

Zastosowanie mobilnych pomiarów satelitarnych do określania położenia wysokościowego torów

Cezary Specht, Władysław Koc, Piotr Chrostowski, Jacek Szmagliński, Marcin Skóra, Mariusz Specht



Prof. dr hab. inż. Cezary Specht
Akademia Morska, Wydział
Nawigacyjny
c.specht@geodezja.pl



Dr inż. Piotr Chrostowski
Politechnika Gdańska, Wydział
Inżynierii Lądowej i Środowiska
piotrchrost@gmail.com



mgr inż. Marcin Skóra
Akademia Marynarki Wojennej
w Gdyni, Instytut Nawigacji i
Hydrografii Morskiej
inim@amw.gdynia.pl



Prof. dr hab. inż. Władysław Koc
Politechnika Gdańska, Wydział
Inżynierii Lądowej i Środowiska
kocwl@pg.gda.pl



mgr inż. Jacek Szmagliński
Politechnika Gdańska, Wydział
Inżynierii Lądowej i Środowiska
jacszmag@pg.gda.pl



Inż. Mariusz Specht
mariuszspecht1992@gmail.com

W połowie 2008 roku nastąpiło uruchomienie naszym kraju Aktywnej Sieci Geodezyjnej ASG-EUPOS [7, 11]. Na początku 2009 roku w Politechnice Gdańskiej i Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni został utworzony interdyscyplinarny zespół naukowy zajmujący się pomiarami satelitarnymi linii kolejowych oraz dostosowanym do tej techniki pomiarowej projektowaniem ich układów geometrycznych. Opracowana przez zespół technika mobilnych pomiarów satelitarnych GNSS umożliwia uzyskanie odpowiedniej efektywności pomiaru, pozwalającej na precyzyjne odwzorowanie elementów geometrycznych trasy. Bezsprzecznie po zrealizowaniu pierwszych badań na odcinku linii kolejowej Kościerzyna – Kartusy (linie 201 i 214), ich wyniki zostały zaprezentowane na II Konferencji Naukowo-Technicznej „Projektowanie, Budowa i Utrzymanie Infrastruktury w Transporcie Szynowym INFRASZYN 2009” [5].

Kolejne kampanie pomiarowe zostały przeprowadzone w 2010 roku na odcinku Gdańsk Główny – Gdańsk Zaspas Towarowa (linia 249) oraz na trasie Gdańsk Osowa – Somonino (linia 201). W 2012 i 2013 roku zrealizowano pomiary satelitarne linii tramwajowych w Gdańsku. Najnowsze badania odbyły się w czerwcu 2015 roku i objęły całość nowo wybudowanej linii Pomorskiej Kolei Metropolitalnej. Do wyznaczenia współrzędnych przebiegu trasy wykorzystywano różne konfiguracje fazowych odbiorników GNSS, zmianie ulegała ich liczba oraz sposób rozmieszczenia na platformie pomiarowej, a sama metodyka prowadzenia badań była poddawana ciągłej weryfikacji [9, 10].

Idea mobilnych pomiarów satelitarnych polega m.in. na realizacji pomiarów geodezyjnych podczas ruchu platformy pomiarowej z zamontowanymi na niej geodezyjnymi odbiornikami satelitarnymi GNSS (GPS – USA,

Glonass – Rosja i Beidou – Chiny), optymalizacji planowania konstelacji satelitów oraz zastosowania naziemnych korekcyjnych sieci satelitarnych (ASG-EUPOS, LeicaSmartNet), jak i pomiary w czasie rzeczywistym z częstotliwością 20 Hz. Rejestracja współrzędnych w układzie WGS-84 (możliwa obecnie nawet z częstotliwością 20 Hz) pozwala na wyznaczenie przebiegu pokonanej trasy, który to przebieg określa z kolei kształt mierzonego toru w płaszczyźnie poziomej i pionowej.

Pojazd szynowy (platforma pomiarowa) powinien charakteryzować się odpowiednią konstrukcją, zapewniającą ściśle wpisywanie się w tor oraz wyznaczanie korekt położenia osi toru wynikających z różnic wysokości toków szynowych. Traktując te założenia jako docelowe, w pierwszych etapach badań postanowiono wykorzystać istniejące możliwości i zastosować eksploatowane pojazdy szynowe lub ich elementy (wózki dwuosiowe). Jak się okazało, nawet takie prowizoryczne rozwiązania doprowadziły do potwierdzenia skuteczności proponowanej metody pomiarowej. W pomiarach przeprowadzonych na liniach kolejowych w latach 2009 ÷ 2010 wykorzystywano przyczepę (wagon-platformę) PWM-15 oraz ciągnik szynowy WM-15, na liniach tramwajowych i linii Pomorskiej Kolei Metropolitalnej stosowano wózki przedwojennego tramwaju serii 300.

