

EWOLUCJA TECHNIK INTERFEROMETRII RADAROWEJ-PRZEGLĄD METOD NA PRZYKŁADZIE OPRACOWANIA DANYCH ERS-1/2 SAR

THE EVOLUTION OF RADAR INTERFEROMETRY TECHNIQUES - A REVIEW OF METHODS BASED ON ERS-1/2 DATASET PROCESSING

Magdalena Mleczko, Marek Mróz

Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

SŁOWA KLUCZOWE: interferometria radarowa, ERS-1/2, InSAR, DInSAR, PSInSAR

STRESZCZENIE: Ostatnie lata odznaczają się intensywnym rozwojem technik interferometrii radarowej – sposobu badania ukształtowania powierzchni Ziemi i zachodzących na niej procesów fizycznych. W porównaniu do obrazowania w zakresie "optycznym" (VNIR) rejestracja w pasmie mikrofalowym daje większe możliwości uzyskania informacji bez względu na panujące zachmurzenie. W pracy przedstawiono ewolucję technik interferometrii radarowej, od analizy pojedynczego interferogramu (*InSAR*), przez analizę pary interferogramów, czyli tzw. interferometrię różnicową (*DInSAR*) do analizy zbioru interferogramów (*Stacking Interferometry*). Analiza zbioru interferogramów jest najbardziej zaawansowanym typem różnicowej interferometrii radarowej. Technika ta umożliwia wykrywanie milimetrycznych przemieszczeń gruntu oraz obiektów budowlanych. Możemy do niej zaliczyć podejście *Permanent Scatterer* zaproponowane przez Ferretti i współautorów (Ferretti et al. 2001) oraz podejście *Small Baseline Subset* (SBAS) opisane przez Berardino (Berardino et al. 2002), Lanari (Lanari et al. 2004) oraz Pepe (Pepe et al. 2005). Do analiz w niniejszej pracy wykorzystano zbiór danych ERS-1/2 (pasmo C) z lat 1992-2000. Obszar testowy obejmował rejon Gdańsk. Autorzy wybierając obszar badań kierowali się występującymi w latach 1996-1997 ruchami sejsmicznymi w Zatoce Gdańskiej (Wiejacz 2001) oraz zjawiskiem osiadania terenu, szczególnie na terenie gdańskiej starówki.

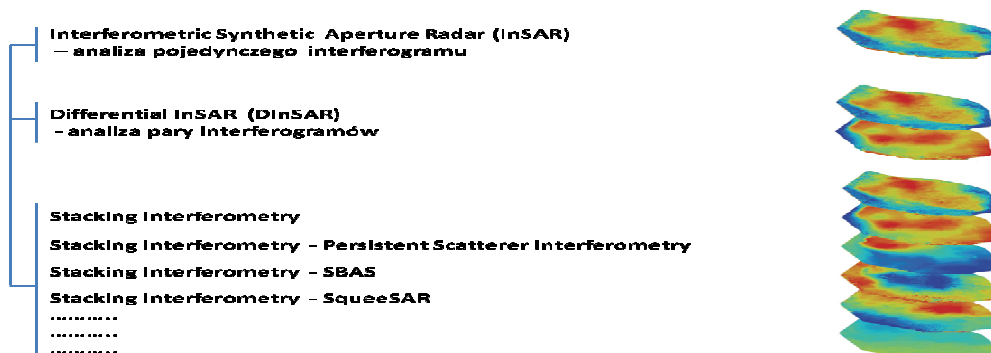
1. WSTĘP

Obraz radarowy to zapis dwóch informacji: jedna to intensywność odbicia fali (amplituda), druga to faza sygnału w momencie dotarcia do odbiornika. W technice interferometrii radarowej wykorzystuje się informacje o fazie odbieranego sygnału, a podstawowym jej produktem jest interferogram. W celu wygenerowania interferogramu należy spełnić warunek zachowania odległości bazowej pomiędzy kolejnymi rejestracjami. Odległość bazowa może odnosić się do interwału dwóch rejestracji lub geometrycznej odległości pomiędzy odbiornikami. W zależności od rodzaju odległości bazowej, a także jej wielkości wyróżniamy kilka podtypów interferometrii. Tabela 1 przedstawia podział metod interferometrii radarowej oraz przykłady jej zastosowania.

