



Główne założenia koncepcji badania deformacji terenu na podstawie satelitarnych pomiarów GPS sieci kontrolnej

RADOSŁAW BARYŁA¹, JACEK PAZIEWSKI²

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej,

¹Katedra Geodezji Satelitarniej i Nawigacji, ²Katedra Astronomii i Geodynamiki,
10-724 Olsztyn, ul. J. Heweliusza 5, baryla@uwm.edu.pl, jacek.paziewski@uwm.edu.pl

Streszczenie. Określanie wskaźników deformacji terenu, takich jak przemieszczenia pionowe i poziome, wymaga wykonywania pomiarów geodezyjnych z dużą dokładnością. W klasycznej geodezji do wyznaczania przemieszczeń pionowych powszechnie wykorzystywana jest metoda niwelacji precyzyjnej, zaś do przemieszczeń poziomych pomiary kątowno-liniowe w sieciach kontrolnych. W pracy zaprezentowano założenia precyzyjnego wyznaczania przemieszczeń pionowych i poziomych z wykorzystaniem statycznych pomiarów GPS. Przedstawiono technologię pomiarów terenowych wraz z konstrukcją satelitarniej sieci kontrolnej i sesji pomiarowych oraz założenia i etapy obliczeń przy wyznaczaniu przemieszczeń punktów ze szczególnym uwzględnieniem strategii opracowania obserwacji satelitarnych w precyzyjnych sieciach lokalnych. Przedstawiono osiągnięte dokładności wyznaczeń współrzędnych punktów sieci kontrolnej na przykładzie prowadzonych badań deformacji terenu na obszarze Kopalni Węgla Brunatnego „Adamów” S.A. w Turku oraz na obszarze Starego i Głównego Miasta Gdańska. Wyniki wskazują, iż możliwe jest osiągnięcie dokładności wyznaczenia okresowych współrzędnych punktów na poziomie 2-3 mm dla każdej składowej.

Słowa kluczowe: geodezja i kartografia, deformacje terenu, GPS

1. Wstęp

Zastosowanie systemu GPS (*Global Positioning System*) w badaniach deformacji jak również monitoringu strukturalnym obiektów budowlanych jest przedmiotem wielu badań, których wyniki były prezentowane w publikacjach naukowych, opracowaniach i na konferencjach technicznych [1, 3, 4, 12, 14, 15, 18]. Dowodzi

to szerokiego zainteresowania tym tematem. Szczególnie na terenach eksploatacji górniczej i innych obszarach zagrożonych, badania deformacji i przemieszczeń terenu należą do istotnych prac z zakresu inżynierskich pomiarów geodezyjnych [17, 21]. Na takich terenach pomiary przemieszczeń i deformacji dostarczają informacji o stopniu zagrożenia bezpieczeństwa budowli i mogą zapobiec wystąpieniu katastrofy budowlanej. Dodatkowo wyniki pomiarów przemieszczeń służą również do weryfikacji zakładanych wartości przemieszczeń.

Najczęstszą przyczyną powstawania deformacji terenu są zmiany obciążeń działających na grunt, zmiany poziomu wód gruntowych, jak również zsuw geologiczny. Również postępujący proces inwestycyjny (głębokie wykopy lub inne roboty ziemne) może stanowić zagrożenie dla sąsiadujących budynków i być przyczyną zaistnienia potrzeby prowadzenia monitoringu przemieszczeń powierzchni terenu oraz monitoringu strukturalnego obiektów budowlanych.

Dodatkowym problemem mogącym wystąpić na terenach ulegających deformacjom jest utrata stabilności państwowego układu odniesienia reprezentowanego w terenie poprzez pionowe i poziome sieci geodezyjne. Na obszarach o niestabilnym podłożu osnowa wysokościowa w postaci znaków ściennych może okazać się niewiarygodna. Budynki wraz z zastabilizowanymi na ich ścianach reperami podlegają przemieszczeniom i odkształceniom, co w oczywisty sposób doprowadza do niezgodności katalogowych i rzeczywistych wysokości znaków państwowej osnowy wysokościowej. Zmiany położenia znaków zarówno osnowy wysokościowej, jak i poziomej mogą być znaczne i uniemożliwić wykonywanie w nawiązaniu do nich klasycznych pomiarów geodezyjnych. Taka sytuacja wystąpiła na obszarze Starego i Głównego Miasta Gdańska, gdzie zaobserwowano istotne zmiany wysokości reperów osnowy wysokościowej [4]. Na podstawie niwelacji precyzyjnej przeprowadzonej przez Przedsiębiorstwo Geologiczno-Geodezyjne „Geoprojekt” Gdańsk w latach 1997-2001 na obszarze Głównego i Starego Miasta Gdańska stwierdzono zmiany wysokości ściennych reperów państwowej osnowy I klasy w przedziale od 0,1 do 4,5 mm. Wykazane zostały również znaczne zmiany wysokości, w odniesieniu do wartości katalogowych, punktów podstawowej osnowy wysokościowej pierwszej i drugiej klasy (np. punkt pierwszej klasy nr 60-4,3 mm, punkt drugiej klasy nr 761-21,7 mm). Chociaż zastosowanie techniki GPS łącznie z systemem ASG-EUPOS (Aktywna Sieć Geodezyjna — *European Position Determination System*) będzie prowadziło w Polsce do zmniejszenia zapotrzebowania na stabilizowanie punktu osnowy poziomej i wysokościowej, to praktyczna realizacja państwowych systemów odniesień przestrzennych w postaci fizycznych punktów na powierzchni terenu będzie zawsze wymagana.

W pracy przedstawiono założenia opracowanej i stosowanej w praktyce koncepcji badania deformacji terenu przy wykorzystaniu pomiarów GPS opracowanej w Katedrze Geodezji Satelitarnej i Nawigacji we współpracy z pracownikami Katedry Astronomii i Geodynamiki UWM w Olsztynie. Zaprezentowano koncepcję

badania, strategii obliczeniowej i otrzymywane dokładności wyznaczeń okresowych współrzędnych punktów w sieciach kontrolnych założonych do badania deformacji i przemieszczeń. Praca opiera się na doświadczeniach zdobytych w ciągu kilku lat badań prowadzonych na obszarze Starego i Głównego Miasta Gdańska oraz na obszarze kopalni odkrywkowej węgla brunatnego KWB „Adamów” S.A. w Turku.

