

*Sławomir Błaszczyk**

WYKORZYSTANIE SATELITARNEJ TECHNOLOGII GPS W MONITOROWANIU STANU POWIERZCHNI TERENU GÓRNICZEGO „KOŹMIN I”

KWB „Adamów” SA w Turku jest kopalnią wieloodkrywkową, z których jedna odkrywka (O/Koźmin) położona jest w sąsiedztwie autostrady A-2 oraz rzeki Warty. Roboty górnicze wymagają odwodnienia terenu przedpola odkrywki, co przyczynia się do powstawania wielkoprzestrzennego leja depresyjnego. Zbadanie jego oddziaływania na tereny przyległe do odkrywki, na których występują liczne zabudowania gospodarskie, użytki rolne, drogi gminne oraz powiatowe, jest niezmiernie trudnym do wykonania zadaniem, dodatkowo istotne jest połączenie trzech następujących kwestii:

- własnej inicjatywy przedsiębiorstwa w celu sprawdzenia skali i rozmiaru wpływu robót górniczych na powierzchnię terenu górniczego „Koźmin I”;
- obowiązku prowadzenia wydobywania ze złoża Koźmin I w sposób, który nie narazi inwestora odcinka autostrady A-2 na dodatkowe koszty i nie spowoduje utrudnień w budowie i eksploatacji autostrady wynikającego z zapisu w koncesji;
- §219 pkt. 5 rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 17 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w odkrywkowych zakładach górniczych wydobywających kopaliny podstawowe (Dz.U. z dnia 1 lipca 2002 r.) dotyczącego badania przez służbę mierniczą wpływu robót górniczych na powierzchnię terenu górniczego.

Powyższe uwarunkowania doprowadziły do podjęcia przez KWB „Adamów” SA decyzji o rozpoczęciu prac naukowo-badawczych określających wpływ eksploatacji górniczej na deformacje terenu górniczego „Koźmin I”, na podstawie wyznaczenia bezwzględnych przemieszczeń punktów kontrolowanych z zastosowaniem satelitarnych pomiarów GPS z możliwie najwyższą dokładnością określenia ich współrzędnych. Biorąc pod uwagę cha-

* KWB „Adamów” SA, Turek

rakter prac, w których liczy się doświadczenie, zastosowanie najnowocześniejszych rozwiązań i sprzętu pomiarowego a także niezależność w opracowaniu wniosków, postanowiono powierzyć prowadzenie takich badań odpowiedniej jednostce naukowej. Przygotowaniem projektu technicznego i przeprowadzeniem pierwszego, wyjściowego statycznego pomiaru GPS na punktach referencyjnych oraz kontrolowanych wraz z opracowaniem wyników zajęła się Katedra Geodezji Satelitarnej i Nawigacji Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

Przed przystąpieniem do badań deformacji opracowano projekt techniczny, który zawiera najistotniejsze zadania do realizacji statycznych pomiarów GPS. Obszar badań znajduje się na równinie o średniej wysokości ok. 95 m n.p.m., charakteryzuje się małym zróżnicowaniem rzeźby terenu. Usytuowanie w dorzeczach rzek: Warta, Teleszyna, Kiełbaska, Struga Janiszewska, sprawia, iż jest to obszar typowo rolniczy z przewagą gruntów ornych o niewielkiej lesistości. Geologia gleby wskazuje na przewagę utworów piaskowych oraz torfy na terenach łąkowych, jak i mułki w pobliżu rzeki Warty. Na etapie projektu technicznego uzgodniono lokalizację i liczbę punktów kontrolowanych oraz referencyjnych. Położenie każdego punktu zostało precyzyjnie zaprojektowane na podstawie wywiadu terenowego przewidując minimalizację ryzyka jego uszkodzenia w przyszłości. Duży nacisk położono na wkomponowanie punktów w obiekty i tereny wokół odkrywki. Najwięcej punktów zaprojektowano w bezpośrednim sąsiedztwie autostrady A-2 oraz przy wale przeciwpowodziowym rzeki Warty. Projektując punkty referencyjne zachowano warunek położenia ich poza terenem górniczym. Liczbę wszystkich punktów dostosowano do powierzchni i reprezentujących ją najważniejszych obiektów budowlanych, a także użytków gruntowych. Na zainstalowanie znaków uzyskano niezbędne pozwolenia właścicieli gruntów. Każdy punkt kontrolowany zbudowano jako podziemny znak fundamentalny typu 71b wg wytycznych technicznych G-2.1 „Podstawowa osnowa wysokościowa”, natomiast punkty referencyjne stabilizowano nadziemnymi znakami będącymi modyfikacją znaku typu 71b (rys. 1) z uwzględnieniem posadowienia stopy znaków poniżej poziomu przemarzania, odpowiedniego zbrojenia czy właściwej klasy betonu.

