

Rozważania nad dokładnością zobrażeń radarowych satelity Sentinel-1A wykorzystanych na terenach górniczych

Evaluation of the Sentinel-1A radar interferometry accuracy applied in mining areas



*Mgr inż. Wojciech T. Witkowski**



*Dr hab. inż. Agnieszka Malinowska**



*Prof. dr hab. inż. Ryszard Hejmanowski**

Treść: Dwuletni okres najnowszej misji satelitarnej Europejskiej Agencji Kosmicznej pozwala na dokonanie pierwszych, głębszych analiz możliwości zastosowania zobrażeń radarowych dla celów wyznaczania przemieszczeń pionowych na terenach przekształconych. Satelita Sentinel-1A daje możliwości prowadzenia takich analiz w cyklu 12-dniowym. W artykule dokonano obszernego wprowadzenia w technologiczne aspekty przetwarzania satelitarnych zobrażeń radarowych. Następnie dokonano analizy okresowych zmian wysokościowych powierzchni terenu w latach 2015-2016 na terenie górniczym jednej z polskich kopalń głębinowych na bazie technologii DInSAR. Wykazano przydatność omawianej metodyki, jej względną wysoką dokładność w porównaniu z klasyczną niwelacją techniczną. Omówiono również ograniczenia prezentowanej metodyki, podając kierunki przyszłych badań w tym zakresie.

Abstract: The two-year period of the latest satellite mission of the European Space Agency provided images that support the analysis of ground vertical displacement in mining areas. Satellite Sentinel-1A gives the possibility to carry out such an investigation in the cycle of 12 days. In this paper a comprehensive introduction to the technological aspects of the processing of satellite images has been presented. The essential research was focused on the analysis of periodic vertical movements of the terrain surface located above underground mining operation from 2015 to 2016. The SAR images processing was performed based on DInSAR method. The research confirmed relative high accuracy of vertical points movement observed based on SAR images in comparison with the classical leveling. Not only high effectiveness of the presented method has been proved, but also limitation of that solution has been discussed. The authors summarize their achievement by giving directions for future research in this area.

Słowa kluczowe:

InSAR, Sentinel-1A, przemieszczenia pionowe powierzchni, geodezja, miernictwo górnicze

Key words:

InSAR, Sentinel-1A, surface subsidence, geodesy, mine surveying

1. Wprowadzenie

Od początku lat 90. XX w. na świecie wdrażane są radarowe technologie satelitarne służące zdalnemu wyznaczaniu przemieszczeń (zwłaszcza pionowych) powierzchni Ziemi. Kilka misji satelitarnych (m.in. ERS, Envisat, Radarsat, TerraSAR-X) pozwoliło stosunkowo dobrze poznać ich zalety i ograniczenia. Niektóre z tych misji nadal trwają. Na przestrzeni lat potwierdziła się niezwykle wysoka dokładność w odniesieniu do analiz zmian wysokości powierzchni, przy

pewnych problemach związanych z pokryciem, spójnością, rozdzielczością, a przede wszystkim ze stosunkowo wysokimi kosztami pozyskania zobrażeń satelitarnych. Należy jednak podkreślić, że jest to jedyna praktycznie technologia, która obecnie pozwala w sposób zdalny, wiarygodny i niezależny wyznaczać zmiany wysokościowe znacznych powierzchni terenu (Shanker, Zebker 2007). Najnowsza misja Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) związana z satelitami Sentinel-1A i 1B pozwala na spory optymizm, gdyż te zobrażenia satelitarne są bezpłatne i ogólnie dostępne. Pozwoli to ograniczyć dotychczasowy monopol specjalistycznych firm w zakresie pozyskania, archiwizacji i opracowania radarogramów

