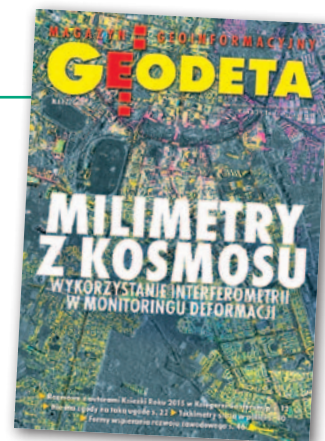




Stolica pod kosmiczną lupą

Czy z orbity okołoziemskiej da się mierzyć deformacje terenu z submilimetrową dokładnością? Trzy polskie podmioty wspólnie chcą nie tylko udowodnić, że to możliwe, ale także wykazać, że taka technologia jest przydatna w praktyce i opłacalna.

Jerzy Królikowski

Ludzkość od wieków zdaje sobie sprawę, że niewidoczne gołym okiem, powolne ruchy terenu mogą doprowadzić do poważnych katastrof: osuwisk, tąpnięć, przzerwania wałów zbiorników wodnych czy katastrof obiektów budowlanych. Problem staje się coraz poważniejszy, bo zarówno nad, jak i pod ziemią budujemy coraz bardziej złożone konstrukcje, które naruszają równowagę podłoża. By chronić życie i zdrowie ludzi oraz ich majątek, pojawia się coraz pilniejsza potrzeba śledzenia tych ruchów, a rozwiązanie tego problemu w oczywisty sposób spoczęło na barkach geodetów. W odpowiedzi na to zapotrzebowanie w ostatnich dekadach rozwinięto wiele różnorodnych metod pomiaru deformacji. Podstawowa to niwelacja precyzyjna – bardzo dokładna, ale równocześnie pracochłonna. Powszechnie stosuje się także tachimetrie, które choć mniej dokładne, to pozwalają wyznaczać również przemieszczenia poziome, a w przypadku zmotoryzowanej wersji mogą śledzić zmiany współrzędnych z wysoką częstotliwością. Ostatnio na popularności zyskuje skanin laserowy, który oferuje bezkonkurencyjną szczegółowość danych. Dodatkową zaletą skanowania naziemnego jest jego wysoka dokładność, a lotniczego – możliwość objęcia nalotem rozległych terenów. Wadą są jednak spore koszty pomiaru oraz pracochłonność przetwarzania danych.

Ten pobieżny przegląd metod pomiarowych pokazuje, że żadna z nich nie jest pozbawiona wad. Wciąż istnieje więc potrzeba rozwijania nowych technologii, które spełnią rosnące oczekiwania odbiorców. Odpowiedzią na to zapotrzebowanie ma być projekt „Zintegrowany system monitoringu deformacji podłoża gruntowego z wykorzystaniem interferometrii radarowej trwałych reflektorów” (DefSAR) realizowany wspólnie przez: Instytut Geodezji i Kartografii (lider konsorcjum), Warszawskie Przedsiębiorstwo Geodezyjne oraz Instytut Techniki Budowlanej. To pierwsze przedsięwzięcie w kraju, w którym zastosowanie metody interferometrii radarowej trwałych reflektorów (PSInSAR – *Permanent Scatterer Interferometry*) będzie miało charakter komercyjny, a i na świecie stosunkowo niewiele instytucji dysponuje tą technologią.

• Trzy filary udanego projektu

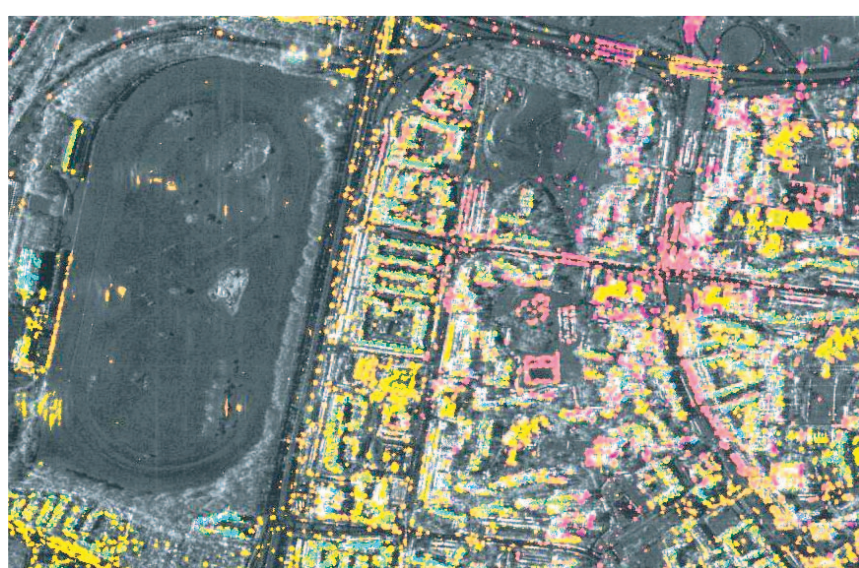
– W pracach Instytutu Geodezji i Kartografii temat deformacji podłoża w Warszawie oraz wykorzystania satelitarnych zobrażeń radarowych jest obecny od wielu lat. Stąd też pomysł użycia PSInSAR do badań deformacji podłoża kiełkował tu od dawna. Prace w tym kierunku nabrały tempa w 2011 r., odkąd rozpoczęłam pracę w IGiK – mówi kierownik Laboratorium Badań Radarowych Centrum Teledetekcji IGiK oraz kierownik projektu DefSAR dr Dariusz Ziółkowski, którego doktorat poświęcony był właśnie inter-