Tabela 1. Podział metod interferometrii radarowej

Odległość bazowa	Nazwa	Zastosowanie
$\Delta\theta$	Interferometria poprzeczna (<i>Across-track</i>)	DEM, topografia
Δt - od milisekund do sekund	Interferometria wzdłużna (<i>Along track</i>)	Wykrywanie przemieszczających się obiektów, badania prądów morskich
Δt - dni	Interferometria różnicowa (<i>Differential</i>)	Badania lodowców, wulkanów
Δt - dni do lat	Interferometria różnicowa (<i>Differential</i>)	Badania osiadanie gruntów, ruchów sejsmicznych, aktywności wulkanicznej, przemieszczeń skorupy ziemskiej
Δt - od milisekund do lat	Koherencja (<i>Coherence estimator</i>)	Badanie zmian poziomu wód, klasyfikacja zagospodarowania terenu

W początkowej fazie rozwoju technik interferometrii radarowej analizie poddawany był pojedynczy interferogram. Wyniki interpretacji różnicy fazy dwóch obrazów radarowych dawały jednak jedynie podglądowe wyobrażenie o zachodzących zjawiskach na powierzchni Ziemi. Co więcej analiza pojedynczego interferogramu nie była prostym zadaniem dla osób niebędących specjalistami w tej dziedzinie. W celu identyfikacji przemieszczenia, a następnie oceny ilościowej zjawiska analizowany był interferogram różnicowy (*differential interferogram*), generowany z pary interferogramów. Jednakże wpływ czynników zewnętrznych na dokładność wyników okazał się na tyle znaczny, że pod koniec lat 90-tych pojawiły się metody „próbujące” złagodzić ich efekt poprzez uśrednianie danych z wielu interferogramów tzw. *interferometry stacking*. Rysunek 1 przedstawia podział interferometrii ze względu na ilość analizowanych interferogramów.



Rys. 1. Podział interferometrii ze względu na ilość analizowanych interferogramów (opracowanie własne)

2. OPIS METOD

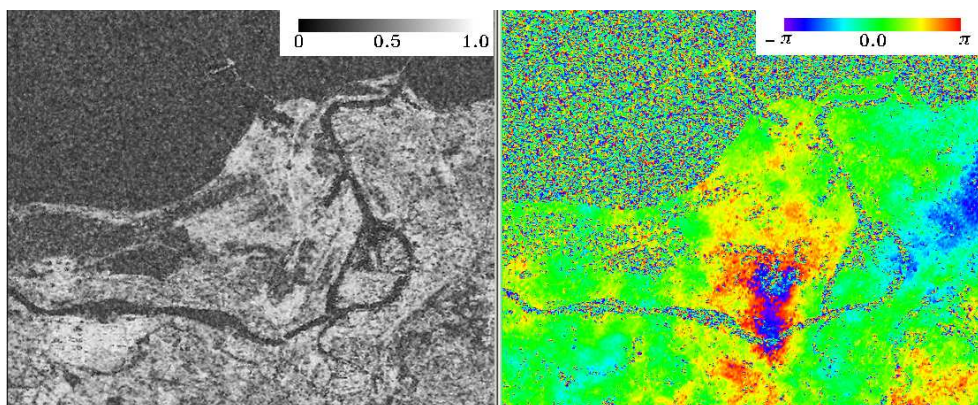
2.1. Analiza pojedynczego interferogramu - Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

W momencie, gdy punkt na powierzchni Ziemi ulega przemieszczeniu, odległość pomiędzy tym punktem a sensorem zmienia się, co oznacza, że zmienia się także wartość rejestrowanej fazy fali. Zmiana fazy fali wyraża się wzorem:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R + \alpha + t + noise \quad (1)$$

gdzie λ - długość fali, ΔR - wartość przemieszczenia, α - przesunięcie fazowe wynikające z wpływu atmosfery, t - przesunięcie fazowe wynikające z ukształtowania terenu, *noise* - pozostałe zakłócenia.