*) AGH w Krakowie

dla celów wyznaczania przemieszczeń i ochrony terenów przekształconych. Warto zatem dbać o rozpowszechnienie informacji dotyczących misji Sentinel, zwłaszcza w kręgach zawodowych geodetów górniczych, którzy w pewnych przypadkach, w warunkach ograniczonych możliwości prowadzenia naziemnego monitoringu przemieszczeń mogą wdrażać tę zdalną technologię. Niniejszy artykuł stanowi obszerne wprowadzenie w szczegóły przetwarzania sygnałów radarowych Sentinel-1A, pokazując na konkretnym przykładzie dokładność uzyskiwaną w stosunku do naziemnej niwelacji klasycznej. Dotychczasowe badania w zakresie zastosowania radarogramów misji Sentinel świadczą o jej przydatności do wyznaczania przemieszczeń pionowych terenów górniczych zarówno w Polsce (Mirek 2015), jak i na świecie (Crosetto i in. 2016, Sowter i in. 2016). Jednak należy być świadomym sporych ograniczeń, a także systematycznych błędów metody. W artykule wskazano np. na problem tego typu przeszacowań różnic wysokości wskutek nieuwzględnionych wpływów ruchów poziomych terenu. Oszacowano ich względny udział w wyznaczonych obniżeniach, zwracając uwagę na ich znaczenie głównie w rejonach czynnych i dużych pól eksploatacyjnych. Korekta tych błędów będzie przedmiotem dalszych badań.

2. Charakterystyka programu Sentinel-1

Europejska Agencja Kosmiczna (ESA) rozwija nową rodzinę satelitów *Sentinel* w ramach programu *Copernicus*. Pierwszy satelita Sentinel-1A (S-1A) został włączony w kwietniu 2014 roku, osiągając docelową orbitę 7 sierpnia 2014 roku. Dwa lata później, w kwietniu 2016 roku bliźniaczy satelita Sentinel-1B (S-1B) dołączył do wcześniejszej misji. Na pokładach zamontowane zostały systemy SAR (*Synthetic Aperture Radar*) pozwalające na dostarczanie danych do monitorowania ruchów powierzchni terenu (SUHET ... 2013). Częstotliwość obrazowań w odniesieniu do wcześniejszych misji ESA została zmniejszona z 35 dni w przypadku satelitów *ERS-1* oraz *ERS-2* lub 30/35 dni w przypadku satelitów *ENVISAT*, do 12 dni dla satelity S-1A. Wykorzystanie danych z satelity S-1B skraca cykl obrazowań do 6 dni. Dla obszaru Polski dane z satelity S-1B dostępne są dopiero od 27 września 2016 roku. Zamontowane instrumenty SAR na satelitach S-1A oraz S-1B pracują w paśmie C o częstotliwości 5.405 GHz (Yague-Martinez i in. 2016). Wykorzystują cztery tryby skanowania różniące się rozdzielczością oraz zasięgiem:

- Strip Map (*SM*);
- Interferometric Wide Swath Mode (*IW*);
- Extra Wide Swath Mode (*EW*);
- Wave (*WV*).

Możliwe potencjalne pokrycie trybem IW prezentuje rys. 1. W rejonie Europy stosowany jest tryb IW z trzema pasami obserwacji skanowany techniką *Terrain Observation by Progressive Scans (TOPS)*. Daje on pokrycie o szerokości 250 km i rozdzielczości piksela 5m x 20m. Zasadniczą różnicą, w odniesieniu do stosowanych dotychczas w satelitach ERS oraz ENVISAT Europejskiej Agencji Kosmicznej rozwiązań, jest wprowadzenie ruchomego elementu skanującego na satelitach S-1A oraz S-1B (rys. 2). Satelita, przemieszczając się nad terenem po orbicie polarnej, wykonuje rejestracje w trzech pasach (Sub-Swath) i jednocześnie w każdym z pasów wykonuje skanowanie w 9 seriach (Burst). W ten sposób uzyskiwany jest pojedynczy obraz radarowy składający się z 27 elementów [(3xSub-Swaths)x(9xBursts)=27]. Sposób działania techniki TOPS pokazano schematycznie na rysunku nr 2. Zastosowane rozwiązanie pozwala na zobrazowanie większej powierzchni w czasie jednego przelotu, ale jednocześnie wymaga aplikacji nowych algorytmów w obróbce danych. Tryb TOPS był wcześniej implementowany eksperymentalnie w satelitach TerraSAR-X oraz RADARSAT-2 (Yague-Martinez i in. 2016).