Miasto w ciągłym ruchu

Wydaje się, że położona na płaskim jak stół Mazowszu Warszawa jest kiepskim miejscem do śledzenia deformacji terenu. Nic bardziej mylnego! Ruchów o różnorodnej genezie i charakterze jest tu pod dostatkiem. Obserwowane są one m.in. na ciągnącej się przez całą lewobrzeżną część miasta skarpie Wisły. Jednym z bardziej znanych przykładów jest położony na Starówce zabytkowy kościół św. Anny, na którym co jakiś czas powstają niepokojące spękania. Wiele deformacji wiąże się ponadto z dużymi inwestycjami infrastrukturalnymi – I oraz II linią metra czy kolejnymi wieżowcami, które ingerują w stabilność gruntów oraz zmieniają stosunki wodne. Prace budowlane dodatkowo komplikuje niekorzystna budowa geologiczna stolicy, czego przykładem jest wypełniona gruntami organicznymi tzw. rynna żoliborska. Ruchy obserwuje się ponadto na wzniesionym na powojennych gruzach osiedlu Muranów. Rusza się zresztą cała stolica, a – mówiąc dokładniej – tzw. niecka warszawska, w obrębie której eksploatowane są zasoby wody oligoceńskiej. Jak wykazały badania IGiK-u z lat 80., grunt osiadł tu w średnim tempie 3 mm na rok. By jeszcze bardziej skomplikować sprawę, dodajmy, że na pewne niewielkie ruchy podłoża w rejonie Warszawy wpływa także biegnący przez cały kraj ciąg uskoku zwanych strefą Teisseyre'a-Tornquista.



Rozmieszczenie trwałych reflektorów w południowej Warszawie. Barwa punktów odpowiada ich wysokości bezwzględnej



ferometrii radarowej. Jak wyjaśnia, jednym z głównych motorów napisania tego projektu była chęć połączenia interesujących zagadnień naukowych, niezbyt często podejmowanych w Polsce, z możliwością zastosowania wyników badań w praktyce i ich dalszego komercyjnego wykorzystania.

– Zastosowaniem InSAR w monitoringu deformacji zaczęliśmy się interesować przy okazji przygotowań do obsługi geodezyjnej II linii warszawskiego metra – wyjaśnia wiceprezes WPG Jacek Uchański. – Odwiedziliśmy wówczas Budapeszt, gdzie realizowany był podobny projekt. Również w tym przypadku podziemna kolej budowana była pod centrum miasta oraz pod rzeką. Jako rozszerzenie klasycznych metod monitoringu eksperymentalnie wykorzystano tam właśnie interferometrię. Byliśmy pod sporym wrażeniem możliwości tej technologii. Pozwoliła ona zebrać dane, których w inny sposób nie dałoby się pozyskać i które

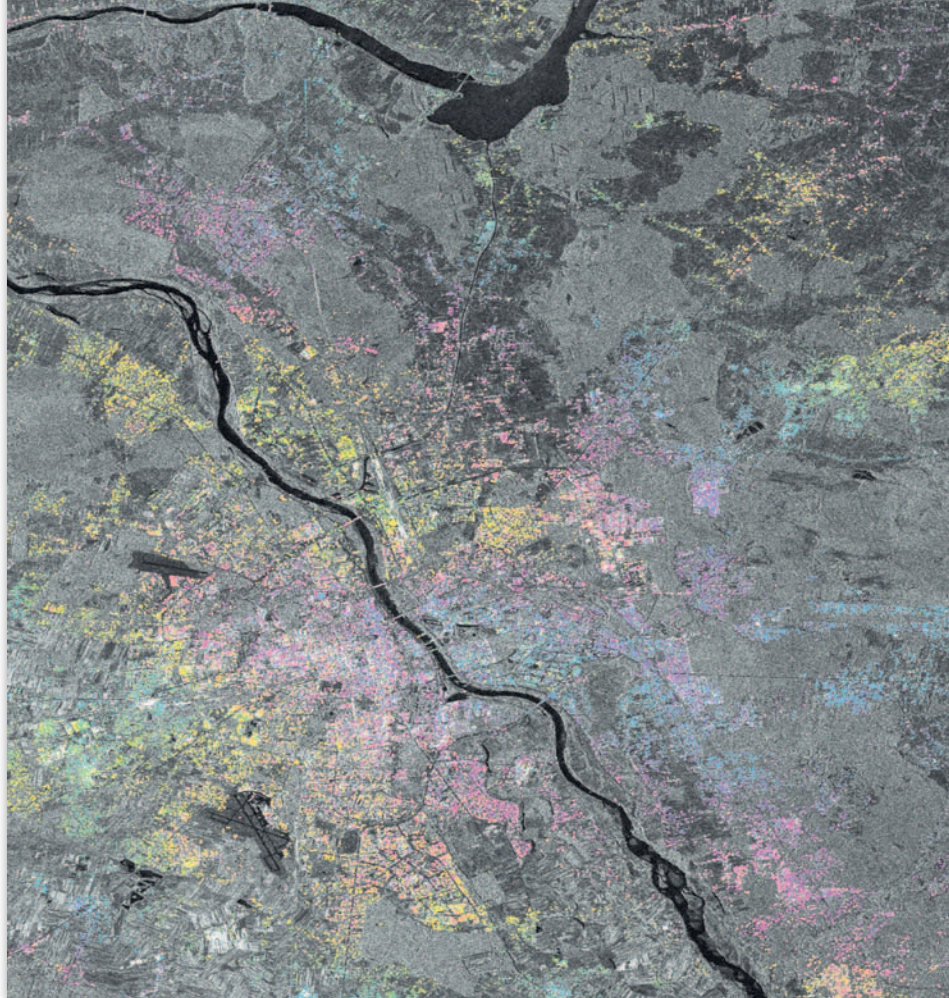
miały niebagatelne znaczenie dla powodzenia inwestycji – opowiada wiceprezes WPG. Choć ostatecznie firmie nie udało się zdobyć kontraktu na obsługę budowy II linii warszawskiego metra, pomysł wykorzystania interferometrii wciąż kiełkował. Temat wydawał się o tyle obiecujący, że komercyjnie nie zajmowała się nim wówczas żadna polska firma.