W konsekwencji każde przemieszczenie w kierunku padania wiązki radarowej może być zidentyfikowane poprzez porównanie fazy sygnałów z dwóch obrazów zarejestrowanych w różnym czasie. Generując w ten sposób pojedynczy interferogram otrzymujemy obraz, którego wartości zawierają się w przedziale od $-\pi$ do π . Na obszarach, na których możliwy jest pomiar przemieszczeń widoczne są prążki interferometryczne, co związane jest z występującą w tym miejscu wysoką koherencją (spójnością). Wysoka koherencja występuje wtedy, gdy obiekty nie zmieniają swojej charakterystyki powierzchniowej. Terenami, na których nie występuje koherencja między kolejnymi rejestracjami obrazów mogą być tereny upraw w momencie wzrostu roślin, powierzchnia zbiorników i cieków wodnych. Koherencja jest wskaźnikiem przyjmującym wartości z zakresu od 0 do 1, gdzie 0 oznacza całkowitą niespójność, a 1 całkowitą spójność fazy sygnału. Oszacowanie przybliżonej wartości deformacji polega na pomnożeniu liczby prążków przez połowę długości fali. Rysunek 1 przedstawia przykłady obrazu koherencji i interferogramu wygenerowanych z danych ERS-1/2.



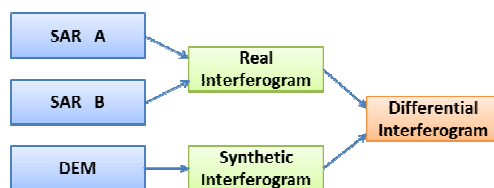
Rys. 2. Obraz koherencji (po lewej), interferogram (po prawej). Obraz "master" ERS-1 z 1995-08-11, obraz "slave" ERS-2 1995-08-12. Obrazy w geometrii "slant range" (opracowanie własne)

2.2. Analiza pary interferogramów – Differential Interferometry (DInSAR)

Odmianą interferometrii radarowej jest interferometria różnicowa (*DInSAR - Differential Interferometry*), której głównym celem jest wykrywanie bardzo małych (cm) ruchów powierzchni Ziemi. Interferogram różnicowy powstaje w wyniku różnicy dwóch interferogramów. W zależności od typu danych wejściowych oraz ich konfiguracji wyróżnia się trzy metody generowania interferogramów różnicowych opisane poniżej (Biegger 1998).

Two-pass interferometry(interferometria dwóch przelotów)

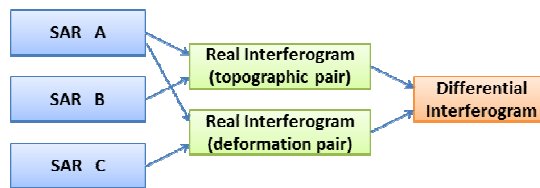
W pierwszej metodzie zwanej *2-pass interferometry* wykorzystuje się interferogram powstały z dwóch obrazów radarowych (*real interferogram*) oraz interferogram syntetyczny (*synthetic interferogram*), tworzony na podstawie DEM (Massonnet et al. 1993). Wartości DEM są konwertowane do postaci fazy oraz przekształcane do układu obrazu radarowego. Jest to najszybsza metoda tworzenia interferogramu różnicowego, gdyż oba interferogramy posiadają tę samą geometrię, co oznacza, że etap korekcji geometrycznej jest pomijany. Wartości interferogramu syntetycznego są zależne jedynie od ukształtowania terenu, natomiast na wartości interferogramu rzeczywistego wpływa również przemieszczenie/deformacja. W celu określenia wielkości przemieszczenia interferogramy są od siebie odejmowane. Rysunek 3 przedstawia schemat tworzenia interferogramu różnicowego metodą *2-pass interferometry*.