2. Zalety zastosowania satelitarnych metod w badaniach deformacji

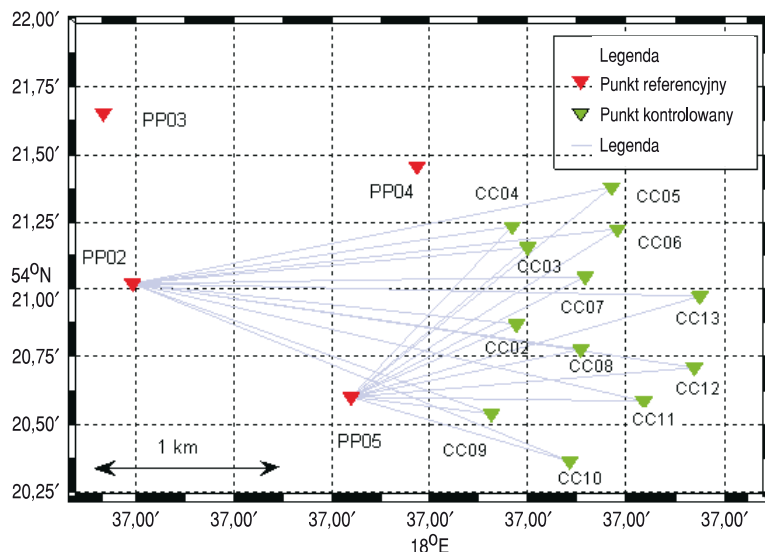
Wybór metody do badania deformacji terenu zdeterminowany jest przez szereg czynników. Możemy zaliczyć do nich żądaną dokładność określenia przemieszczeń punktów, konstrukcję oraz wielkość sieci kontrolnej, rodzaj określanych przemieszczeń (względne, bezwzględne, poziome, pionowe, 3D) oraz prędkość zachodzenia zmian [5]. Do wyznaczania przemieszczeń najpowszechniej wykorzystywane były metody klasycznej geodezji [13]: niwelacja precyzyjna do wyznaczania przemieszczeń pionowych oraz obserwacje kątowno-liniowe do poziomych. Metody klasycznych pomiarów geodezyjnych zakładały wykorzystanie oddzielnych technik pomiaru, instrumentarium i opracowania wyników dla określania przemieszczeń pionowych i poziomych. Dzięki wykorzystaniu technik satelitarnych możliwe jest zintegrowanie wyznaczania przemieszczeń poziomych i pionowych w jednym pomiarze, przy wykorzystaniu jednego instrumentarium i w jednym opracowaniu obserwacji. W takim przypadku wektor przemieszczenia punktu określony jest bezpośrednio w przestrzeni trójwymiarowej. Pomiar z wykorzystaniem systemu GPS stanowi doskonałe uzupełnienie klasycznych technik pomiarowych. W określonych warunkach mogą przewyższać metody klasycznej geodezji w zakresie dokładności. Technologia satelitarna ma przewagę nad klasycznymi metodami w zakresie szybkości pomiaru na dużych obszarach objętych badaniami. Jednakże dla określania przemieszczeń pionowych za pomocą satelitarnych technik pozycjonowania z dokładnością dorównującą niwelacji precyzyjnej potrzebne jest prowadzenie badań w zakresie redukcji błędów systematycznych propagacji sygnału GPS w atmosferze (jonosferze i troposferze) [9, 6, 22, 23] będącymi obecnie głównymi czynnikami limitującymi dokładność wyznaczeń wysokości.

Istotnym aspektem w badaniu deformacji i przemieszczeń metodami geodezyjnymi jest sposób realizacji lokalnego układu odniesienia [5, 13, 20]. W badaniach przemieszczeń i deformacji podstawowym celem nie jest wyznaczanie położenia punktów kontrolowanych, lecz określanie ich zmian. Przy wykorzystaniu klasycznych, geodezyjnych metod pomiarowych w badaniu deformacji i przemieszczeń zachodzi konieczność stabilizacji własnych punktów odniesienia w sąsiedztwie badanego obszaru. Wadą takiego podejścia jest niebezpieczeństwo, iż dany punkt referencyjny (odniesienia) znajduje się jeszcze na niestabilnym podłożu,

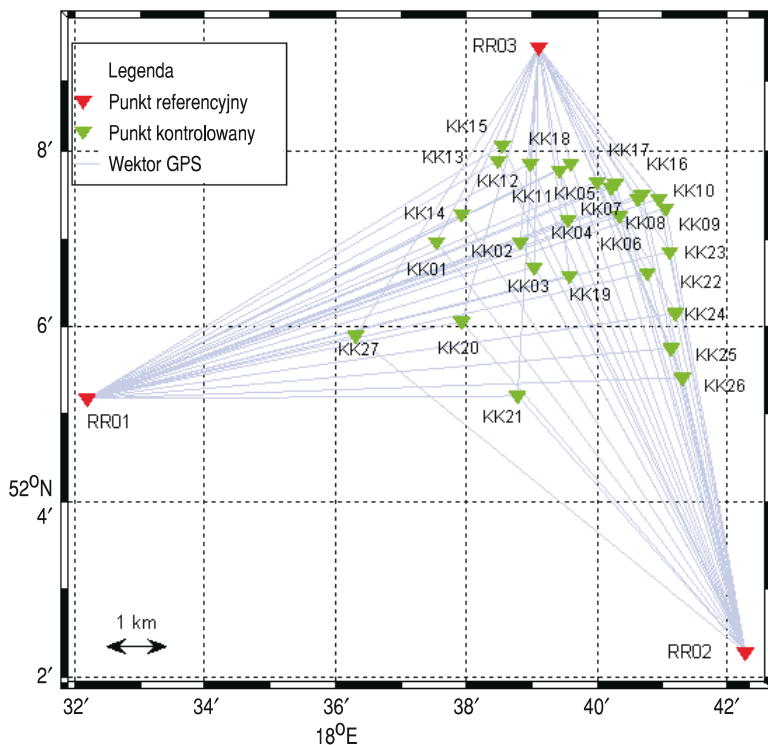
podlegającym deformacjom. Zastosowanie pomiarów GPS stwarza możliwość stabilizacji własnych punktów referencyjnych w większej odległości od badanego obiektu/obszaru i zmniejszenie prawdopodobieństwa przemieszczenia punktu referencyjnego.

3. Charakterystyka kampanii pomiarowych oraz konstrukcja sieci GPS do badania deformacji terenu

Deformacje terenu określa się poprzez wyznaczenie wskaźników deformacji, takich jak: przemieszczenia pionowe i poziome, odkształcenia poziome i pionowe, nachylenia oraz krzywizny [10]. Do określania wskaźników deformacji niezbędne jest zaobserwowanie co najmniej dwóch stanów: pierwszego w trakcie pomiaru wyjściowego (zerowego), drugiego w trakcie pomiaru okresowego (aktualnego). Wyznaczanie przemieszczeń pionowych i poziomych wykonuje się najczęściej metodami geodezyjnymi, które umożliwiają określenie przemieszczeń bezwzględnych. Pomiar przemieszczeń metodami geodezyjnymi prowadzi się w sieci kontrolnej składającej się z punktów badanych (kontrolowanych) oraz punktów odniesienia (kontrolnych, referencyjnych) [4, 5]. Konstrukcja sieci pomiarowej musi zapewnić wzajemną kontrolę obserwacji, co będzie prowadzić do wysokiego stopnia niezawodności wyznaczanych przemieszczeń, rozumianej jako odporność na wpływ błędów grubych. Na rysunku 1 przedstawiono konstrukcję sieci kontrolnej wraz z wektorami GPS poddanymi opracowaniu, wykorzystywaną w prowadzonych



Rys. 1. Sieć kontrolna do badania deformacji terenu Starego i Głównego Miasta Gdańska



Rys. 2. Sieć kontrolna do badania deformacji terenu na obszarze KWB „Adamów” S.A. w Turku

obecnie badaniach deformacji terenu na obszarze Starego i Głównego Miasta Gdańska. Sieć do badania deformacji na obszarze KWB Adamów wraz z opracowywanymi niezależnymi wektorami GPS przedstawiono na rysunku 2.