Jak dotąd, w głównym stopniu skupiano się na praktycznym wykorzystaniu pomierzonych współrzędnych osi toru w płaszczyźnie poziomej. Ponieważ uzyskiwana w tej płaszczyźnie dokładność okazała się w zupełności wystarczająca dla celów projektowych, opracowywano odpowiednie algorytmy obliczeniowe oraz programy wspomagające projektowanie [4, 5]. Współrzędne wysokościowe znajdowały się poza zakresem zainteresowania, gdyż były traktowane jako element niezwiązany bezpo-

średnio z projektowaniem przebiegu trasy, który ewentualnie mógłby się okazać przydatny w diagnozowaniu geometrii toru. Jednak kwestia ta wymaga jeszcze wyjaśnienia; z uwagi na wymaganą bardzo dużą precyzję pomiarów należałoby sprawdzić, na jaką dokładność można liczyć na obecnym etapie rozwoju omawianej techniki pomiarowej. Niniejsze opracowanie służy właśnie wyjaśnieniu tej kwestii, w odniesieniu do pomierzonych rzędnych wysokościowych.

Możliwości dalszego zwiększenia uzyskiwanej dokładności pomiarów satelitarnych

W badaniach inwentaryzacyjnych dróg szynowych przeprowadzonych w latach 2009 ÷ 2012 wykorzystywano polską aktywną satelitarną sieć geodezyjną ASG-EUPOS, realizując pomiary zarówno w czasie rzeczywistym, jak i w postprocessingu. Ogólnie rzecz biorąc usługi tej sieci zapewniają dokładności na poziomie 3 cm (horyzontalnie) oraz 5 cm (wertykalnie), przy wykorzystaniu korekt pomiarów satelitarnych dla systemu GPS.

Jednakże od 2012 roku w województwie pomorskim funkcjonuje prywatna satelitarna sieć geodezyjna – Leica SMART-NET, oferująca korekty do dwóch systemów GNSS: GPS i Glonass. Dzięki temu – na podstawie przeprowadzonych pomiarów – dokładność wyznaczania współrzędnych w czasie rzeczywistym można wstępnie szacować na poziomie 1 cm (horyzontalnie) oraz 2 cm (wertykalnie). Dodatkowym atrybutem tego rozwiązania jest możliwość wykorzystania sieci na akwenie Zatok Gdańskich.

Istota działania sieci Leica-SmartNet jest zbliżona do państwowej sieci ASG-EUPOS, z tą jednak zasadniczą różnicą, iż poprawki do

stacji wirtualnej transmitowane są zarówno do systemu satelitarnego GPS (jak w przypadku ASG-EUPOS), jak i do rosyjskiego systemu GNSS Glonass. W ten sposób zwiększa się blisko dwukrotnie liczbę dostępnych satelitów, co w terenie zabudowanym ma kluczowy wpływ na dokładność wyznaczeń oraz znacząco wpływa na podniesienie dostępności pozycji o wysokiej precyzji. Poprawki RTK umożliwiają wykonywanie pomiarów przez dwuczęstotliwościowe odbiorniki geodezyjne z dokładnością do 2 cm w poziomie i do 4 cm w pionie (oficjalne dane firmy Leica). Są one przesyłane przez sieć stacji referencyjnych, a uzyskiwana dokładność w terenie nie zależy od odległości do najbliższej stacji referencyjnej, jak miało to miejsce w klasycznym rozwiązaniu RTK. Poprawki są przesyłane w standardowym formacie (RTCM) z częstotliwością 1 sekundy.

Najmniejsza sieć RTK powinna składać się z zalecanego minimum pięciu stacji referencyjnych (nie ma tutaj górnej granicy), oddległych od siebie maksymalnie o 50 km. Zasada działania sieci RTK opiera się na współpracy kilku stacji referencyjnych, które stale przysyłają wyniki pomiarów satelitarnych (GPS/Glonass) do głównego serwera wyposażonego w specjalistyczne oprogramowanie do obsługi – Leica GNSS Spider. Celem sieci RTK jest zminimalizowanie wpływu błędów zależnych od odległości, które mają wpływ na obliczoną pozycję ruchomego odbiornika znajdującego się w granicach sieci. Oprogramowanie serwera sieci SmartNet realizuje to zadanie poprzez obliczenie pełnej liczby cykli fazowych satelitów obserwowanych przez stację referencyjną znajdującą się w sieci oraz wykorzystanie danych pochodzących z kilku (najlepiej z wszystkich) stacji referencyjnych w celu wygenerowania poprawek, które są wysyłane do odbiornika ruchomego.