Duże zainteresowanie IGiK-u i WPG tym zagadnieniem sprawiło, że oba podmioty postanowiły połączyć siły i zrealizować w tym zakresie projekt naukowo-badawczy. Podjęciu współpracy sprzyjały uzupełniające się kompetencje. Instytut Geodezji i Kartografii posiada wykwalifikowaną kadrę naukową oraz doświadczenie w zakresie badań deformacji i interferometrii. Warszawskie Przedsiębiorstwo Geodezyjne ma natomiast doświadczenie na polskim rynku geodezyjnym obejmujące również prowadzenie monitoringu (np. na I linii stołecznego metra), co jest niezbęd-

ne, by skutecznie skomercjalizować tę technologię. Jak podkreśla Jacek Uchański, interferometria to na tyle skomplikowana technologia, że bez pomocy IGiK-u WPG nie dałoby rady samodzielnie jej wdrożyć.

Za cel konsorcjum postawiło sobie opracowanie systemu monitoringu bazującego na technologii PSInSAR i obejmującego swoim zasięgiem całą Warszawę. Dlaczego akurat to miasto? Po pierwsze, dlatego, że nie brakuje tu ruchów gruntów o różnorodnej genezie (patrz ramka). Po drugie, toczy się tu wiele dużych inwestycji infrastrukturalnych, a dobry system monitoringu staje się w ich przypadku rzeczą kluczową. Po trzecie, w swojej 66-letniej historii WPG przeprowadziło w stolicy mnóstwo pomiarów niwelacyjnych, które stanowią unikatowy materiał do walidacji danych z interferometrii.

W całej tej układance brakowało jeszcze jednego elementu – kogoś, kto byłby w stanie ocenić zarówno przydatność



Interferogram różnicowy dla punktów – trwałych reflektorów, wygenerowany z obrazów z satelity Envisat. Prążki, które są widoczne na obrazie, przedstawiają przede wszystkim różnicowanie opóźnienia sygnału wynikające z niejednorodności atmosfery

zastosowanej metody w praktyce inżynierskiej, jak i wpływ zaobserwowanych deformacji na infrastrukturę budowlaną. Konsorcjum rozszerzono więc o Instytut Techniki Budowlanej, który dysponuje sporą wiedzą o oddziaływaniach pomiędzy infrastrukturą techniczną a podłożem. – Naszym celem w tym projekcie jest przełożenie wyników pomiarów na język praktyki budowlanej, aby w sposób zrozumiały powiedzieć, co konkretnie zostało zmierzone. W Warszawie jest to szczególnie trudne, bo wielkoskalowe, naturalne przemieszczenia nakładają się na liczne i nagłe ruchy antropogeniczne o niewielkim zasięgu – wyjaśnia dr Stanisław Łukasik, kierownik Zakładu Geotechniki i Fundamentowania ITB. Instytut wniósł ponadto do projektu własne bazy pomiarów niwelacyjnych oraz dane z zakresu geologii i geotechniki, które pozyskał m.in. przy okazji prac nad „Atlasem geologiczno-inżynierskim Warszawy”. W tym składzie konsorcjum złożyło wnioski o dofinansowanie projektu do Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w konkursie Programu Badań Stosowanych. Pomysł spotkał się z uznaniem i otrzymał 5,3 mln zł dotacji, co stanowi 3/4 wartości przedsięwzięcia. Resztę, jako wkład własny, zapewniło WPG. Projekt oficjalnie ruszył w marcu 2014 r.

● Od prążków do milimetrów

System rozwijany przez IGiK, WPG oraz ITB bazuje na metodzie interferometrii radarowej trwałych reflektorów będącej jedną z odmian interferometrii radarowej (InSAR) – znanej i stosowanej z powodzeniem od kilku dekad do pomiarów terenu oraz jego deformacji. Do wyznaczenia wysokości terenu niezbędne są tu dwa obrazy tego samego obszaru wykonane przez radar z syntezą apertury (SAR) z nieznacznie różnych pozycji względem badanego obiektu. Na obu takich obrazach dla każdego piksela zapisywana jest amplituda oraz faza zarejestrowanej fali. Korzystając z tych informacji, generowany jest tzw. interferogram – raster, który przedstawia różnice fazy z dwóch obrazów. Są one najczęściej wizualizowane w formie charakterystycznych prążków, gdzie jeden prążek to pełny cykl fazy. Na tej podstawie uzyskiwana jest informacja o wartości względnej rzędnej powierzchni terenu – każdy prążek oznacza bowiem określoną różnicę wysokości. By otrzymać wartości bezwzględne, a więc numeryczny model terenu, niezbędny jest postprocessing danych. Powiedzmy tu tylko tyle, że z uwagi na możliwe zakłócenia obrazu interferencyjnego oraz nieciągłości terenu jest to dość skomplikowany etap.