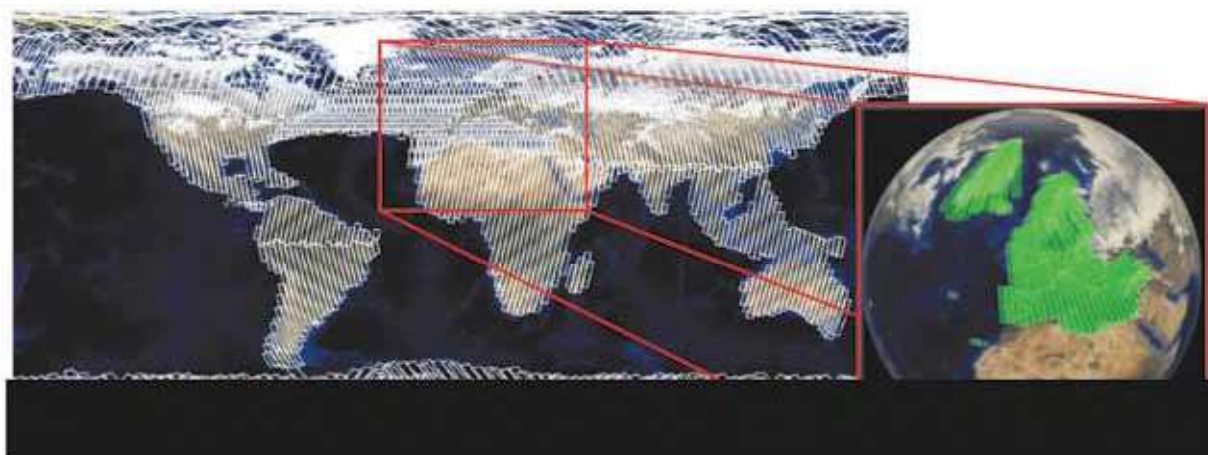
Informacje z satelitów Sentinel dostępne są w postaci trzech typów produktów zależnych od stopnia przetworzenia:

- Level-0 - surowe dane pochodzące bezpośrednio z satelity;
- Level-1 - przetworzone informacje w oparciu o dane z poziomu 0 i zapisane w formatach Single Look Complex (SLC) lub Ground Range Detected (GRD);
- Level-2 - również tworzony na podstawie danych z poziomu 0 nazywane Ocean products (OCN).

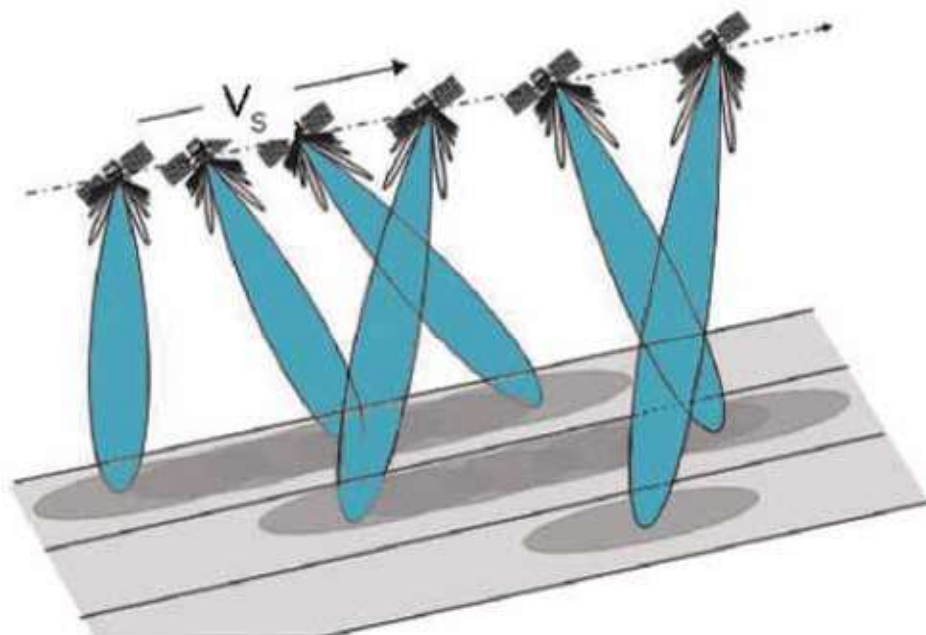
Dla celów interferometrii radarowej najużyteczniejszym z produktów jest Level-1 w postaci obrazu SLC. Tabela 1 prezentuje podstawowe informacje związane z obrazem SLC uzyskiwanym w trybie Interferometric Wide Swath Mode (IW). Na terenie Polski dostępne są obrazowania w trybie IW z zastosowaną techniką skanowania *Terrain Observation by Progressive Scans (TOPS)*.