Rys. 3. Schemat tworzenia interferogramu metodą *2-pass interferometry* (opracowanie własne)

Three-pass interferometry(Interferometria trzech przelotów)

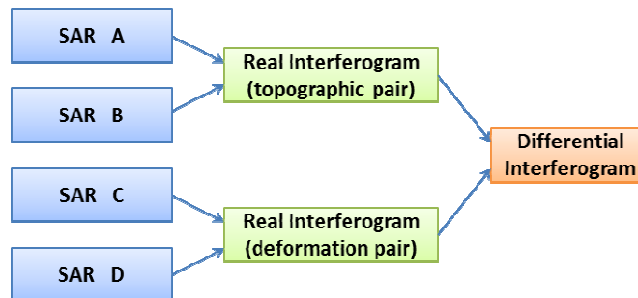
Druga metoda (*three-pass interferometry*) wymaga zastosowania trzech obrazów radarowych bez wykorzystania zewnętrznego numerycznego modelu terenu (Zebker et al. 1994). Generowane są dwa interferogramy rzeczywiste, a ponieważ obrazy są korygowane geometrycznie do jednego wybranego obrazu (*master*), ponowna korekcja interferogramów nie jest potrzebna. Pierwsza para interferometryczna nazywana jest parą topograficzną (*topographic pair*), druga zaś parą deformacji (*deformation pair*). Ze względu na różnice odległości bazowej obu interferogramów niezbędne jest przeskalowanie interferogramu topograficznego do interferogramu deformacji. Rysunek 4 przedstawia schemat tworzenia interferogramu różnicowego metodą *three-pass interferometry*.



Rys. 4. Schemat tworzenia interferogramu różnicowego metodą *three-pass interferometry* (opracowanie własne)

Four-pass interferometry (Interferometria czterech przelotów)

Trzecia metoda *four-pass interferometry* (Hanssen 2002) polega na utworzeniu dwóch niezależnych rzeczywistych interferogramów z czterech obrazów. Tok postępowania jest analogiczny do metody *three-pass* z tą różnicą, że interferogramy wymagają przeprowadzenia ko-rejestracji. Rys 5 przedstawia schemat tworzenia interferogramu różnicowego metodą *4-pass interferometry*.



Rys. 5. Schemat tworzenia interferogramu różnicowego metodą *4-pass interferometry* (opracowanie własne)

W interferometrii różnicowej wzór na fazę różnicową $\Delta\varphi$ (*differential interferometric phase*) przyjmuje postać:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R + \alpha + \varepsilon + noise \quad (2)$$

Ze względu na zastosowanie NMT w procesie generowania interferogramu wpływ ukształtowania terenu jest kompensowany, pozostają jednak błędy wynikające z dokładności NMT (ε). Przyjmując, że błędy wynikające z dokładności NMT oraz poziom szumów (*noise*) jest niski, wzór (2) można uprościć:

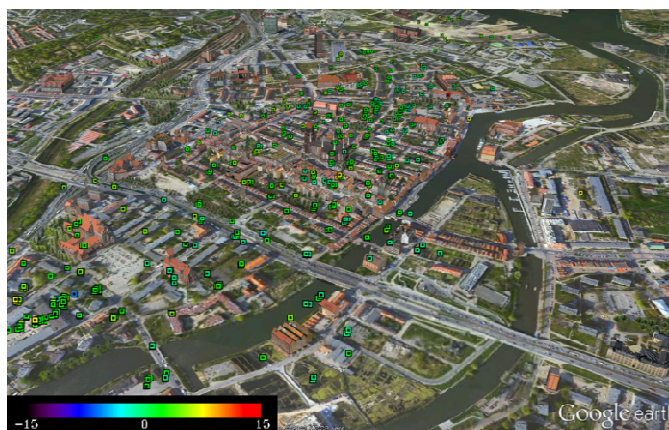
$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R + \alpha \quad (3)$$

W dalszym ciągu pozostaje znaczący wpływ atmosfery (α), którego eliminacja nie jest możliwa.