Technologię InSAR wykorzystano do pomiaru Ziemi po raz pierwszy w 1988 r. Zespół naukowców z Jet Propulsion Laboratory w NASA pod kierunkiem prof. Richarda Goldsteina użył do tego celu danych gromadzonych przez satelitę Seasat. Bodaj najbardziej znanym przykładem zastosowania tej metody jest jednak misja SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), której rezultatem jest numeryczny model terenu dla większości obszarów lądowych świata udostępniony na początku XXI wieku również przez JPL NASA (GEODETA 5/2006 i 4/2010).

Po tych i innych sukcesach naukowcy doszli do wniosku, że skoro interferometria pozwala pozyskiwać dane o wysokości terenu, to sprawdzi się również w pomiarach deformacji. Tak narodziła się interferometria różnicowa (DInSAR). Liczne projekty naukowe wykazały, że pozwala ona sprawnie i dokładnie mierzyć ruchy pionowe występujące na rozległych obszarach. Metoda ta znalazła zastosowanie w badaniach ruchów skorupy ziemskiej wywołanych np. trzęsieniami ziemi, zjawiskami wulkanicznymi, zmianą poziomu wód gruntowych, osuwiskami czy działalnością człowieka.

– DInSAR ma jednak zasadniczą wadę – mówi dr Dariusz Ziółkowski. – Świetnie sprawdza się na terenach pustynnych, skalistych czy glacialnych, ale w Polsce już tylko na wybranych obszarach, przede wszystkim zurbanizowanych, choć też nie zawsze – wyjaśnia. Przydatność tej technologii zależy od współczynnika korelacji sygnałów między dwoma wykorzystywanymi obrazami. Jest on tym większy, im mniejszy wpływ mają różne efekty powodujące zakłócanie procesu rozpraszania mikrofal, takie jak: zaburzenia propagacji fali w atmosferze oraz czynniki wpływające na zmiany powierzchni rozpraszającej (np. zmiany w pokrywie roślinnej czy wilgotności terenu).

● Łatwiej powiedzieć, trudniej zrobić

Te ograniczenia DInSAR udało się w większości pokonać w metodzie PSInSAR (*Permanent Scatterer Interferometry*), czyli interferometrii trwałych reflektorów. W tym przypadku deformacje nie są wyznaczane dla całego obrazu radarowego, ale wyłącznie dla tzw. trwałych reflektorów, które silnie odbijają wiązkę mikrofalową w kierunku anteny odbiorczej i charakteryzują się stabilnym odbiciem w długim okresie. – Trwałe reflektory to przede wszystkim obiekty antropogeniczne, dlatego metoda ta najlepiej sprawdza się na obszarach miejskich. W przypadku Warszawy na obrazach radarowych z sa-

telity Envisat otrzymujemy po kilkaset takich punktów na kilometr kwadratowy, a na wysokorozdzielczych z konstelacji COSMO-SkyMed nawet kilka tysięcy – wyjaśnia dr Dariusz Ziółkowski.

Idea metody PSInSAR jest prosta, ale praktyka okazuje się znacznie bardziej skomplikowana. – O ile przy technologii DInSAR wystarczą 3-4 obrazy radarowe, to przy PSInSAR potrzebujemy ich przynajmniej 20-30, a optymalnie nawet 40. Inaczej wygląda również przetwarzanie danych, które polega na bardzo złożonym modelowaniu statystycznym. Rejestrowane przez sensor amplituda oraz faza sygnału kształtowane są bowiem nie tylko przez deformacje, ale również przez wiele innych czynników, choćby atmosferę. Ich wpływ zmienia się w funkcji czasu, przestrzeni czy geometrii obrazowania. Korzystając z tych różnic, możemy je od siebie odseparować i skupić się wyłącznie na informacji związanej z deformacją terenu – tłumaczy dr Dariusz Ziółkowski.

Efekt poprawnie przeprowadzonego modelowania jest jednak imponujący. Metoda PSInSAR pozwala bowiem mierzyć prędkość deformacji z dokładnością sięgającą nawet 0,2 mm/rok! Jest więc porównywalna z niwelacją precyzyjną. Dr Dariusz Ziółkowski zastrzega jednak, by traktować tę wartość raczej jako pewną teoretyczną granicę. – Taką dokładność można osiągnąć tylko przy sprzyjających warunkach, np. przy bardzo stabilnych trwałych reflektorach oraz przy określonym typie deformacji. Trzeba bowiem zaznaczyć, że rozpoczynając przetwarzanie danych, musimy założyć pewien model deformacji, jaki zachodzi na analizowanym przez nas terenie – tłumaczy kierownik projektu.

Ale dokładność to niejedyna zaleta technologii stosowanej przez warszawskie konsorcjum. Jej przewaga nad innymi metodami polega również na możliwości objęcia bardzo rozległych obszarów (pojedyncza wysokorozdzielcza scena radarowa pokrywa obszar znacznie większy od aglomeracji warszawskiej) oraz monitorowania ich z dużą częstotliwością (nawet co kilka dni). – Na obrazach wysokorozdzielczych Warszawy śledzimy ruchy około 20 mln punktów. Ich regularny pomiar z użyciem powszechnie stosowanej niwelacji precyzyjnej wymagałby zatrudnienia armii geodetów – mówi Piotr Falkowski z Pracowni Geoinformatycznej WPG. – Duża ilość danych to w mojej ocenie kluczowa zaleta tej metody. Jeśli przy niwelacji stwierdzimy, że dane dla określonego punktu są wadliwe, to mamy poważny problem. W przypadku interferometrii możemy zaś skorzystać z jednego

z wielu punktów znajdujących się w sąsiedztwie – ocenia dr Stanisław Łukasik.