3. Obróbka obrazowań satelity Sentinel-1

Procedura związana z obróbką zdjęć z trybu TOPS zbliżona jest w swojej istocie do dotychczasowych rozwiązań



Rys. 1. Możliwe potencjalne pokrycie satelity Sentinel-1 w trybie IW z częstotliwością 6 dni (SUHET ... 2013)
Fig. 1. Potential possibility of Sentinel-1 coverage once every 6 days (SUHET ... 2013)



Rys. 2. Idea pracy w trybie IW TOPSAR satelitów Sentinel-1 (SUHET ... 2013)

Fig. 2. The idea of operation in satellites Sentinel-1 in IW TOPSAR mode (SUHET ... 2013)

Tabela 1. Podstawowe informacje dotyczące produktu SLC w trybie Interferometric Wide Swath Mode (IW) (SUHET ... 2013, Yague-Martinez i in. 2016)

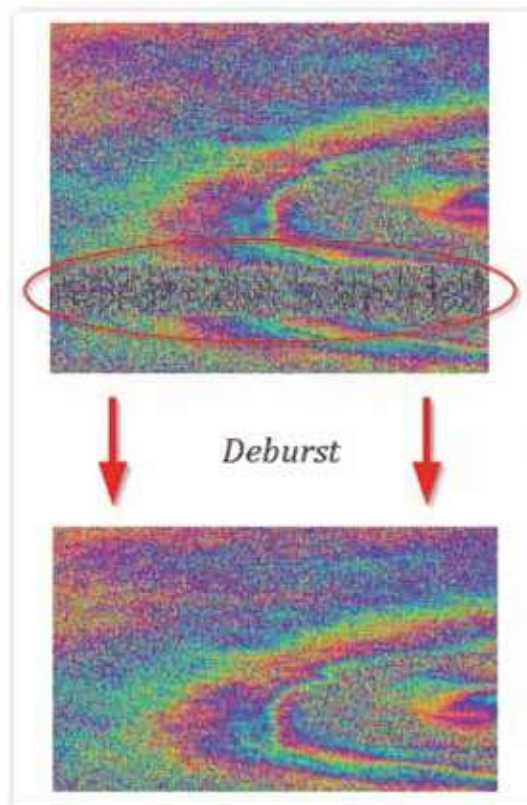
Table 1. Basic information according to the product SLC in the mode Interferometric Wide Swath Mode (IW) (SUHET ... 2013, Yague-Martinez i in. 2016)

Charakterystyka	Wartość
Szerokość zobrazowania	250 km
Kąt zobrazowania	29.1°-46.0°
Ilość pasów	3
Długość „burst”	2.75s ≈ 20km
Częstotliwość zobrazowania	12 dni
Długość fali	5.547 cm
Polaryzacja	podwójna HH+HV, VV+VH pojedyncza HH, VV

stosowanych dla satelitów takich jak np. ERS, ENVISAT. Z uwagi jednak na odmienny sposób obrazowania terenu w trybie IW konieczne jest wprowadzenie kilku zmian w procedurze uzyskiwania interferogramu. Uzyskanie właściwego obrazu interferometrycznego stanowi podstawę do stosowania takich metod interferometrycznych jak metoda różnicowa (DInSAR), metoda stabilnych rozpraszaczy (PSInSAR), metoda małych baz (SBAS) czy ich kombinacji. W poniższym rozdziale scharakteryzowano procedurę obliczeniową metody obrazowania Terrain Observation by Progressive Scans (TOPS) ze wskazaniem na różnice względem wcześniejszych rozwiązań.