W przypadku badań prowadzonych na obszarze Starego i Głównego Miasta Gdańska analizowana sieć kontrolna składała się z czterech punktów referencyjnych oraz dwunastu punktów kontrolowanych (rys. 1). Rozmieszczenie punktów referencyjnych tylko z jednej strony badanego obszaru podyktowane jest budową geologiczną obszaru oraz geometrią wybrzeża Zatoki Gdańskiej (od strony wschodniej). Na badanym obiekcie przeprowadzonych zostało pięć kampanii pomiarowych (kampania pomiaru wyjściowego oraz cztery kampanie pomiaru okresowego) w okresie 1-4 grudnia 2006 r., 26-29 czerwca 2007 r., 9-14 czerwca 2008 r., 4-9 listopada 2008 r., 5-10 czerwca 2009 r. Dodatkowo przeprowadzono dwie kampanie niwelacji precyzyjnej w dniach 16-20 czerwca 2008 r. oraz 18-23 maja 2009 r.

Pierwsze dwie satelitarne kampanie pomiarowe zakładały przeprowadzenie na każdym z punktów kontrolowanych dwóch 12-godzinnych sesji pomiarowych, zaś trzy pozostałe kampanie trzech 8-godzinnych sesji. W ten sposób możliwe było niezależne dwu- lub trzykrotne wyznaczenie współrzędnych punktów kontrolowanych

w trakcie jednej kampanii pomiarowej. Na punktach referencyjnych obserwacje satelitarne prowadzone były przez cały okres trwania danej kampanii. Przyjęto interwał rejestracji sygnału 10 sekund oraz zerową maskę elewacji. Do pomiaru wykorzystano odbiorniki firmy Ashtech Z-Xtreme z anteną ASH701975.01A — siedem sztuk oraz Z-XII z anteną ASH700228.D — trzy sztuki. Punkty referencyjne znajdują się na stabilnym terenie na wysokości elipsoidalnej 75-95 m, zaś punkty kontrolowane 30-36 m. Undulacja geoidy na tym obszarze wynosi ok. 30 m [3, 4].

Odmienne warunki rozpoczęcia badań, jak również inna charakterystyka obszaru, były powodem przyjęcia nieco odmiennej konstrukcji sieci kontrolnej na terenie Kopalni Węgla Brunatnego „Adamów” S.A. w Turku (rys. 2). Objęcie pomiarem większego obszaru wymusiło stabilizację większej ilości punktów kontrolowanych (badanych) — 27. Jako baza odniesienia posłużyły trzy stabilizowane punkty referencyjne rozmieszczone poza obszarem oddziaływania kopalni. Na tym obszarze przeprowadzono, jak dotąd, trzy kampanie statycznych pomiarów GPS. Pierwszą kampanię pomiarową wykonano w dniach 8-13 grudnia 2008 r. Kolejne dwie kampanie w dniach 24-29 września 2009 oraz 20-25 września 2010. W pomiarach wykorzystano odbiorniki firmy Ashtech Z-Xtreme, z anteną ASH701975.01A — 7 sztuk, oraz Z-XII, z anteną ASH700228.D — 3 sztuki, jak również Topcon Hiper Pro+ ze zintegrowaną anteną — 4 sztuki. Obserwacje na punktach badanych prowadzone były z interwałem 10 s przy masce elewacji 0 stopni dwukrotnie w ciągu każdej kampanii pomiarowej z sesjami o długościach 8 godzin.

3.1. Technika centrowania anten GPS na punktach referencyjnych i kontrolowanych

Aby otrzymać najwyższe dokładności wyznaczeń w badaniach o charakterze cyklicznym, niezwykle istotne jest maksymalne zmniejszenie błędów centrowania anten odbiorników satelitarnych nad znakami pomiarowymi. W tym celu zastosowano wymuszone centrowanie anten GPS zarówno na punktach referencyjnych jak i kontrolowanych [3, 4, 19]. Na punktach referencyjnych centrowanie przeprowadzono przy wykorzystaniu spodarek przykręcanych bezpośrednio do metalowych głowic punktów, na których znajdowały się trzy repery do pomiaru wysokości anteny nad punktem (rys. 3). Wysokość anteny względem trzech reperów wyznaczana była suwmiarką z dokładnością 0,05 mm (rys. 3). Na punktach kontrolowanych centrowanie anten realizowano z użyciem specjalnie opracowanych do tego zadania przyrządów [19] (rys. 4). Przyrządy, o stałej długości około 2,220 m, ustawiano bezpośrednio na ziemnych punktach wysokościowych oraz centrowano i poziomowano z wykorzystaniem statywów geodezyjnych, na których zamontowano dodatkowe głowice nastawne. Długości wszystkich przyrządów zostały określone za pomocą niwelacji precyzyjnej z dokładnością 0,5 mm. Zastosowanie takich przyrządów umożliwia zminimalizowanie błędów centrowania oraz pomiaru wysokości anten

GPS nad znakami punktów pomiarowych i łącznie z zastosowaniem absolutnych centrów fazowych anten umożliwia osiągnięcie dużej powtarzalności wyznaczeń pomiędzy sesjami w trakcie danej kampanii pomiarowej.



Rys. 3. Pomiar wysokości anteny GPS suwmiarką, względem jednego z trzech punktów odniesienia znajdujących się w głowicy znaku punktu referencyjnego

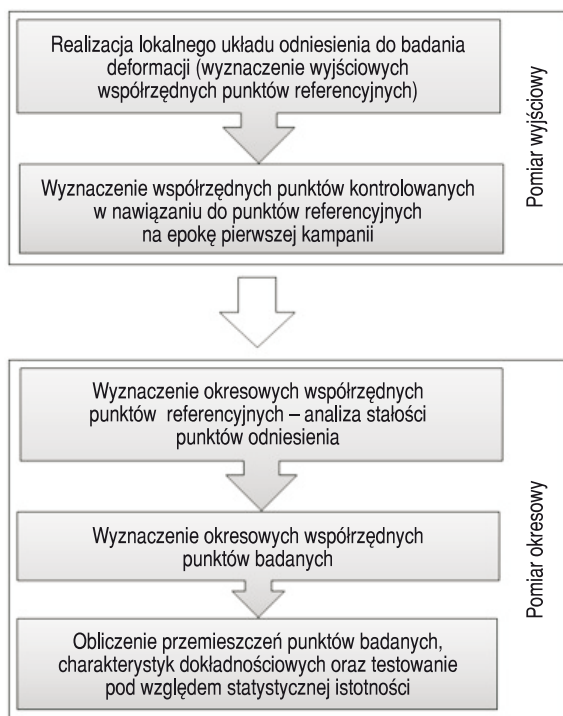


Rys. 4. Sposób ustawienia anteny GPS na punkcie kontrolowanym przy użyciu przyrządu do precyzyjnego wymuszonego centrowania anteny GPS, patent UWM nr 90-402/45/2007