Kolejną ważną zaletą PSInSAR jest możliwość wyznaczenia historycznych deformacji na bazie archiwalnych scen radarowych. Jak duża może być wartość takich obserwacji, przekonali się budowniczowie metra w Budapeszcie. – Badając historyczne deformacje, stwierdzono spore, bo centymetrowe deformacje w jednym z regionów miasta, które wystąpiły już na około 2 lata przez rozpoczęciem inwestycji. Ich powodem okazało się zaprzestanie eksploatacji jednej ze studni głębinowych. Gdyby więc nie interferometria, winą za te ruchy można byłoby obarczyć pobliską budowę metra – wyjaśnia Piotr Falkowski.

Metoda PSInSAR nie jest jednak wolna od ograniczeń. – W przypadku niwelacji precyzyjnej po prostu wybieramy punkty do pomiaru, umieszczamy repery i je mierzymy. W PSInSAR nie mamy wpływu na to, gdzie są stałe reflektory. Co więcej, ich lokalizację poznamy dopiero po przetworzeniu zobrazowań – mówi dr Dariusz Ziółkowski. – Geodeci są przyzwyczajeni, że projektant wskazuje im konkretne punkty, których monitoring go interesuje, np. dylatacje. W przypadku PSInSAR nie jesteśmy w stanie pomierzyć konkretnych miejsc. Gęstość trwałych reflektorów jest jednak na tyle wysoka, że na dużym budynku może się ich uzbierać nawet kilkadziesiąt – dodaje Piotr Falkowski. Problemem jest także niewielka liczba reflektorów na obszarach słabo zurbanizowanych. Oprócz nielicznej zabudowy funkcję tę mogą pełnić np. wychodnie skalne, obszary pozbawione roślinności oraz specjalnie ustawione sztuczne reflektory.

Kolejnym ograniczeniem jest to, że termin i częstotliwość zbierania danych są uzależnione od orbity satelitów. Biorąc jednak pod uwagę, że wykorzystywana w projekcie konstelacja COSMO-SkyMed może pozyskiwać aż 4 obrazy na 16 dni, nie jest to poważny problem.

Stosowania tej metody nie ułatwia ponadto wspomniana wcześniej konieczność zgromadzenia aż kilkudziesięciu zobrazowań dla jednego obszaru, a to problem nie tylko logistyczny, ale także finansowy. Wreszcie PSInSAR sprawdza się najlepiej w monitorowaniu ruchów powolnych, jednostajnych, zbliżonych do liniowych i obejmujących duży obszar – nagle, lokalne przemieszczenia mogą więc tej metodzie umykać.

• Nie tylko radar

Jak sama nazwa wskazuje, projekt nie ogranicza się wyłącznie do jednej metody pomiaru, ale integruje kilka źró-

deł danych. Podstawą są oczywiście zobrazowania radarowe. Konsorcjum wykorzystuje dwa ich typy. Niskorozdzielcze (4 x 20 m) z satelitów ERS-1 i -2 oraz Envisat, a także wysokorozdzielcze (3 m) z włoskiej konstelacji czterech aparatów COSMO-SkyMed. Dla pierwszej grupy satelitów dane obejmują okres 1992-2009, dla drugiej – od 2011 roku. Daty te są nieprzypadkowe. Dane z satelity ERS-1 dostępne są właśnie od 1992 roku. W 2011 r. ruszyła zaś budowa II linii warszawskiego metra. Jeśli chodzi o dane z COSMO-SkyMed, w projekcie zostaną użyte zarówno zobrazowania archiwalne, jak i aktualne (zbierane co 8-16 dni) – łącznie wykorzystywanych jest około 120 takich scen. Ewentualnie zostaną również użyte darmowe dane z europejskiego Sentinel-1A. Dlaczego stoi to pod znakiem zapytania? Jak wyjaśnia dr Dariusz Ziółkowski, na razie ESA udostępniła dla obszaru Warszawy niewiele danych w formacie wymaganym w metodzie PSInSAR. Ich ilość jest niewystarczająca, ale konsorcjanci mają nadzieję, że się to szybko zmieni.

W projekcie zastosowano również tzw. sztuczne trwałe reflektory – specjalne trójścienne obiekty efektywnie odbijające promieniowanie mikrofalowe. Z reguły stawiane są one w miejscach, gdzie nie występują naturalne trwałe reflektory, a które są bardzo istotne z punktu widzenia prowadzonych analiz. W projekcie część z takich reflektorów ustawiono w bezpośrednim sąsiedztwie stacji GNSS, co umożliwi zdecydowanie lepszą georeferencję uzyskanych pomiarów, walidację metody oraz analizę propagacji błędów w obrębie obszaru badań.