2.3. Analiza zbioru interferogramów - Stacking Interferometry

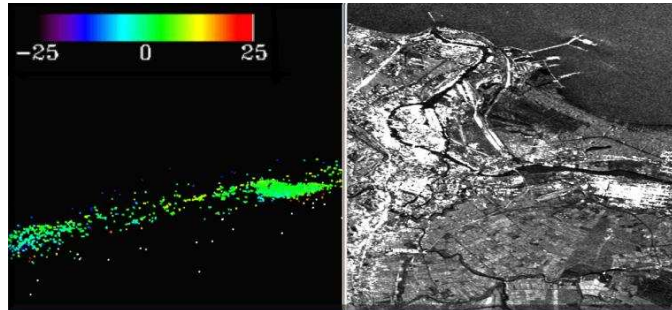
Persistent Scatterer Interferometry (PSI) jest najbardziej zaawansowanym typem różnicowej interferometrii radarowej DInSAR, umożliwia wykrywanie milimetrycznych przemieszczeń gruntu oraz obiektów budowlanych. Przemieszczenia te mogą być spowodowane czynnikami naturalnymi takimi jak aktywność wulkaniczna lub sejsmiczna oraz czynnikami sztucznymi, do których zalicza się na przykład wydobywanie zasobów naturalnych, ekspansję budowlaną oraz naruszenie warstw wodonośnych.

Pierwsze podejście badania przemieszczeń metodą silnych rozpraszaczy zaproponował Ferretti i współautorzy (Ferretti et al. 2001) - metoda *Permanent Scatterer*. Od standardowej techniki *DInSAR* różni się przede wszystkim znacznie większą liczbą wykorzystanych obrazów radarowych (min. 20) oraz implementacją procedur modelujących średnią wielkość przemieszczenia, prędkość zachodzenia deformacji (*deformation velocity*) oraz jej zmienność w czasie (*time series of the deformation*), a także RTE (*residual topographic error*) - różnicę między wysokością punktu uzyskaną z różnicy fazy a wysokością uzyskaną z NMT.



Rys. 6. Wizualizacja wyników metody PS – przemieszczenia mm/rok (zbiór 30 scenERS-1/2). (opracowanie własne)

Kolejne podejście - *Small Baseline Subset* (SBAS) opisali Berardino (Berardino et al. 2002), Lanari (Lanari et al. 2004), Pepe (Pepe et al. 2005). W podejściu SBAS generowany jest zestaw interferogramów jedynie z par obrazów, między którymi występuje mała odległość bazowa (*baseline*). Wymagane jest również zastosowanie większej liczby obrazów radarowych (min 15). Przykład wizualizacji wyników metodą SBAS przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Wizualizacja wyników metody SBAS – obraz przemieszczeń mm/rok na podstawie zbioru 24 scen ERS-1/2 (po lewej), obraz amplitudy ERS-2 19950812 (po prawej) (opracowanie własne)

3. PODSUMOWANIE

W pracy autorzy podjęli się próby krótkiego opisu ewolucji technik interferometrii SAR od analizy pojedynczego interferogramu (*InSAR*), przez analizę pary interferogramów czyli tzw. interferometrię różnicową (*DInSAR*) do analizy zbioru interferogramów (*Stacking Interferometry*) na podstawie własnego opracowania danych ERS SAR SLC.

W przypadku analizy pojedynczego interferogramu uzyskuje się pogładowe wyobrażenie na temat występującego zjawiska deformacji oraz przybliżoną wartości przemieszczenia. Główną barierą w przeprowadzeniu dokładnej analizy na podstawie pojedynczego interferogramu jest brak możliwości wyodrębnienia wpływu atmosfery, wpływu lokalnej topografii oraz efektów dekorelacji na odbierany sygnał. W przypadku interferometrii różnicowej, w wyniku której uzyskuje się większe dokładności niż w wyniku analizy pojedynczego interferogramu, pozostaje wpływ atmosfery, który w dalszym ciągu jest nie do wyeliminowania. Pod koniec lat 90-tych pojawiły się metody „próbujące” złagodzić efekt wpływu atmosfery, poprzez uśrednianie danych z wielu interferogramów. Uśrednienie spowodowało podniesienie stosunku sygnału do szumu SNR (*Signal Noise Ratio*), co w teorii oznacza poprawę jakości wyników. Obecnie stosowane są te najbardziej zaawansowane techniki interferometrii radarowej takie jak *Permanent Scatterer*, SBAS i najnowszej generacji technika *SqueeSAR* opracowana przez zespół z Tele-Rilevamento Europa. Opisana ewolucja technik interferometrii pokazuje, jak od początkowo technologicznie niewyobrażalnej idei pomiaru odległości z orbity satelitarnej do powierzchni Ziemi o dokładności subcentymetrowej, dochodzimy do powtarzalnej, submilimetrowo dokładnej "dynamicznej niwelacji powierzchniowej" na wielotysięcznych zbiorach "reperów" (PS-ach), których położenia a priori nawet dokładnie nie znamy. Limitowana liczba stron niniejszej publikacji sprawia, że wyniki liczbowe prowadzonych prac nie zostały tu zamieszczone.