4. Opracowanie obserwacji GPS

4.1. Wyznaczenie współrzędnych punktów bazy odniesienia do badania deformacji

Schemat procesu wyznaczania przemieszczeń punktów kontrolowanych na podstawie obserwacji GPS przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat procesu wyznaczania przemieszczeń punktów kontrolowanych na podstawie obserwacji GPS

Obserwacje satelitarne opracowywano przy wykorzystaniu oprogramowania Bernese 5.0 [7]. W pierwszej kampanii pomiarowej na każdym z badanych obszarów niezbędne było zastosowanie dwóch odmiennych strategii obliczeniowych do opracowania niezależnych wektorów: jednej do wyznaczenia wyjściowych współrzędnych punktów referencyjnych sieci kontrolnej oraz drugiej do wyznaczenia współrzędnych punktów kontrolowanych w nawiązaniu do tych punktów referencyjnych. W pierwszej kolejności należało wyznaczyć wyjściowe współrzędne punktów referencyjnych sieci kontrolnej (punktów bazy odniesienia) w realizacji

układu ITRF'05 na epokę pierwszej kampanii pomiarowej w nawiązaniu do permanentnych stacji sieci służby IGS (*International GNSS Service*). Nawiązanie lokalnej sieci kontrolnej do sieci stacji permanentnych pozwala na wykorzystanie produktów IGS w jej opracowaniu (np. precyzyjnych orbit, modeli jonosfery). Współrzędne punktów referencyjnych lokalnej sieci w układzie ITRF'05 na epokę pierwszej kampanii pomiarowej definiują utworzone lokalne, wysoko dokładne układy współrzędnych wykorzystywane do badania przemieszczeń, nazwane na potrzeby prowadzonych badań odpowiednio „GDANSK-2006” oraz „ADAMOW-2008”. Otrzymane współrzędne punktów referencyjnych sieci z pierwszej kampanii pomiarowej pozostawały niezmiennie przez cały okres badań (w przypadku zachowania przez nie stałości). Opracowanie obserwacji w lokalnych sieciach, w kolejnych kampaniach pomiarowych (kontrola stałości punktów referencyjnych tworzących bazę odniesienia oraz wyznaczanie okresowych współrzędnych punktów kontrolowanych) prowadzone były poprzez opracowanie obserwacji GPS w odniesieniu do współrzędnych punktów referencyjnych wyznaczonych na epokę pierwszej kampanii. Za punkty odniesienia służyły punkty referencyjne ze współrzędnymi wyznaczonymi w pierwszej kampanii pomiarowej.

Procedura opracowania kampanii obserwacyjnej w programie Bernese 5.0 wymagała przeprowadzenia następujących czynności obliczeniowych:

- import plików z elementami orientacji Ziemi — moduł POLUPD,
- import orbit precyzyjnych z formatu sp3 oraz obliczenie orbit standardowych — moduł ORBGEN,
- import i konwersja danych obserwacyjnych z formatu RINEX do formatu Bernese — moduł RXOBV3,
- synchronizacja zegarów odbiorników — moduł CODSPD,
- utworzenie niezależnych wektorów — moduł SINGDIF,
- rozwiązanie na potrójnych różnicach — eliminacja obserwacji odstających, detekcja utraconych cykli fazy i ich naprawa — moduł MAUPRP,
- wstępna estymacja parametrów modelu w module GPSEST,
- eliminacja obserwacji odstających — moduł RESRMS i SATMARK,
- rozwiązanie nieoznaczoności pomiarów fazowych metodą SIGMA — moduł GPSEST,
- finalna estymacja parametrów modelu z wykorzystaniem rozwiązanych nieoznaczoności pomiarów fazowych, zapis równań normalnych oraz współrzędnych z sesji wraz z macierzą wariancyjno-kowariancyjną — moduł GPSEST,
- ponowne wyrównanie łączne równań normalnych ze wszystkich sesji w module ADDNEQ2 lub wyrównanie współrzędnych z sesji z uwzględnieniem macierzy wariancyjno-kowariancyjnej w module COMPAR, obliczenie powtarzalności wyznaczeń współrzędnych w kampanii, otrzymanie ostatecznych współrzędnych z danej kampanii.

Strategia opracowania obserwacji GPS do wyznaczenia wyjściowych współrzędnych punktów referencyjnych zakładała dowiązanie do trzech najbliższych stacji służby IGS (Lamkówko-LAMA, Poczdam-POTS i Borowiec-BOR1 w przypadku Gdańska oraz Lamkówko-LAMA, Józefosław-JOZE, Borowiec-BOR1 w przypadku KWB „Adamów”) przy założeniu ich błędności z przyjęciem błędów położenia *a priori* na poziomie 2,5 mm dla każdej składowej (estymacja metodą najmniejszych kwadratów z warunkami nakładanymi na niewiadome). Umożliwiło to wyznaczenie niewielkich przyrostów do współrzędnych punktów odniesienia (w tym przypadku stacji IGS), a więc wprowadzenia niewielkich poprawek do współrzędnych nawiązania *a priori*. Współrzędne nawiązania punktów sieci permanentnej IGS pozyskano z oficjalnego, tygodniowego rozwiązania IGS na epokę tygodnia przeprowadzenia pierwszej kampanii pomiarowej na danym obszarze. Długości wektorów łączących punkty referencyjne lokalnej sieci kontrolnej oraz stacje służby IGS poddane opracowaniu przekraczały w każdym przypadku 100 km. Do obliczeń wykorzystano obserwacje GPS z interwałem 30 oraz 60 sekund (odpowiednio do rozwiązania *float* oraz *fixed* — ostatecznego) z maską elewacji 5 stopni oraz precyzyjne orbity satelitów, parametry ruchu obrotowego Ziemi (*Earth Orientation Parameters*) oraz absolutne modele centrów fazowych anten GPS dostarczone przez służbę IGS [8]. Do identyfikacji obserwacji odstających (pierwsze rozwiązanie *float* z nieznacznymi będącymi liczbami rzeczywistymi) wykorzystano kombinację liniową L3 — eliminującą wpływ refrakcji jonosferycznej pierwszego rzędu. W kolejnym etapie obliczeniowym przeprowadzono estymację parametrów modelu wraz z rozwiązaniem nieoznaczoności, wykorzystując kombinację liniową L5 (*wide lane*). Do rozwiązania nieoznaczoności wykorzystywano algorytm SIGMA. Następnie z wykorzystaniem rozwiązanych nieoznaczoności L5 oraz obserwacji L3 wyznaczono nieoznaczoności L1 i L2. Finalne rozwiązanie współrzędnych, z nieoznaczonościami L1 i L2 jako liczbami całkowitymi, przeprowadzono na kombinacji linowej L3.