Wyniki modelowania danych radarowych nie będą jednak weryfikowane wyłącznie za pomocą trwałych reflektorów. Tu kluczowa jest niwelacja precyzyjna. Konsorcjanci wykorzystają do tego celu



Jeden z 12 sztucznych reflektorów wykorzystywanych w projekcie

dane gromadzone na przestrzeni ćwierć wieku przez WPG. – Łącznie to 60 tys. obserwacji wykonywanych na 4 tys. reperów podczas 90 prac geodezyjnych realizowanych od 1992 roku do dziś – wylicza Piotr Falkowski. – Część pomiarów realizowaliśmy przy okazji różnych zleceń. Wiele operatów z nimi związanych mieliśmy wyłącznie w formie papierowej, stąd na potrzeby projektu musieliśmy je zdigitalizować i utworzyć bazę danych. Część pomiarów prowadzimy jednak specjalnie na potrzeby projektu. To np. ciągi niwelacyjne pomiędzy obserwatoriami w Borowej Górze i Józefosławiu oraz między siedzibami Centrum Badań Kosmicznych PAN (przy ul. Bartyckiej) i Wojskowej Akademii Technicznej (ul. Kaliskiego) – wyjaśnia pracownik WPG. Własne pomiary niwelacyjne wniósł do projektu również ITB. Są one prowadzone od 2009 r. w ramach badania stabilności skarpy warszawskiej i obejmują jej trzy fragmenty – w okolicy Starówki, Łazienek oraz na Mokotowie. Łącznie ruchy śledzone są na 600 reperach. Do tego Instytut zasilił projekt wynikami niwelacji prowadzonej podczas budowy II linii warszawskiego metra wzdłuż całej inwestycji.

Kolejny zbiór danych wspomagających interferometrię to obserwacje GNSS ze stacji referencyjnych systemu ASG-EUPOS: w Borowej Górze, Józefosławiu oraz w CBK PAN i na WAT. Choć to tylko cztery punkty, to – jak podkreśla prof. Jan Kryński z Centrum Geodezji i Geodynamiki IGIK – prowadzone na nich pomiary satelitarne charakteryzuje długi ciąg obserwacyjny oraz wysoka stabilność rozwiązań. Oprócz walidacji dane te zostaną wykorzystane do nadawania georeferencji obrazom radarowym. Pozwolą także odnieść historyczne obserwacje radarowe do jednego systemu odniesień.

• Co się udało?

W zeszłym roku projekt minął już półmetek i – jak deklaruje dr Dariusz Ziółkowski – wszystko idzie zgodnie z planem. Zebrano dane ze wszystkich zakładanych źródeł i na ich podstawie udało się pozyskać informacje o deformacjach na terenie całej Warszawy. Trwają również intensywne prace walidacyjne. Kierownik projektu podkreśla jednak, że na razie za wcześnie jeszcze mówić o konkretnych wynikach dokładnościowych. Metoda jest bowiem na tyle skomplikowana, że wciąż wymaga optymalizacji. Rezultaty są na razie zachęcające. – Obserwujemy dużą zgodność

pomiarów interferometrycznych z prowadzoną przez nas niwelacją precyzyjną – ocenia Piotr Falkowski. – Większość stwierdzonych za pomocą PSInSAR ruchów nie jest dla nas zaskoczeniem. Albo są one związane z dużymi inwestycjami toczącymi się w Warszawie, albo są uwarunkowane budową geologiczną stolicy – dodaje Jacek Uchański. Nie brak jednak niespodzianek. – Przyjmuje się, że obszar oddziaływania budynku jest równy dwukrotnej głębokości fundamentów. Wyniki z interferometrii wskazują jednak, że bywa on większy. Dlatego musimy się zastanowić, czy w realizowanych przez nas projektach nie powinniśmy odchodzić z niwelacją precyzyjną jeszcze dalej od terenu budowy – mówi Piotr Falkowski. – Można powiedzieć, że główny cel projektu udało nam się osiągnąć, choć przed nami jeszcze dużo pracy. Musimy dopracować działanie całego systemu oraz odpowiedzieć sobie na pytanie, jak gotowe rozwiązanie ma funkcjonować w praktyce – podsumowuje dotychczasowe osiągnięcia konsorcjum Jacek Uchański.

• Zastosowań od metra

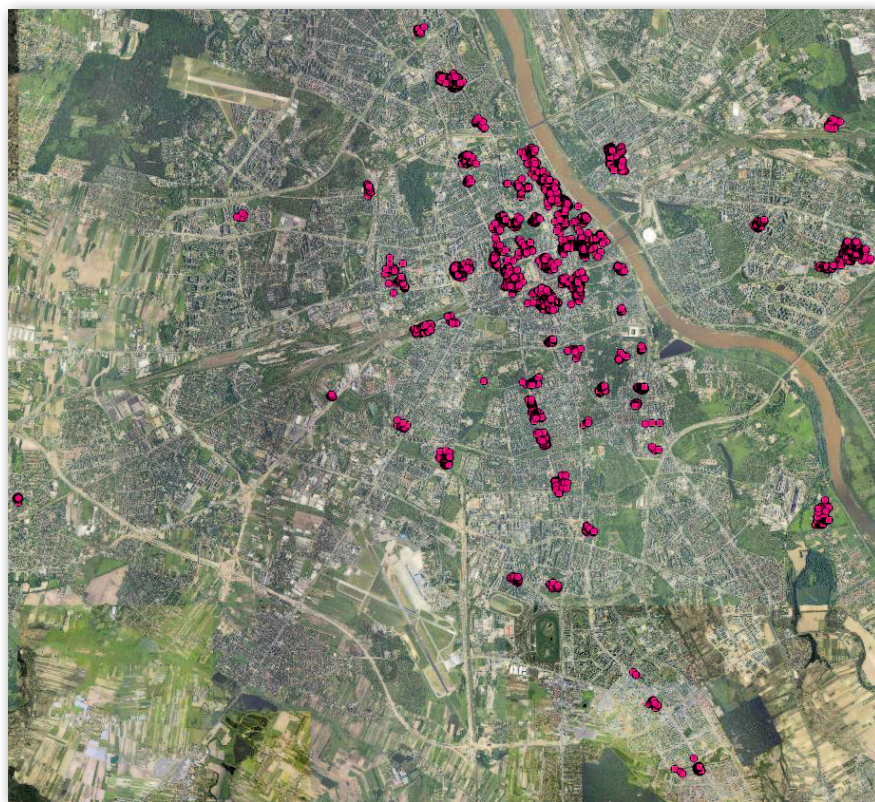
Wynikiem prac warszawskiego konsorcjum będzie prototyp systemu monitoringu deformacji podłoża gruntowego dla Warszawy. Będzie on dostarczać dla całego miasta dwa typy informacji:

1. Średnią prędkość deformacji w danym okresie czasu podawaną w milimetrach na rok. Taki produkt daje pewną informację poglądową o wielkości deformacji w danym miejscu oraz identyfikuje obszary, gdzie ona zachodzi.