Pierwszym krokiem w procesie obliczeń interferometrycznych jest wyselekcjonowanie odpowiednich zobrazowań. Dane z misji Sentinel dostępne są on-line za pośrednictwem przygotowanego serwera Sentinel Data Hub programu Copernicus. Po wymaganej rejestracji użytkownika możliwe jest przeglądanie i pobranie wybranego produktu misji. Zobrazowania dostępne są w formacie TIFF z dodatkowymi informacjami w plikach eXtensible Markup Language (XML). Jeden skompresowany obraz z trybu IW w formie produktu SLC zajmuje około 4 GB pamięci. Dodatkowymi informacjami koniecznymi do obliczeń są dane o orbitach precyzyjnych, które można pobrać również z serwera programu. Dane te są

generowane w ilości jeden plik na dzień i dostarczane 20 dni po zobrazowaniu. Z pobranych zdjęć radarowych możliwe jest wybranie fragmentu danych do dalszej pracy. Po obliczeniu interferogramu konieczny jest dodatkowy krok tzw. deburst. Polega on na połączeniu wszystkich osobnych części interferogramu w jedną całość. Widoczne linie podziału poszczególnych części obrazu zostają usunięte (rys. 3).



Rys. 3. Efekt złożenia dwóch fragmentów (bursts) obrazu Sentinel-1 w trybie IW

Fig. 3. Effect of matching two parts of the Sentinel-1 image in the IW mode

Obserwowana różnica faz ($\Delta\phi$) dwóch zdjęć radarowych składa się z (SUHET ... 2013):

$$\Delta\phi = \Delta\phi_f + \Delta\phi_{el} + \Delta\phi_{disp} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_n$$

gdzie:

$\Delta\phi_f$ – część fazy wynikająca z krzywizny Ziemi, zredukowana w obliczeniach,

$\Delta\phi_{el}$ – część fazy wynikająca z topografii terenu, zredukowana w obliczeniach,

$\Delta\phi_{disp}$ – część fazy odpowiadająca za deformacje powierzchni,

$\Delta\phi_{atm}$ – wartość wynikająca z wpływu atmosfery (wilgotność, temperatura, ciśnienie),

ϕ_n – szum.

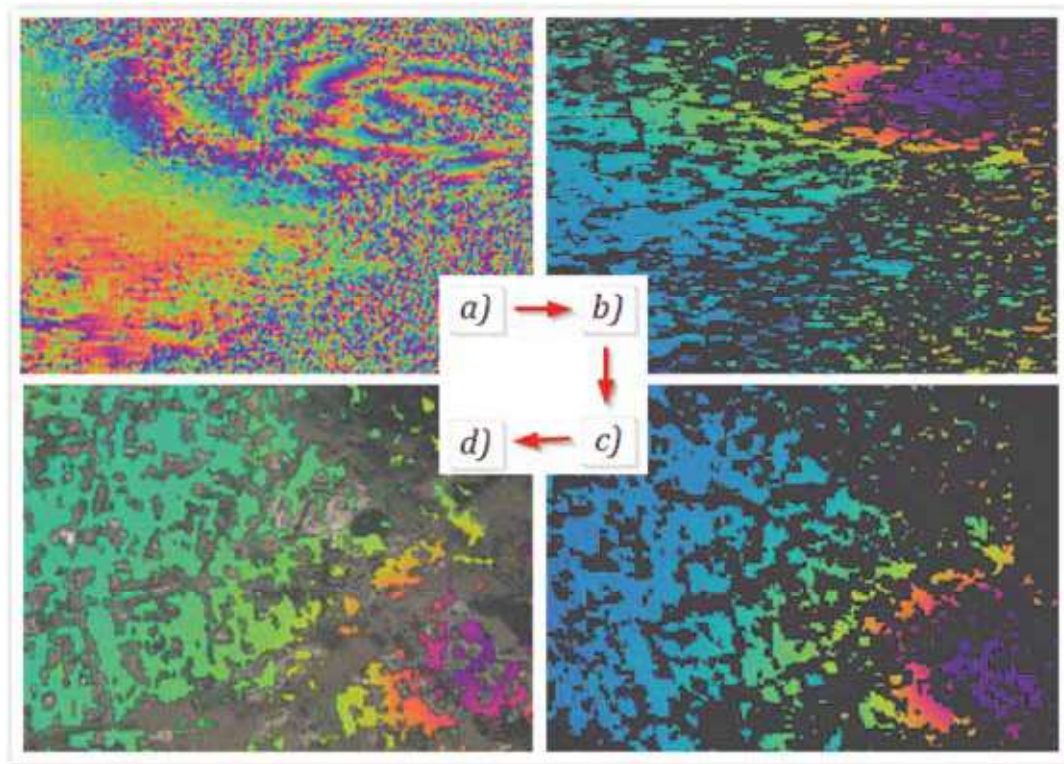
Najistotniejszą składową z punktu widzenia przemieszczeń powierzchni terenu jest część fazy oznaczona $\Delta\phi_{disp}$, którą można uzyskać stosując technikę Differential Interferometric (DInSAR). W kolejnym rozdziale zaprezentowano wyniki przykładowych analiz interferometrycznych porównanych z pomiarami niwelacyjnymi.