Ostatecznie zbudowano w terenie 27 punktów kontrolowanych oraz 3 punkty referencyjne (rys. 2).

Satelitarne metody pomiarowe umożliwiają wyznaczanie absolutnych wartości odkształceń pionowych i poziomych budowli, jak i powierzchni Ziemi z milimetrową dokładnością w oparciu o punkty oddalone o kilka, czy kilkanaście kilometrów od obiektów podlegających deformacjom w globalnym układzie współrzędnych. Dlatego też projekt techniczny zakłada, iż statyczne obserwacje GPS należy wykonywać na zastabilizowanych punktach w półrocznych okresach czasu. Uśrednione wyniki pomiarów uzyskane w pierwszym okresie pomiarowym zostaną przyjęte jako wielkości wyjściowe do porównania wyników pomiarów z następnymi lat [1]. Wszystkie obserwacje GPS, rejestrowane w różnych okresach czasu, muszą być przetwarzane z przyjęciem tej samej strategii obliczeniowej. Wyniki końcowe należy przedstawiać w układzie globalnym w odniesieniu do elipsoidy GRS'80 oraz w państwowym układzie współrzędnych płaskich 2000.



Rys. 1. Stabilizacja punktów kontrolowanego (po lewej) i referencyjnego (po prawej)



Rys. 2. Rozmieszczenie punktów kontrolowanego względem odkrywki „Kozmin”

Po wybudowaniu znaków i odczekaniu niezbędnego okresu czasu na ich własne osiadanie w gruncie, przystąpiono do wykonania satelitarnych pomiarów. W pomiarach uczestniczyło 12 odbiorników GPS. W celu weryfikacji poprawności przeprowadzanych procedur pomiarowych wykonano sześć ośmiogodzinnych sesji pomiarowych. Obserwacje GPS przeprowadzono w dniach: 8–13 grudnia 2008 roku wg wcześniej opracowanego planu sesji pomiarowych GPS. Do pomiarów na punktach kontrolowanych wykorzystano przyrządy do precyzyjnego wymuszonego centrowania anten GPS, które są patentem UWM w Olsztynie. Do przeprowadzenia precyzyjnych pomiarów satelitarnych GPS wykorzystano sprzęt pomiarowy wraz z akcesoriami, wyprodukowany przez firmę Ashtech oraz Topcon.

W kampanii pomiarowej brały udział dwuczęstotliwościowe, dwunastokanałowe odbiorniki GPS [2]:

- 1) Z-Xtreme, z anteną ASH701975.01A — 7 sztuk;
- 2) Z-XII, z anteną ASH700228.D — 1 sztuka,
- 3) Topcon, ze zintegrowaną anteną HIPER Pro + — 4 sztuki.

Na punktach referencyjnych oraz na punktach kontrolowanych zastosowano opatentowane metody wymuszonego centrowania anten GPS (rys. 3 i 4).