Przeprowadzenie opracowania obserwacji wymagało użycia szeregu modeli zjawisk fizycznych. W obliczeniach wykorzystano modele efemeryd planet DE200, pływów oceanicznych OT_CSRC, nutacji IAU2000 oraz model ruchu bieguna IERS2000 i model geopotencjału JGM3. Do eliminacji wpływu opóźnienia jonosferycznego wykorzystano model jonosfery CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*). Opóźnienie troposferyczne modelowane było poprzez zastosowanie *a priori* modelu Saastamoinena z odwzorowaniem do opóźnień skośnych funkcją Dry Niell wraz z wyznaczaniem części niehydrostatycznej (mokrej) zenitalnego opóźnienia troposferycznego z interwałem jednogodzinnym poprzez zastosowanie funkcji mapującej Wet Niell. Dodatkowo w trakcie estymacji parametrów w module GPSEST wyznaczany był gradient troposfery. Ostateczne współrzędne punktów bazy odniesienia do badania deformacji na epokę pierwszej kampanii otrzymano z wyrównania łącznego równań normalnych modulem ADDNEQ2 otrzymanych z rozwiązywania każdej jednodniowej sesji pomiarowej z modułu GPSEST. Powyższa

strategia posłużyła do wyznaczenia współrzędnych punktów referencyjnych z obserwacji pozyskanych z czterech dwunastogodzinnych sesji na obszarze Gdańska oraz sześciu ośmiogodzinnych sesji na obszarze KWB „Adamów”.

Otrzymane z wyrównania błędy średnie (1-sigma) współrzędnych punktów bazy odniesienia w sieci kontrolnej na terenie Starego Miasta Gdańska z takiego opracowania zawierały się w zakresie 1,5-1,6 mm dla każdej składowej. W przypadku badań prowadzonych w KWB „Adamów” błędy średnie współrzędnych punktów referencyjnych mieściły się w zakresie 2,1-2,3 mm dla każdej współrzędnej.

4.2. Opracowanie obserwacji GPS w lokalnej sieci kontrolnej

Okresowe współrzędne punktów kontrolowanych wyznaczano na podstawie oddzielnego opracowania obserwacji w lokalnej sieci kontrolnej w każdej kampanii pomiarowej. Jako nawiązanie służyły punkty referencyjne ze współrzędnymi z opracowania pomiaru wyjściowego sieci kontrolnej na epokę pierwszej kampanii pomiarowej. Również w tym przypadku opracowywano jedynie niezależne wektory łączące punkty referencyjne z punktami badanymi (biorąc pod uwagę matematyczne korelacje występujące pomiędzy obserwacjami w danej epoce obserwacyjnej). Długości wektorów wyznaczających zawierały się w zakresie 1,0-3,2 km w przypadku badań prowadzonych na terenie Gdańska oraz 2,1-12,7 km w przypadku badań prowadzonych na obszarze KWB Adamów SA. Ze względu na niewielką długość wektorów wyznaczających do opracowania wykorzystano obserwacje kodowe i fazowe na częstotliwości L1. Na tak krótkich wektorach wyznaczających wpływ refrakcji troposferycznej oraz jonosferycznej powinien zostać w znacznym stopniu wyeliminowany poprzez tworzenie podwójnych różnic obserwacji fazowych i kodowych. W procesie wyrównania metodą najmniejszych kwadratów w module GPSEST, jako parametry wprowadzono również współrzędne punktów referencyjnych (uwzględnienie błędności punktów nawiązania), przyjmując błędy położenia *a priori* na poziomie 2 mm dla każdej współrzędnej. Do rozwiązania nieoznaczoności zastosowano metodę SIGMA. Wykorzystano precyzyjne, finalne orbity satelitów, parametry ruchu obrotowego Ziemi oraz absolutne modele centrów fazowych anten PCV (*Phase Center Variation*) z IGS [8], jak również model jonosfery z CODE. Do opracowywania wykorzystano obserwacje z satelitów GPS znajdujących się powyżej 10 stopni nad horyzontem. Ze względu na to, iż eliminacja wpływu refrakcji troposferycznej poprzez estymację zenitalnego opóźnienia troposferycznego (ZTD — *Zenith Total Delay*) w sieciach takiej wielkości nie daje satysfakcjonujących wyników (silna korelacja pomiędzy ZTD na stacjach) [23] zdecydowano się zastosować pełen model Saastamoinena z funkcją odwzorowującą Niell, nakładając mocne ograniczenia rzędu 0,1 mm na estymowane przyrosty do modelu praktycznie uniemożliwiające zmianę w stosunku do wartości *a priori*. Ostateczne współrzędne punktów kontrolowanych otrzymano z wyrównania współrzędnych

z uwzględnieniem macierzy wariancyjno-kowariancyjnej z dwóch 12-godzinnych sesji w kampaniach nr 1 i 2 oraz trzech 8-godzinnych sesji w kampaniach nr 3, 4 i 5 w przypadku badań prowadzonych na terenie Gdańska oraz dwóch 8-godzinnych sesji w przypadku badań prowadzonych na terenie KWB „Adamów”.

4.3. Analiza stałości punktów odniesienia

Przemieszczenia otrzymane metodami geodezyjnymi mają charakter bezwzględny. Bezwzględność przemieszczeń punktów określanych metodami geodezyjnymi jest zapewniona poprzez realizację stabilnego, lokalnego, zewnętrznego odniesienia założonego do badania przemieszczeń [13, 20]. Układ ten realizowany jest przez odpowiednio liczny zbiór punktów odniesienia zlokalizowanych poza obszarem występowania deformacji. Niezachowanie stałości przez punkt referencyjny, a zakwalifikowanie go do bazy odniesienia lub też błędne zdefiniowanie układu odniesienia będzie skutkowało zafałszowaniem wyników przemieszczeń. Dlatego niezwykle istotnym etapem wyznaczania przemieszczeń jest okresowa analiza stałości punktów odniesienia. Zadaniem analizy stałości punktów odniesienia jest zidentyfikowanie oraz wyeliminowanie wszystkich przemieszczonych punktów referencyjnych z bazy odniesienia do badania deformacji. Wyeliminowanie zbyt dużej liczby punktów z bazy odniesienia może prowadzić do utraty stabilności całego układu i uniemożliwić prowadzenie dalszych pomiarów przemieszczeń i deformacji na danym obszarze. Z tego względu bardzo istotna jest prawidłowa lokalizacja punktów referencyjnych w stosunku do obszaru ulegającego deformacjom.