4. Rezultaty i dyskusja wyników

W analizach wykorzystano dwa zobrazenia z okresu 2015-2016 satelity Sentinel-1A. Wybór zobrażeń związany był z interwałem pomiarów niwelacyjnych w terenie. Główne informacje o zależnościach przestrzennych i czasowych zobrażeń zaprezentowane zostały w tabeli 2. W tym zestawieniu korzystna jest krótka baza prostopadła (Bperp), która zwiększa wartość spodziewanej koherencji. Duża rozdzielczość czasowa (Btemp) wpływa z kolei niekorzystnie na spodziewane rezultaty. Wypadkową tych wielkości jest modelowana koherencja o wartości 0.63 dla dwóch analizowanych zobrażeń.

Przeprowadzenie obliczeń celem uzyskania interferogramu różnicowego (DInSAR) odbyło się z zastosowaniem programu SNAP. Jest to narzędzie rozwijane i udostępniane przez ESA. Fragment uzyskanego interferogramu różnicowego zaprezentowano na rysunku 4 a). Widoczne prążki interferometryczne wskazują na ruchy powierzchni terenu. Pełne przejście między barwami odpowiada za pełną zmianę długości fali. Obserwowana zmiana na powierzchni terenu zapisana jest w pikselach rastra w postaci liczb z zakresu $(0; 2\pi)$ (*wrapped phase*). Ta zwinięta faza może zostać przeliczona na wartości $(0; 2\pi \cdot n)$, co w sposób schematyczny pokazano na rys. 5. Proces ten nazywany jest rozwinięciem fazy (*unwrapped phase*). Jest to kluczowy moment w analizach interferometrycznych (Chang, Hanssen 2016, Hanssen 2001). W analizowanym przykładzie dla dwóch zobrażeń Sentinel-1A z jednego z polskich rejonów eksploatacji górniczej, efekt rozwinięcia fazy pokazano na rysunku nr 4 b). Dodatkowo wykorzystano informację o koherencji obrazu tworząc maskę z progową wartością na poziomie 0.40. Piksele o mniejszej koherencji zostały odrzucone z dalszych analiz.

Interpretacja tak uzyskanych wyników pozwala jedynie potwierdzić ruchy powierzchni terenu oraz określić przybliżoną skalę tych zmian, ponieważ różnica fazy rejestrowana jest w kierunku obrazowania satelity (Line of Sight - LOS) oraz zależy od kąta padania fali (*incidence angle*). Zatem możliwość porównania wyników interferometrycznych z danymi pomiarowymi wymaga uwzględnienia tych aspektów (Hanssen 2001). Przeliczone wartości fazy na wartości ruchów pionowych oraz zapis rastra w zdefiniowanym układzie odniesienia zaprezentowano na rysunku nr 4 c). Tak uzyskane wyniki mogą być wyeksportowane do programów np. GIS-owych celem dalszej interpretacji.