Spadek dokładności wynika z błędów zależnych od odległości – głównie błędów spowodowanych zjawiskami atmosferycznymi. Zasadniczo, wraz ze wzrostem odległości między odbiornikiem ruchomym a stacją bazową warunki atmosferyczne w miejscu ustawienia stacji i lokalizacji odbiornika będą się coraz bardziej różnić. Powoduje to obniżenie dokładności wyznaczenia pozycji i sprawia, że określenie pozycji staje się coraz trudniejsze.

Metodyka oceny dokładności w odniesieniu do pomierzonego układu geometrycznego

Układ geometryczny drogi szynowej składa się z odcinków prostych oraz łuków o stałej i zmiennej krzywiznie w płaszczyźnie poziomej oraz odcinków o jednostajnym pochyleniu i łukowych łuków wyokrągających w płaszczyźnie pionowej. Zarówno odcinki proste, jak też odcinki o jednostajnym pochyleniu są jednoznacznie zdefiniowane pod względem geometrycznym, dlatego też ocena ich kształtu, wyznaczonego z pomiarów satelitarnych, może stanowić podstawę określenia uzyskiwanej dokładności. Odpowiednia metodyka postępowania w odniesieniu do nierówności poziomych została opisana w pracy [4]. Analogiczne podejście zostało zastosowane również przy określaniu położenia wysokościowego torów.

Przygotowanie danych do analizy

Pomierzone współrzędne punktów trasy w układzie WGS-84 zostały przetransformowane do Państwowego Układu Odniesień Przestrzennych (układu współrzędnych) 2000. W analizie dokładności mobilnych pomiarów satelitarnych w płaszczyźnie pionowej podstawę oceny stanowią będą dane z odcinków testowych, położonych na odcinkach prostych toru i charakteryzujących się jednostajnym pochyleniem podłużnym. Stworzenie zbioru odcinków testowych dla poszczególnych kampanii pomiarowych stanowi pierwszy etap pracy. Proces wyselekcjonowania odcinków testowych przeprowadzono w programie SATTRACK, w module TRACK_VIS [3], w którym możliwe jest wyodrębnianie punktów z konkretnych obszarów pomierzonej trasy i zapisywanie ich w oddzielnych plikach przeznaczonych do dalszej analizy.

Transformacja odcinków prostych (w płaszczyźnie poziomej)

Dla każdego odcinka testowego otrzymany na drodze pomiaru sygnał $X(Y)$ poddano transformacji do układu lokalnego. W tym celu przeprowadzono najpierw aproksymację liniową punktów trasy w płaszczyźnie poziomej, a następnie dokonano przejścia do układu $X_1(Y_1)$ – rys. 1. Polega to na tym, że wychodząc z równania $X = A_1 + B_1 Y$, przesuwamy równoległe oś Y o wartość wyrazu wolnego A_1 i następnie dokonujemy jej obrotu o taki kąt δ , aż pokryje się ona z kierunkiem głównym naszej trasy. Ideę opisaną transformacją pokazano na rysunku 1. Wartość kąta obrotu δ wynika ze współczynnika nachylenia B_1 rozpatrywanej prostej. Dla $B_1 > 0$, kąt $\delta = \arctan B_1$ obowiązują następujące

formuły transformacyjne [6]:

$$Y_1 = Y \cos \delta + (X - A_1) \sin \delta \quad (1)$$

$$X_1 = -Y \sin \delta + (X - A_1) \cos \delta \quad (2)$$

Dla $B_1 < 0$ kąt $\delta = \pi + \arctan B_1$; w związku z obrotem układu w prawo

$$Y_1 = Y \cos \delta - (X - A_1) \sin \delta \quad (3)$$

$$X_1 = Y \sin \delta + (X - A_1) \cos \delta \quad (4)$$

Z tego względu na znaczny rząd wartości odciętych Y_1 w układzie Y_1, X_1 , wygodniej będzie operować w układzie lokalnym Y_{lok}, X_1 , w którym punkt początkowy będzie miał odciętą zerową. Wartości Y_{lok} wyznaczają położenie punktów pomiarowych na długości rozpatrywanego odcinka toru. Przygotowanie otrzymanego sygnału $X_1(Y_{lok})$ do dalszej analizy wymaga jeszcze interpolacji wartości X_1 w dostosowaniu do stałego kroku Y_{lok} .