Jednym ze sposobów analizy stałości punktów odniesienia jest wykorzystanie do tego celu wyników analizy zmian cech geometrycznych (takich jak różnice wysokości w przypadku sieci niwelacyjnych, długości, kąty, przyrosty współrzędnych) obiektów reprezentowanych przez punkty referencyjne [13, 20]. Innym sposobem rozwiązania tego zagadnienia jest badanie zmian wartości pewnej funkcji przemieszczeń pozornych. Przemieszczenia pozorne otrzymuje się w wyniku wyrównania nienarzucającego ograniczeń na kształt sieci w bazie odniesienia utworzonej przez punkty odniesienia bez uprzedniej oceny ich stałości [20]. Wyżej wymienione sposoby wymagają przeprowadzenia procesu analizy stałości punktów odniesienia przed właściwym wyrównaniem sieci i obliczeniem przemieszczeń. Odmiennym sposobem jest wykorzystanie metod estymacji odpornej do identyfikacji stałych punktów odniesienia w trakcie procesu wyrównania sieci kontrolno-pomiarowej. Sposób ten przewiduje wyrównanie iteracyjne z wykrywaniem punktów odstających i zmianę ich wag poprzez funkcje tłumienia. Wykorzystanie metod estymacji odpornej w praktycznych badaniach przemieszczeń pionowych można znaleźć w pracach [15, 16].

W prowadzonych badaniach stałość punktów referencyjnych badana jest w dwojaki sposób, każdorazowo na podstawie wyników pomiarów wyjściowego i okresowego. Jedną z metod było wykorzystanie trójwymiarowej transformacji

przez podobieństwo z wykrywaniem punktów odstających ze zbioru punktów referencyjnych. Dodatkowo kontrolę stałości punktów odniesienia prowadzono na podstawie analizy przemieszczeń pozornych punktów wyznaczonych z minimalnej bazy odniesienia (przyjmując, jako stały jeden z punktów, a wyznaczając pozostałe w nawiązaniu do niego). W trakcie badań wykryto niestabilność dwóch punktów referencyjnych w sieci założonej w Gdańsku i wyłączono je z bazy odniesienia. Przyczyną przemieszczenia się jednego z punktów było gromadzenie w jego bezpośrednim sąsiedztwie urobku z wykopów prowadzonych na pobliskiej budowie.

4.4. Określenie przemieszczeń punktów kontrolowanych

Przemieszczenia punktów kontrolowanych w prowadzonych badaniach określano metodą różnic współrzędnych w lokalnym układzie współrzędnych topocentrycznych — NEU (*North East Up*) definiowanym dla każdego z punktów kontrolowanych. Wektor przemieszczenia i -tego punktu w satelitarnym, geocentrycznym układzie kartezjańskim ECEF (*Earth Centered Earth Fixed*) oblicza się ze wzoru:

$$\begin{bmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i'' \\ Y_i'' \\ Z_i'' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_i' \\ Y_i' \\ Z_i' \end{bmatrix}, \quad (1)$$

gdzie: X_i''
 Y_i'' — okresowe (aktualne) współrzędne i -tego punktu;
 Z_i''

X_i'
 Y_i' — wyjściowe współrzędne i -tego punktu;
 Z_i'

ΔX_i
 ΔY_i — wektor przemieszczenia punktu kontrolowanego
 ΔZ_i w geocentrycznym układzie kartezjańskim.

Wektor przemieszczenia w geocentrycznym układzie kartezjańskim jest transformowany (bez zmiany skali) do lokalnego układu topocentrycznego dla każdego z punktów za pomocą wzoru [11]:

$$\begin{bmatrix} \Delta N_i \\ \Delta E_i \\ \Delta U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(B_i)\cos(L_i) & -\sin(B_i)\sin(L_i) & \cos(B_i) \\ -\sin(L_i) & \cos(L_i) & 0 \\ \cos(B_i)\cos(L_i) & \cos(B_i)\sin(L_i) & \sin(B_i) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

gdzie: $\begin{bmatrix} -\sin(B_i)\cos(L_i) & -\sin(B_i)\sin(L_i) & \cos(B_i) \\ -\sin(L_i) & \cos(L_i) & 0 \\ \cos(B_i)\cos(L_i) & \cos(B_i)\sin(L_i) & \sin(B_i) \end{bmatrix}$ — macierz obrotów elementarnych;

$\begin{bmatrix} \Delta N_i \\ \Delta E_i \\ \Delta U_i \end{bmatrix}$ — wektor przemieszczenia w lokalnym układzie współrzędnych horyzontalnych dla danego punktu badanego.

Otrzymane wartości błędów średnich okresowych i wyjściowych współrzędnych punktów kontrolowanych służą do obliczenia błędów średnich przemieszczeń punktów dla każdej składowej, korzystając z prawa przenoszenia się błędów średnich Gaussa (na przykładzie przemieszczeń pionowych) [2, 23]:

$$m_{\Delta U_i} = \sqrt{m_{\Delta U_i}^{\prime 2} + m_{\Delta U_i}^{\prime\prime 2}}. \quad (3)$$

Wyniki przemieszczeń interpretowane są pod względem ich statystycznej istotności przy założeniu stopnia ufności 95% na podstawie wzorów (na przykładzie składowej pionowej wektora przemieszczenia):

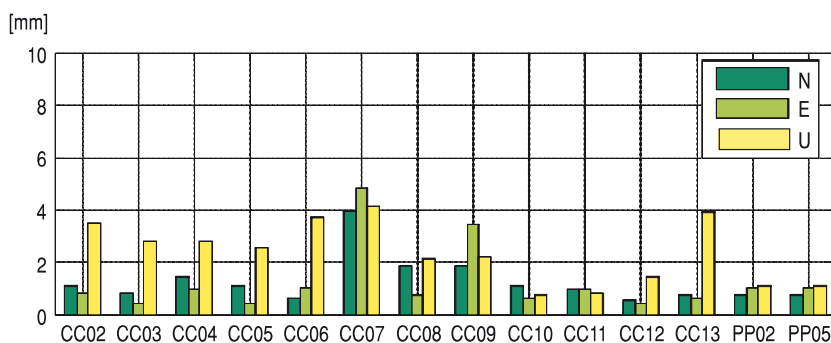
$$|\Delta U_i| \leq k \times m_{\Delta U_i}. \quad (4)$$

Wartość współczynnika k została określona na poziomie $k = 2$, przyjmując poziom ufności testu 95%. W przypadku spełnienia warunku (4) składowa przemieszczenia punktu badanego zostanie uznana za nieistotną ze statystycznego punktu widzenia.