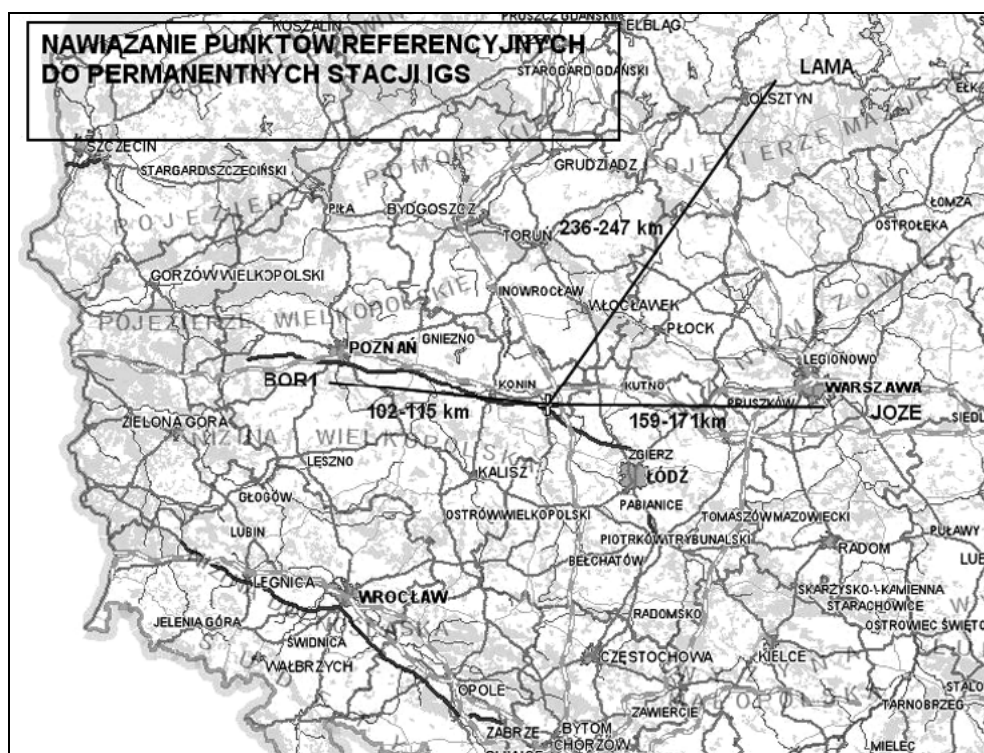
Rys. 3. Realizacja pomiaru GPS na punkcie referencyjnym



Rys. 4. Realizacja pomiaru GPS na punkcie kontrolowanym

Centrowanie anten GPS na punktach referencyjnych realizowane było przy użyciu spodek przykręcanych bezpośrednio do głowic tych punktów, wysokość anteny względem trzech punktów wysokościowych znajdujących się w każdej głowicy wyznaczana była suwmiarką z dokładnością pomiaru 0,05 mm. Centrowanie anten GPS na punktach kontrolowanych realizowano za pomocą specjalnie opracowanych do tego zadania przyrządów do wymuszonego precyzyjnego centrowania anten GPS (patent UWM) o długości około 2,22 m, które ustawiano bezpośrednio na ziemnych punktach dwufunkcyjnych oraz centrowano statywami geodezyjnymi wyposażonymi w dodatkowe głowice nastawne. Długość każdej tyczki została wcześniej wyznaczona (skalibrowana) z wysoką dokładnością (0,1 mm) i określała wysokość punktu głównej anteny GPS nad punktem wysokościowym.

Zgromadzone w trakcie kampanii obserwacyjnej dane w postaci zbiorów binarnych w formacie Ashtech: B, E, S, oraz Topcon: tps, przetworzono do formatu RINEX. Obliczenia wykonano wersją oprogramowania BERNESE GPS SOFTWARE v. 5.0 (rel. 30-MAY-08). Dodatkowo przeprowadzono analizę jakości zebranego materiału obserwacyjnego. Analizowanymi parametrami były: procentowy udział zarejestrowanych obserwacji w stosunku do wszystkich możliwych do zarejestrowania sygnałów do satelitów znajdujących się na wysokości 10 stopni ponad horyzontem oraz liczba utraconych cykli fazy.