4. LITERATURA

Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E., 2002 A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE

Transactions on Geoscience and Remote Sensing - IEEE TRANS GEOSCI REMOT SEN , vol. 40, no. 11, pp. 2375-2383.

Biegger S. 1998 Untersuchungen zur Generierung eines DHM's von Kefalonia (Griechenland) mit Multi-Baseline SAR-Interferometrie, Diplomarbeit Geographisches Institut, Universität Zürich.

Ferretti A., Prati C., Rocca F. 2001 Permanent Scatterers in SAR Interferometry, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, vol. 39, no. 1, s. 8-20.

Hanssen R. 2002 Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-6945-9, s. 38-39.

Lanari R., Mora O., Manunta M., Mallorquí J., Berardino P., Sansosti E., 2004 A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing - IEEE TRANS GEOSCI REMOT SEN, vol. 42, no. 7, pp. 1377-1386.

Massonnet, D., Adragna, F. 1993 A full-scale validation of Radar Interferometry with ERS-1: the Landers earthquake. Earth Observation Quarterly, 41.

Pepe A., Sansosti E., Berardino P., Lanari R., 2005 On the Generation of ERS/ENVISAT DInSAR Time-Series Via the SBAS Technique. IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, vol. 2, no. 3, pp. 265-269.

Wiejacz P. Dębski W. 2001. New observations of Gulf of Gdansk seismic events. Physics of the Earth and Planetary Interiors 123, 233–245.

Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M., Gabriel, A., Werner, C. L. 1994 On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake, Journal of Geophysical Research, 99(B10): 19617–19634.

THE EVOLUTION OF RADAR INTERFEROMETRY TECHNIQUES - A REVIEW OF METHODS BASED ON ERS-1/2 DATASET PROCESSING

KEY WORDS: interferometry, ERS-1/2, InSAR, DInSAR, PSInSAR

Summary

The last years are characterized by intensive development of radar interferometry techniques – way to survey the Earth's surface. Radar imaging is more or less dependent on weather condition, so it gives more possibilities to acquire images than optical imaging. This paper presents the evolution of radar interferometry techniques from analysis of single interferogram, then analysis of pair of interferograms- differential interferometry (DInSAR) and finally to analysis of interferogram stacking (Stacking Interferometry). Analysis of stacking interferogram is the most advanced type of differential radar interferometry. This technique enables the detection of millimeter displacement of land and buildings. We can distinguish Permanent Scatterer approach proposed by Ferretti et al (Ferretti et al. 2001) and Small Baseline Subset approach (SBAS) described by Berardino (Berardino et al. 2002), Lanari (Lanari et al. 2004) and Pepe (Pepe et al . 2005). The paper focuses on the use of ERS-1/2 images acquired over the Gdansk (Poland). The authors have chosen this area of interest due to seismic events in the Gulf of Gdansk in 1996-1997 (Wiejacz 2001).

Dane autorów:

Mgr inż. Magdalena Mleczko
e-mail: magdalena.mleczko@uwm.edu.pl
telefon: 89 523 35 49

Dr hab. inż. Marek Mróz
e-mail: marek.mroz@uwm.edu.pl
telefon: 89 523 49 15