczególnych fragmentów monitorowanej powierzchni (power map) (rys 4).



**Rysunek 4.** Mapa siły odbicia sygnału w serii I i serii X. Osuwisko w Milówce.  
(źródło-opracowanie własne w programie IBIS DV)

**Figure 4.** Power map in Ist and Xth series. Landslide Milówka



**Rysunek 5.** Mapa przemieszczeń punktów osuwiska w Milówce uzyskana na podstawie dwóch pomiarów z wykorzystaniem radaru IBIS L  
(źródło-opracowanie własne w programie IBIS DV)

**Figure 5.** Displacement map of landslide's points in Milówka generated on the basis of two measurements using radar IBIS L



## WNIOSKI

Mapy przedstawiane są w układzie kartezyjskim, którego oś x jest zgodna z kierunkiem osi szyny, po której porusza się radar, a oś y jest do niej prostopadła w punkcie stanowiącym wyjściową pozycję radaru podczas wykonywania pomiaru. Bezpośrednio w terenie uzyskano również mapy przemieszczeń dla obszaru całego osuwiska wyznaczone względem pomiaru w serii I. Na podstawie dwóch punktów uznanych za stałe, zastabilizowanych w formie reflektorów, poza osuwiskiem, przy pomocy dostępnego oprogramowania (IBIS DV) dokonano korekty zmiennych warunków atmosferycznych, uzyskując ostatecznie mapę przemieszczeń występujących w ciągu 25 godzin (rys. 5). Dla obszaru całego osuwiska zarejestrowano zmiany położenia nielicznych pikseli terenowych o wartościach do 4 mm, a na pozostałym obszarze stwierdzono jego stabilność. Pomiaru wykonane w kolejnych seriach pozwolą na określenie wartości przemieszczeń powierzchni osuwiska w dłuższym okresie czasu.

Technologia naziemnej interferometrii radarowej pozwala na wykonanie pomiaru w sposób zdalny oraz uzyskanie wartości występujących przemieszczeń w czasie rzeczywistym z dokładnością milimetrową.

Pomiar, w wyniku którego uzyskuje się mapę przemieszczeń dla omawianego, 11 hektarowego osuwiska, jest wykonywany przez kilkanaście minut, co w porównaniu z technologiami klasycznymi jest milowym krokiem naprzód w ekonomice pomiarów. Nowatorskim rozwiązaniem jest również uzyskanie obrazu przemieszczeń w formie pikseli, których barwa oznacza daną wartość przemieszczenia. Piksele pokrywają cały monitorowany teren, co eliminuje niedoskonałości klasycznych metod, których wyniki odnoszą się do konkretnych, wybranych i zastabilizowanych punktów.

Obserwacje prowadzone przy wykorzystaniu radaru interferometrycznego wykonywane są bezobsługowo. Wymagane jest jedynie odpowiednie skonfigurowanie instrumentu przed rozpoczęciem pomiarów.

Ze względu na swoje walory, technologia naziemnej interferometrii radarowej z pewnością powinna znaleźć swoje zastosowanie nie tylko w monitoringu powolnych przemieszczeń występujących na terenach osuwisk ale również różnego rodzaju obiektów budowlanych o szczególnym znaczeniu, takich jak zapory wodne, skarpy drogowe, obwałowania itp.

## BIBLIOGRAFIA

- Cała M., *Osuwiska w Polsce i na świecie* NBI, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, Maj-Czerwiec, 2009
- Grabowski D., Rączkowski W., *Geozagrożenia w Polsce – osuwiska*, Państwowy Instytut Geologiczny, Kraków, 2007
- IDS Ingegneria dei Sistemi S.p.A.: *IBIS-S system. User Manual*. Pisa, 2007, 34ss.
- IDS Ingegneria dei Sistemi S.p.A.: *IBIS-L Controller. User Manual*. Pisa, 2008, 50ss.

Kupka D., Kozłowski S., *Karta dokumentacyjna osuwiska*. Dokument niepublikowany. Milówka, Data wypełnienia 10.05.2011, 8ss.

Szafarczyk A., Kwartnik-Pruc A. *The concept of an integrated monitoring system for surface mass dislocations using terrestrial radar interferometry*. Geomatics and environmental engineering. Cracow, 2010, 173 str.

Wójcik A., *Kartografia geologiczna osuwisk*, Państwowy Instytut Geologiczny, 2010

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy NN524 465839

Dr inż. Anna Szafarczyk  
szafarcz@agh.edu.pl

Katedra Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa  
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
Al. A. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków  
tel. 012 617 22 56