Rys. 4. Etapy przejścia od interferogramu do wartości ruchów pionowych: a) prążki interferometryczne jako efekt pracy na dwóch zobrazeniach Sentinel-1A, b) rozwinięta różnica faz, c) obliczenie pionowych ruchów powierzchni terenu i przejście z układu zdjęcia do układu WGS-84, d) wizualizacja wyników w przeglądarce internetowej

Fig. 4. Stage of work from the interferogram to vertical movements: a) interferometric stripes from the Sentinel-1A acquisitions, b) phase unwrapped, c) calculation of the vertical movement and transformation to the WGS-84 system, d) visualization of the results in a web browser

Tabela 2. Informacje o wykorzystanych zobrazeniach misji Sentinel-1A

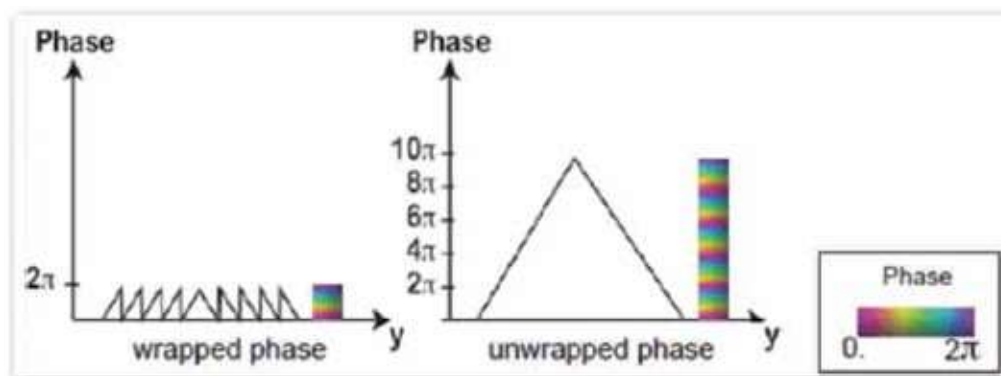
Table 2. Information about the radar acquisitions of Sentinel 1-A

Numer	Bperp [m]	Btemp [dni]	Modelowana koherencja	Typ
20150514	0	0	1.00	Master
20160520	44	372	0.63	Slave

W analizowanym rejonie były również wykonywane pomiary niwelacyjne. Lokalizacja punktów pomiarowych została porównana z rastrem różnic wysokości uzyskanym z satelity Sentinel-1A. W prezentowanym wyniku obliczeń interferometrycznych widoczne są braki w danych (rys. 4). Wynikają one ze słabej koherencji w terenach zielonych, takich jak parki, pola czy lasy. Z kolei wyższa spójność informacji na interferogramie związana jest z terenami zurbanizowanymi (budynki, drogi, place). Tam też uzyskano wyniki z obliczeń interferometrycznych. Porównanie wyników badań satelitarnych z pomiarem niwelacyjnym możliwy był zatem w ograniczonym obszarze. Z całej sieci obserwacyjnej wybrano te punkty, które znalazły się w obrębie pikseli rastra

interferometrycznego o koherencji większej od 0.40. Różnica odpowiednich wartości przemieszczenia pionowego została wyliczona w postaci błędu względnego. Rozkład uzyskanych błędów charakteryzuje się wyraźnym trendem. Widoczne jest przejście od strefy przeszacowania wartości przemieszczenia pionowego (maksymalny uzyskany błąd wynosi +7%) do strefy niedoszacowania (maksymalny błąd wyniósł -6%) (rys. 6). Może to być związane z przemieszczeniami poziomymi, które towarzyszą rozwijającej się eksploatacji górniczej i wpływają na wyznaczaną interferometrycznie wartość ruchów pionowych (Samieie-Esfahany i in. 2010). Efektu tego nie zredukowano jednak w obecnej fazie badań.