5. Dokładności wyznaczeń współrzędnych punktów w sieci kontrolnej otrzymane z wykorzystaniem prezentowanej technologii/metodyki

Założeniem, w prowadzonych badaniach, jest osiągnięcie dokładności wyznaczeń okresowych współrzędnych punktów kontrolowanych nie gorszych niż 3 mm w przypadku współrzędnych poziomych oraz 6 mm w przypadku wysokości [4]. W każdej kampanii pomiarowej otrzymano wartości błędów średnich współrzędnych

(1-sigma) z wyrównania mieszczące się w zakładanych wartościach. Mając na uwadze, że wartości błędów średnich otrzymane z wyrównania łącznego wszystkich sesji w kampanii mogą nie odpowiadać rzeczywistym dokładnościom, obliczono również powtarzalność wyznaczeń współrzędnych punktów kontrolowanych w każdej kampanii pomiarowej. Powtarzalność obliczono na podstawie wyrównania współrzędnych z uwzględnieniem ich macierzy wariancyjno-kowariancyjnej z dwóch lub trzech niezależnych sesji w danej kampanii pomiarowej. Tak obliczone wartości błędów średnich mogą być bliższe rzeczywistym wartościom dokładności okresowych współrzędnych. Na podstawie znajomości błędów średnich współrzędnych punktów kontrolowanych z kampanii wyjściowej oraz okresowej można obliczyć błędy średnie poszukiwanych przemieszczeń punktów z wykorzystaniem prawa przenoszenia się błędów średnich obserwacji niezależnych (wzór 3). Na wykresie (rys. 6) przedstawiono powtarzalności wyznaczeń współrzędnych punktów kontrolowanych otrzymane w ostatniej kampanii pomiarowej przeprowadzonej na obszarze Gdańska.



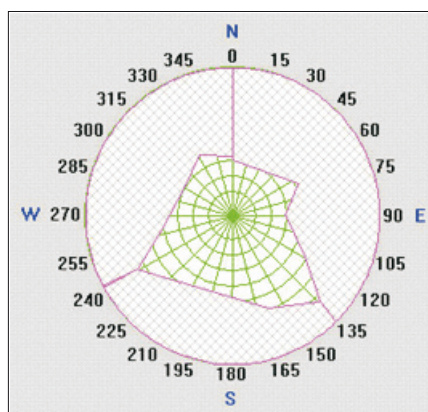
Rys. 6. Powtarzalność wyznaczeń współrzędnych punktów pomiędzy sesjami w piątej kampanii pomiarowej na obszarze Starego i Głównego Miasta Gdańska

Pomiary prowadzone na punktach sieci kontrolnej w Gdańsku są utrudnione ze względu na występowanie wielu zasłon terenowych ograniczających widoczność satelitów. Pomimo tego, tylko dla jednego z punktów kontrolowanych (CC07) powtarzalność współrzędnych poziomych była gorsza niż 2 mm, a wysokości niż 4 mm. Na pozostałych punktach osiągnięto powtarzalności nieprzekraczające tych wartości. Punkt CC07 charakteryzuje się występowaniem szczególnie trudnych warunków obserwacyjnych — znacznie zakryty horyzont okolicznymi kamienicami Starego Miasta Gdańska (rys. 7, rys. 8).

Na obszarze KWB „Adamów” osiągnięto nieznacznie lepsze rezultaty pod względem dokładności pomimo dłuższych wektorów wyznaczających dochodzących do ok. 13 km. Dla prawie wszystkich punktów kontrolowanych powtarzalność wyznaczeń wysokości w ostatniej kampanii pomiarowej była mniejsza niż 3 mm.

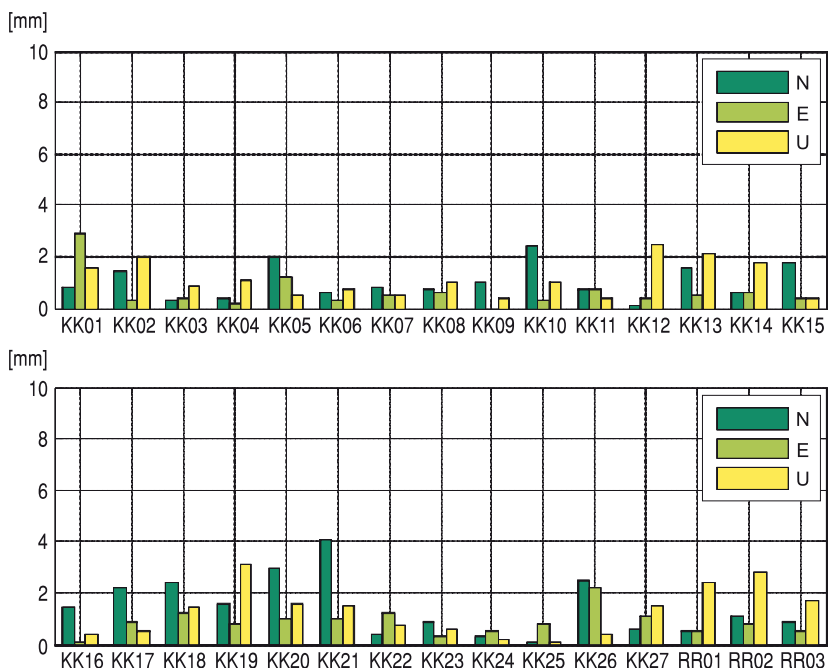


Rys. 7. Utrudnione warunki obserwacyjne na punkcie kontrolowanym CC07 w Gdańsku



Rys. 8. Ograniczony zasłonami horyzont na punkcie kontrolowanym CC07 w Gdańsku

Główną tego przyczyną są znacznie lepsze warunki obserwacyjne do przeprowadzenia pomiarów satelitarnych (brak zasłon terenowych, odkryty horyzont). Na poniższych wykresach przedstawiono przykładowe wyniki powtarzalności otrzymane w ostatniej kampanii pomiarowej przeprowadzonej na obszarze KWB „Adamów” S.A. (rys. 9).



Rys. 9. Powtarzalność wyznaczeń współrzędnych punktów pomiędzy sesjami w trzeciej kampanii pomiarowej na obszarze KWB „Adamów” S.A.

6. Podsumowanie

Zaprezentowana koncepcja określania wskaźników deformacji powierzchni terenu, takich jak przemieszczenia poziome i pionowe, przy wykorzystaniu pomiarów satelitarnych umożliwia osiąganie wysokich dokładności wyznaczeń okresowych współrzędnych poziomych i wysokości punktów sieci kontrolnej, a co za tym idzie przemieszczeń punktów. Na podstawie przeprowadzonych kampanii pomiarowych można wnioskować, iż zastosowana strategia opracowania obserwacji GPS jednocześnie z technologią pomiarów terenowych (m.in. precyzyjne centrowanie anten GPS z wykorzystaniem opatentowanych przyrządów) pozwala na uzyskiwanie błędów średnich okresowych współrzędnych punktów kontrolowanych nie większych niż 2-3 mm dla każdej składowej. Otrzymane dokładności wyznaczeń wysokości punktów w analizowanych sieciach dorównują, a nawet przewyższają dokładnościom otrzymanym z geometrycznej niwelacji precyzyjnej II klasy (średni błąd pomiaru niwelacji po wyrównaniu 2 mm/km). Niewątpliwie istotnym czynnikiem przemawiającym za wykorzystaniem pomiarów GPS w precyzyjnych badaniach deformacji jest aspekt ekonomiczny. Przy większych rozmiarach sieci kontrolnej, tak jak w przypadku KWB „Adamów” S.A. w Turku, wyznaczanie przemieszczeń pionowych przy wykorzystaniu niwelacji precyzyjnej oraz przemieszczeń poziomych