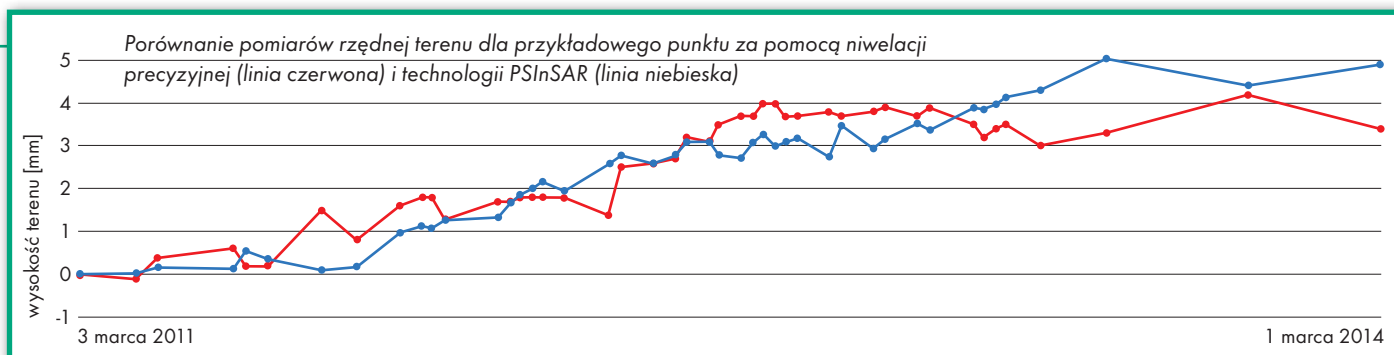
2. Historię deformacji dla każdego z punktów w terenie będącego trwałym reflektorem oraz dla każdego terminu rejestracji obrazu. Dokładność tego produktu jest około 2-krotnie niższa niż w pierwszym przypadku.

Kto jest potencjalnym klientem takich usług? Jacek Uchański wskazuje intensywnie rozwijające się aglomeracje. – Nie znam polskiego miasta, które prowadziłoby kompleksowy system monitoringu przemieszczeń, a nawet jeśli interesują się tym zagadnieniem, to pomiary ograniczają tylko do pojedynczych obiektów – mówi wiceprezes WPG. – Obecnie deformacje badane są przy każdej większej inwestycji. Problem w tym, że pomiary te nie trafiają do państwowego zasobu, a więc miasto nie wie, jakie ruchy zachodzą na jego terenie. Rozwijany przez nas system zapewni im takie dane, pozwalając np. znacznie efektywniej prowadzić planowanie przestrzenne czy dbać o bezpieczeństwo mieszkańców – dodaje Piotr Falkowski, zauważając, że tego typu rozwiązanie z powodzeniem wdrożono np. w Paryżu.

Technologia sprawdzi się również na dużych inwestycjach infrastrukturalnych, szczególnie gdy toczą się one na terenie zurbanizowanym. Najlepszym przykładem jest metro – PSInSAR wykorzystano na budowie kolejki podziemnej nie tylko w Budapeszcie, ale również w Barcelonie czy w Londynie. Zdaniem dr. Stanisława Łukasika metoda ta sprawdzi się również podczas budowy głęboko posadowionych obiektów, a tych – jak zauważa – od lat 90. XX wieku powstaje w Warszawie coraz więcej. – Każda taka budowa ma swoją strefę



Obiekty objęte systemem monitoringu rozwijanym przez IGIK, WPG oraz ITB



oddziaływania, gdzie występują deformacje związane zarówno z obniżeniem zwierciadła wód podziemnych, jak i odprężeniem gruntu. Strefy te wyznaczamy, stosując pewne metody teoretyczne i empiryczne. Choć nasze przewidywania na ogół się sprawdzają, widzimy dużą potrzebę regularnego monitorowania zasięgu tego obszaru. Interferometria sprawdzi się tu idealnie – wyjaśnia dr Stanisław Łukasik.

Inne inwestycje, które nadają się do objęcia tego typu monitoringiem, to np. budowa i eksploatacja zbiorników retencyjnych, zapór i wałów powodziowych, podziemnych zbiorników na ropę i gaz czy dużych elektrowni. Oczywiście w żadnym z tych przypadków nie może to być jedyna metoda pomiarów deformacji. Interferometria pozwala jednak znacznie zredukować ilość kosztownych prac terenowych, umożliwiając kierowanie ekip pomiarowych tam, gdzie zaobserwowano niepokojące ruchy.