Podsumowując, trzeba stwierdzić, że radarogramy pozyskiwane w ramach misji Sentinel-1A pozwalają na opracowywanie analiz zmian wysokości na terenach aktualnej, bądź zakończonej eksploatacji górniczej. W tym sensie nadawać się mogą także do oceny ewentualnych wypiętrzeń powierzchni terenu w rejonach zlikwidowanych kopalń głębinowych i odtwarzającego się zasobu wód w górotworze. Istotną barierą jest kwestia pokrycia powierzchni. W rejonach rolniczych i leśnych technologia ta nie spełni swojej roli, a raczej będzie skuteczna jedynie punktowo, co mocno ograniczy jej dokładność. Badania przedstawione w artykule wskazują na wysoka



Rys. 5. Idea rozwinięcia fazy (Hanssen 2001)

Fig. 5. The conception of phase unwrapping (Hanssen 2001)



Rys. 6. Porównanie wyników interferometrii radarowej z pomiarami niwelacyjnymi w postaci rozkładu wartości błędów względnego wyrażonego w procentach (%)

Fig. 6. Comparison of the results of radar interferograms with leveling as the distribution of values of the relative errors in percentage (%)

dokładność względną technologii DInSAR, w stosunku do wyników klasycznej niwelacji technicznej o podwyższonej dokładności.

Publikacja powstała w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki nr 2014/13/N/ST10/02845

Literatura

CHANG L., HANSEN R.F. 2016 - A Probabilistic Approach for InSAR, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, t.54, no 1, pp. 421–430.

CROSETTO M., MONSERRAT O., BARRA A., AND CRIPPA B. 2016 – Persistent.

Scatterer Interferometry Using Sentinel-1 Data, <https://www.conftool.pro>
HANSEN, R.F. 2001 - Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2001, ISBN: 0-7923-6945-9.

MIREK K. 2015 - Wykorzystanie metody InSAR do monitorowania osiadania na obszarach górniczych na podstawie danych satelity Sentinel-1A, „Budownictwo Górnicze i Tunelowe”; R. 21, nr 4, s. 13–18.

SAMIEIE-ESFAHANY S., HANSEN R.F., THIENEN-VISSER K. VAN, MUNTENDAM-BOS A. 2010 - On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates, „Proceedings of Fringe 2009 Workshop”, t. 2009.

SHANKER P., ZEBKER H. 2007 - Persistent scatterer selection using maximum likelihood estimation, Geophys. Res. Lett., vol. 34, no. 22, p. L22 301.

SOWTER A., BIN M., AMAT C., CIGNA F., MARSH S., AND ATHAB A. 2016 - International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation Mexico City land subsidence in 2014 – 2015 with Sentinel-1 IW TOPS : Results using the Intermittent SBAS (ISBAS) technique, International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, t.52, pp. 230–242.

SUHET, Sentinel-1 User Handbook, „European Space Agency”, 2013, t.1, pp. 1–80.

YAGUE-MARTINEZ N., PRATS-IRAOLA P., MEMBER S., GONZALEZ F.R., BRCIC R., SHAU R., et al. 2016 - Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data, t.54, no 4, pp. 2220–2234.

Artykuł wpłynął do redakcji – październik 2016
Artykuł zaakceptowano do druku 15.12.2016

NACZELNY REDAKTOR

w zeszycie 1-2/2010 Przeglądu Górniczego, zwrócił się do kadr górniczych z zachętą do publikowania artykułów ukierunkowanych na wywołanie

POLEMIKI – DYSKUSJI.

Trudnych problemów, które czekają na rzetelną, merytoryczną wymianę poglądów – jest wiele! Od niej – w znaczącej mierze – zależy skuteczność praktyki i nauki górniczej w działaniach na rzecz bezpieczeństwa górniczego oraz postępu technicznego i ekonomicznej efektywności eksploatacji złóż.

Od naszego wysiłku w poszukiwaniu najlepszych rozwiązań – zależy przyszłość polskiego górnictwa!!!