za pomocą klasycznych pomiarów kątoowo-liniowych pochłonęłoby większą ilość czasu, a co za tym idzie wzrosłyby koszty wykonania pomiarów. Największą przewagą zastosowania pomiarów GPS jest jednoczesne określanie przemieszczeń poziomych i pionowych — wyznaczanie wektorów przemieszczeń punktów kontrolowanych w przestrzeni trójwymiarowej. Dodatkowo dzięki zastosowaniu pomiarów satelitarnych GPS możliwe jest zlokalizowanie punktów bazy odniesienia w większej odległości od obszaru podlegającego deformacjom, a co za tym idzie zmniejszenie prawdopodobieństwa przemieszczenia się tych punktów.

Artykuł wpłynął do redakcji 11.05.2011 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lipcu 2011 r.

LITERATURA

- [1] M. AMORE, A. BONACCORSO, F. FERRARI, M. MATTIA, *Eolo: software for the automatic on-line treatment and analysis of GPS data for environmental monitoring*, Computers & Geosciences, 28, 2002, 271-280.
- [2] L.W. BARAN, *Teoretyczne podstawy opracowania wyników pomiarów geodezyjnych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1999.
- [3] R. BARYŁA, S. OSZCZAK, J. PAZIEWSKI, P. WIELGOSZ, *Analiza deformacji terenu na Obszarze Starego i Głównego Miasta Gdańska wyznaczonych za pomocą techniki GPS — wyniki z pięciu kampanii pomiarowych*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, 129, 2009, 3-8.
- [4] R. BARYŁA, S. OSZCZAK, P. WIELGOSZ, B. KOCZOT, *Koncepcja wykorzystania technologii GPS do badania deformacji powierzchni ziemi na terenach miejskich*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, 129, 2009, 9-17.
- [5] H. BRYŚ, S. PRZEWOŁOCKI, *Geodezyjne metody pomiarów przemieszczeń budowli*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1998.
- [6] J. BOSY, A. BORKOWSKI, *Troposphere modelling in local GPS network*, EUREF Publication, 15, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie Band, 38, 2006, 356-362.
- [7] R. DACH, U. HUGENTOBLE, P. FRIDEZ, M. MEINDL, *Bernese GPS software version 5.0*, Astronomical Institute University of Bern, Bern, 2007.
- [8] J.M. DOW, R.E. NEILAN, C. RIZOS, *The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems*, Journal of Geodesy, 83, 2009, 191-198.
- [9] M. FIGURSKI, P. WIELGOSZ, J. BOSY, *Reduction of ionospheric refraction in local geodynamic networks*, Reports on Geodesy, 8 (54), 2003, 75-79.
- [10] W. GÓRAL, J. SZEWCZYK, *Zastosowanie technologii GPS w precyzyjnych badaniach deformacji*, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 2004.
- [11] B. HOFMANN-WELLENHOF, H. LICHTENEGGER, E. WASLE, *GNSS — Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, GALILEO and more*, Springer, Wien–New York, 2008, 516.
- [12] J.O. LANGBEIN, *Deformation of the Long Valley Caldera, California: inferences from measurements from 1988 to 2001*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 127, 2003, 247-267.
- [13] T. LAZZARINI, *Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia*, Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych, Warszawa, 1977.

- [14] J.L. MOSS, *Using the Global Positioning System to monitor dynamic ground deformation networks on potentially active landslides*, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2, 1, 2000.
- [15] Z. MUSZYŃSKI, K. MAKOLSKI, E. OSADA, *Zastosowanie metod estymacji odpornej w geodezyjnych pomiarach pionowych przemieszczeń obiektów budowlanych*, Geodesia et Descriptio Terrarum, 4 (1), 2005, 85-97.
- [16] E. OSADA, K. SERGIEIEVA, *Metody wyrównywania sieci wysokościowych z jednoczesnym wykrywaniem odstających punktów dostosowania*, Magazyn Geoinformacyjny Geodeta, 11 (174), 2009.
- [17] S. OSZCZAK, A. WASILEWSKI, Z. RZEPECKA, A. SZOSTAK-CHRZANOWSKA, A. CHRZANOWSKI, *Ten Years of deformation study and proposed research program for the area of Polish copper basin*, Proceedings 11th International Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 25-28 May 2003.
- [18] M. PALANO, G. PUGLISI, S. GRESTA, *Ground deformation patterns at Mt. Etna from 1993 to 2000 from joint use of InSAR and GPS techniques*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 169, 2008, 99-120.
- [19] Patent UWM W-116942, *Przyrząd do precyzyjnego wymuszonego centrowania anten GPS*, 2007.
- [20] W. PRÓSZYŃSKI, M. KWAŚNIAK, *Podstawy geodezyjnego wyznaczania przemieszczeń*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2006.
- [21] J. WANG, J. GAO, CH. LIU, J. WANG, *High precision slope deformation monitoring model based on the GPS/Pseudolites technology in open-pit mine*, Mining Science and Technology, 20, 2010, 0126-0132.
- [22] P. WIELGOSZ, S. CELLMER, Z. RZEPECKA, J. PAZIEWSKI, D.A. GREJNER-BRZEZIŃSKA, *Troposphere modeling for precise GPS rapid static positioning in mountainous areas*, Measurement Science and Technology, 22, 42, 2011.
- [23] P. WIELGOSZ, J. PAZIEWSKI, R. BARYŁA, *On constraining zenith tropospheric delays in processing of local GPS networks with Bernese software*, Survey Review (w druku) 2011.

R. BARYŁA, J. PAZIEWSKI

Principles of the ground deformation monitoring technology based on GPS satellite measurements in control network

Abstract. Determination of deformation indices, like vertical and horizontal displacements, requires high precision geodetic surveys. In the classic surveying, the precise, geometrical leveling is commonly used in order to determine vertical displacements and angle-distance measurements in control network in order to determine horizontal displacements. The paper presents the main principles and steps of precise determination of the 3-D displacements with the use of GPS technology. The technology of field measurements together with the construction of the control network and the observation processing methodology is presented. The emphasis was put on the data post-processing strategy in precise, local satellite networks. The presented achievable accuracy is confirmed after several years of the experience gained during field campaigns at the open pit mine Adamów and the Main and Old City of Gdańsk. The results show that it is possible to achieve 2-3 mm accuracy 3-D coordinates of the monitored points. This in turn allows for high accuracy deformation monitoring.

Keywords: geodesy and cartography, ground deformation, GPS