Rys. 5. Nawiązanie punktów referencyjnych do stacji sieci IGS: BOR1, LAMA, JOZE

Współrzędne każdego punktu referencyjnego wyznaczone zostały w nawiązaniu do trzech wybranych stacji stałych sieci IGS (*International GNSS Service*) w oparciu o sześć ośmiogodzinnych sesji obserwacyjnych. Współrzędne punktów referencyjnych RR01, RR02, RR03 definiujących lokalny układ odniesienia do badania deformacji terenu wyznaczono w nawiązaniu do trzech permanentnie pracujących stacji IGS: BOR1, LAMA i JOZE (rys. 5). Wykorzystane stacje realizują obecnie obowiązujący w pomiarach satelitarnych, międzynarodowy, globalny system odniesienia ITRS. Wybór tego systemu odniesienia jest podyktowany tym, iż wszystkie opracowania obserwacji GPS wymagające najwyższej precyzji muszą wykorzystywać precyzyjne efemerydy satelitów GPS, które są dostarczane w obecnej realizacji tego systemu — układzie ITRF'2005. Dokładność precyzyjnych efemeryd jest lepsza niż 5 cm. Dla porównania dokładność efemeryd pokładowych wynosi około 100-300 cm. Jak wiadomo, układ ITRF 2005 jest układem dynamicznym, w którym współrzędne stacji są zmienne w czasie. Zmiany te wynikają głównie z ruchu płyt kontynentalnych. Współrzędne te są cotygodniowo wyznaczane i publikowane przez centra analiz IGS. Wieloletnie ciągi obserwacji GPS potwierdzają, że stacje w naszym regionie przesuwały się o kilkanaście mm rocznie w kierunku północno-wschodnim. Taki dynamiczny układ nie jest wygodny do prowadzenia badań lokalnych deformacji, wobec tego postanowiono „zamrozić” ten układ na epokę 2008–12–11 00:00 UT (jest to epoka, na którą wyznaczono współrzędne w pierwszej kampanii). Rezultaty wszystkich późniejszych kampanii pomiarowych w postaci współrzędnych 30 punktów referencyjnych i kontrolowanych będzie należało transformować do tej epoki. Podczas opracowania zebranych obserwacji szczególną uwagę zwrócono na problem modelowania opóźnienia troposferycznego, gdyż ten parametr jest obecnie uważany za czynnik mający największy wpływ na precyzję wyznaczenia wysokości stacji (oba te parametry są ze sobą skorelowane w ~ 90%). Poniżej przedstawiono parametry przyjęte do obliczeń [2]:

- finalne, precyzyjne orbity i zegary satelitów oraz parametry ruchu obrotowego Ziemi uzyskane z oficjalnego opracowania IGS;
- absolutne modele centrów fazowych anten satelitów oraz odbiorników GPS uzyskano z IGS;
- obserwacje fazowe L1 i L2;
- maska horyzontu 10 stopni;
- interwał obserwacji przyjęty do obliczeń: 30 sekund;
- troposfera: jeden parametr całkowitego opóźnienia zenitalnego (*total zenith delay* — *TZD*), wyznaczany co godzinę, funkcja mapująca Wet Niell, dodatkowo wyznaczono gradient troposfery (odchylenie TZD od pionu);
- finalny model jonosfery CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*);
- wyznaczenie nieoznaczoności: metoda SIGMA L5/L3;
- ostateczne współrzędne oraz opóźnienie troposferyczne — kombinacja liniowa L3 (*ionofree*).

Ostateczne współrzędne punktów referencyjnych uzyskano na podstawie równoczesnego, sekwencyjnego, wyrównania obserwacji ze wszystkich sześciu sesji obserwacyjnych

w nawiązaniu do trzech stacji permanentnych IGS. W ten sposób otrzymano lokalny trójwymiarowy układ odniesienia do precyzyjnego wyznaczania przemieszczeń.

Współrzędne każdego punktu kontrolowanego zostały obliczone na podstawie danych obserwacyjnych z dwóch ośmiogodzinnych sesji pomiarowych wykonanych w dniach 8–13 grudnia 2008 r. Przeprowadzono wyrównanie sesyjne estymując współrzędne łącznie z innymi parametrami (całkowite opóźnienie troposferyczne TZD). Ostateczne współrzędne punktów kontrolowanych otrzymano w układzie ITRF 2005 na epokę 2008–12–11 00:00 UT, na podstawie łącznego wyrównania rozwiązań z poszczególnych sesji.