Potencjalnych zastosowań PSInSAR jest znacznie więcej. Technologia ta powinna się sprawdzić w monitorowaniu osuwisk oraz szkód górniczych – zjawisk, które choć powszechnie występują w niektórych regionach Polski, to do dziś nie są objęte kompleksowym systemem monitoringu. Z usług warszawskiego konsorcjum mogłyby w tym przypadku korzystać nie tylko lokalne czy centralne urzędy, ale także banki czy ubezpieczyciele, którzy będą mogli skutecznie wyliczyć ryzyko inwestycji. Co ważne, przydatność PSInSAR w monitorowaniu obszarów górniczych sprawdzano w Polsce już wcześniej. W ramach unijnego projektu DORIS tego typu badania prowadzono m.in. w regionie Katowic i Tychów (ich uczestnikiem był Państwowy Instytut Geologiczny). W ocenie dr. Stanisława Łukasika innym idealnym terenem dla tej technologii jest elektrownia i kopalnia w Bełchatowie. Mamy tu zarówno blisko 200-metrowe wzniesienie z nadkładu odkrywki Bełchatów oraz 40-metrowe składowisko popiołów, które do 2039 r. ma być dwukrotnie wyższe, jak i odkrywki, które planuje się przekształcić w zalew. Zachodzące tu procesy geodynamiczne powinny być uważnie monitorowane – wyjaśnia.

Piotr Falkowski z WPG podpowiada, że zalety interferometrii powinien docenić również GUGiK. Na bazie tej technologii można bowiem skutecznie wskazywać obszary, gdzie należy przeprowadzać nowe kampanie niwelacyjne, bo sieć reperów odstaje już od rzeczywistości.

Automatycznie nasuwa się tu pytanie o koszty usługi. Dr Dariusz Ziółkowski zastrzega, że trudno podać tu konkretny cennik, bo wszystko zależy od indywidualnych wymagań odbiorcy. – Sporym kosztem w naszym projekcie są sceny satelitarne, ale jeśli klient zadowolony się darmowymi danymi z satelity Sentinel-1, cena usługi spadnie – wyjaśnia. Dodaje jednocześnie, że trudno określić tę usługę jako tanią lub drogą, bo brak jest innych rozwiązań, które pozwoliłyby pozyskiwać porównywalne dane.

Jacek Uchański nie kryje jednak, że rozwijany przez warszawskie konsorcjum system monitoringu nie jest na każdą kieszeń. Sporo pracy i nakładów finansowych pochłania nie tylko zakup scen radarowych (ich cena w przypadku COSMO-SkyMed zaczyna się od kilku tysięcy zł za sztukę), ale także licencja na oprogramowanie do przetwarzania danych interferometrycznych. Do ceny usługi należy ponadto doliczyć koszty przygotowania systemu, w tym np. pozyskanie danych do walidacji czy ustawienie sztucznych trwałych reflektorów. – Wszystko to sprawia, że dla mniejszych inwestycji infrastrukturalnych może to być zbyt droga technologia. Ale już np. objęcie takim monitoringiem całego miasta nie powinno nadmiernie obciążać lokalnego budżetu – tłumaczy wiceprezes WPG. Podkreśla jednocześnie, że na tego typu usługę potencjalni klienci powinni patrzeć długofalowo, jako na rozwiązanie funkcjonujące przez wiele lat.

• Potrójne korzyści

Dzięki projektowi konsorcjum realizujące projekt stanie się pierwszym podmiotem w Polsce i jednym z raptem kilku na świecie, który będzie oferować komercyjną usługę monitoringu w technologii PSInSAR. Prototyp systemu monitoringu ma być gotowy w pierwszym kwartale przyszłego roku i konsorcjanci liczą,

że krótko po tym będzie już dostępny na rynku. Czy jednak znajdują się w kraju chętni na taką innowacyjną usługę? Analizy przeprowadzone podczas przygotowań do projektu pokazują, że zainteresowanie technologią powinno być spore, bo dużych inwestycji nie będzie w Polsce brakowało. – Najbliższa przyszłość to choćby budowa kolejnych odcinków II linii metra oraz tunelu drogowego pod Ursynowem. W dalszej perspektywie nasz kraj czeka natomiast wiele poważnych projektów hydrotechnicznych. Wszędzie tu interferometria pasuje idealnie – mówi dr Stanisław Łukasik. Zresztą, nawet jeśli polski rynek okaże się niegotowy na tę technologię, to przed warszawskim konsorcjum stoją przecież otworem także rynki zagraniczne.

Projekt ma mieć jednak znaczenie nie tylko komercyjne, ale także naukowe. – W naszej działalności obejmującej m.in. prowadzenie prac badawczych i rozwojowych czy sporządzanie opinii i ekspertyz dotychczas korzystaliśmy z klasycznych metod pomiarowych, a ich użycie było pracochłonne, kosztowne i dawało niewielki zbiór punktów. Teraz w mgnieniu oka możemy otrzymać ogromną ilość wysokiej jakości danych – mówi dr Stanisław Łukasik.

Projekt ma duże znaczenie naukowe również dla IGiK-u. – Choć metoda PSInSAR znalazła już wiele komercyjnych zastosowań, to wciąż ma wiele ograniczeń i wymaga ciągłego udoskonalania – wyjaśnia dr Dariusz Ziółkowski. Konsorcjanci chcą się skupić przede wszystkim na badaniu deformacji nieliniowych w czasie i niespójnych przestrzennie, bo wykorzystanie interferometrii w tych przypadkach nadal napotyka wiele problemów.

W krajowej branży geodezyjnej przedsięwzięcie postrzegani są często jako mało innowacyjni, zdolni do konkurencyjności spotyka także naukowców, którzy dodatkowo krytykowani są za prowadzenie badań o niewielkim znaczeniu praktycznym. Jeśli wspólny projekt IGiK, WPG oraz ITB odniesie sukces i znajdzie naśladowców, stereotyp ten odejdzie w zapomnienie.

Jerzy Królikowski