Poniżej przedstawiono parametry przyjęte do obliczeń [2]:

- finalne orbity precyzyjne oraz parametry ruchu obrotowego Ziemi uzyskane z IGS;
- absolutne modele centrów fazowych anten satelitów oraz odbiorników GPS uzyskane z IGS;
- obserwacje fazowe L1;
- maska horyzontu 10 stopni;
- interwał obserwacji 30 sekund;
- eliminacja opóźnienia troposferycznego: jeden parametr całkowitego opóźnienia zenitalnego na 1 godzinę (na parametry nałożono bardzo ściśle ograniczenia rzędu 1 mm), funkcja mapująca Wet Niell (model a priori — Full Niell);
- wyznaczenie nieoznaczoności: metoda SIGMA/L1;
- ostateczne współrzędne — obserwacje fazowe L1.

Jak widać powyżej, do wyznaczenia współrzędnych punktów kontrolowanych wybrano obserwacje fazowe tylko na jednej częstotliwości (L1). Wynika to z faktu, że długości wektorów łączących punkty referencyjne i kontrolowane nie przekraczają 15 kilometrów, więc nie ma potrzeby stosowania kombinacji liniowej L3 do eliminacji wpływu jonosfery. Ponadto, kombinacja liniowa L3 charakteryzują się trzykrotnie większym szumem, co ogranicza precyzję uzyskiwanych wyników [2].

Dokładna analiza powtarzalności wyznaczeń punktów kontrolowanych wskazuje na wysoką dokładność wyznaczeń współrzędnych. Dla większości punktów błędy średnie dla współrzędnych poziomych i wysokości mieszczą się w granicach ± 2 mm. W przypadku punktu KK09 otrzymano maksymalne wartości błędów współrzędnych poziomych dochodzące do 4,5 mm, natomiast maksymalne wartości błędów wysokości o wartości ok. 3 mm wystąpiły w przypadku punktów KK16 i KK17. Współrzędnych wszystkich punktów referencyjnych i kontrolowanych wyznaczono dodatkowo w układzie ETRF 89 oraz w państwowym układzie współrzędnych 2000 oraz określono wysokości normalne każdego z punktów.

Wnioski

Przeprowadzone w trakcie realizacji niniejszego projektu badania potwierdzają bardzo wysoką dokładność zastosowanych metod pomiarowych i wskazują na przydatność techniki GPS do przeprowadzania badania deformacji terenu. Wykonane analizy potwierdzają mo-

zliwość uzyskania dokładności położenia punktów na poziomie pojedynczych milimetrów, co potwierdza możliwość wykorzystania pomiarów satelitarnych do precyzyjnego monitorowania przemieszczeń poziomych i pionowych terenu oddziaływań górniczych. Wyniki otrzymane z pierwszej kampanii pomiarowej (szczególnie wysoka powtarzalność wartości współrzędnych) wskazują na poprawność i skuteczność przyjętej technologii pomiarowej (przyjęte rozwiązania techniczne oraz procedura obliczeniowa). Natomiast do wiarygodnego wyznaczenia przemieszczeń wymagane są dalsze kampanie pomiarowe prowadzone cyklicznie przez dłuższy okres czasu. Dotychczasowe doświadczenia Wykonawcy w badaniach tego typu wskazują na konieczność wykonywania kampanii pomiarowych w okresach półrocznych. Wyniki tych badań posłużą przede wszystkim ochronie obiektów zabytkowych, pobliskiej autostrady, wału przeciwpowodziowego nad rzeką Wartą, jak i budynków oraz budowli miejscowej ludności położonych na tym terenie. Niniejsze badania deformacji mogą być realizowane tylko na podstawie monitoringu sieci zastabilizowanych na danym obszarze punktów kontrolowanych, które stanowią stabilną osnowę dwufunkcyjną zlokalizowaną na obszarze gminy Brudzew.

LITERATURA

- [1] *Oszczak S., Baryła R., Wielgosz P.*: Opracowanie projektu technicznego w zakresie badań wpływu robót górniczych na powierzchnię terenu górniczego Koźmin I na podstawie obserwacji przemieszczeń punktów kontrolowanych, Olsztyn, 2008
- [2] *Oszczak S., Baryła R., Wielgosz P., Paziowski J.*: Raport z realizacji projektu pt.: Badania wpływu eksploatacji górniczej na deformację terenu górniczego Koźmin I na podstawie wyznaczenia przemieszczeń punktów kontrolowanych, Olsztyn, 2009