Transformacja odcinków o jednostajnym pochyleniu (w płaszczyźnie pionowej)

Analogicznych transformacji dokonuje się dla sygnału współrzędnej pionowej Z , której wartości związane są na tym etapie z odciętą Y_{lok} . W wyniku owych transformacji sygnał wysokościowy odcinka o jednostajnym pochyleniu przedstawiony jest w lokalnym układzie współrzędnych, w którym oś odciętych pokrywa się z prostą $Z = A_2 + B_2 Y_{lok}$ wyznaczoną metodą najmniejszych kwadratów. Ideę tej transformacji pokazano na rysunku 2.

Analogicznie jak poprzednio, transformacji współrzędnych można dokonać używając następujących formuł [6]:

Dla $B_2 > 0$, kąt $\gamma = \arctan B_2$

$$L = Y_{lok} \cos \gamma + (Z - A_2) \sin \gamma \quad (5)$$

$$H = -Y_{lok} \sin \gamma + (Z - A_2) \cos \gamma \quad (6)$$

Dla $B_2 < 0$ kąt $\gamma = \pi + \arctan B_2$; w związku z obrotem układu w prawo

$$L = Y_{lok} \cos \gamma - (Z - A_2) \sin \gamma \quad (7)$$

$$H = Y_{lok} \sin \gamma + (Z - A_2) \cos \gamma \quad (8)$$

Wykonując dla wyselekcjonowanych odcinków testowych powyższe transformacje otrzy-



1. Idea przeprowadzonej transformacji układu współrzędnych w płaszczyźnie poziomej



2. Idea przeprowadzonej transformacji układu współrzędnych w płaszczyźnie pionowej

mano zestaw odcinków prostych o stałych nachyleniach. Sygnały do analizy określone zostały w lokalnych układach L, H , które można zinterpretować jako wysokość względną toru w funkcji długości pomierzonego toru.

Jeśli pomiar odbywałby się po torze ukształtowanym w sposób idealny (z określoną dokładnością nierówności pionowych), to zarejestrowane wartości sygnału reprezentowałyby błąd pomiarowy; pozwoliłoby to określić dokładność prezentowanej metody z punktu widzenia kryterium wysokościowego. W praktyce jednak sytuacja wygląda tak, że w wyniku eksploatacji oraz procesów technologicznych, mających na celu utrzymanie toru, jego oś ulega deformacji.

Należy zatem spodziewać się, że pomierzony sygnał sprowadzony do omawianego układu (po transformacji) będzie reprezentował zarówno deformację osi toru w stosunku do założeń projektowych, jak też błąd pomiarowy. W związku z tym otrzymany sygnał trzeba jeszcze poddać analizie w celu sprawdzenia możliwości odfiltrowania pewnych składowych, które można uznać jako spowodowane zjawiskami pobocznymi, nie mającymi bezpośredniego związku z kształtem mierzonego toru.

Filtrowanie sygnału

Szczegółowa analiza uzyskanego sygnału pomiarowego (po przedstawionych wcześniej przekształceniach) prowadzi do wniosku, że zarejestrowany został nie tylko kształt toru w płaszczyźnie pionowej, który charakteryzuje się – z założenia – bardzo łagodnymi pochyleniami podłużnymi, ale również pewien sygnał będący skutkiem błędów związanych z techniką pomiarową. W celu określenia poziomu odniesienia związanego z torem kolejowym wykorzystano filtrowanie sygnału w dziedzinie liczby falowej f [1/m] polegającej na odcieciu wyższych liczb falowych wraz z zarejestrowanym szumem [13]. Założenie o konieczności odfiltrowania pewnej części sygnału wynika z faktu, że sztywność nawierzchni kolejowej nie pozwala zaistnieć krótkim falam deformacji toru. Jako że sygnał do analizy jest sygnałem dyskretnym, zastosowano tzw. dyskretną transformację Fouriera ciągu próbek pomiarowych, opisaną wzorem:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} nk}, \quad k = 0, \dots, N-1$$

(9)

gdzie:

X – wynik transformacji,

x – próbki sygnału.

Współczesne algorytmy rozwiązywania tego problemu pozwalają na znaczne skrócenie czasu obliczeń. Najpopularniejszym algorytmem jest szybka transformacja Fouriera o podstawie 2. Zmniejsza on liczbę operacji z $O(N^2)$ do $O(N \log 2N)$. Jednak aby móc wykorzystać ten algorytm, należało wcześniej przygotować wektor danych nadając mu odpowiedni rozmiar; mianowicie liczba próbek powinna wynosić 2^k , gdzie k jest pewną liczbą naturalną.

W celu przeprowadzenia analizy sygnału w dziedzinie liczb falowych posłużono się środowiskiem Scilab [12], w bibliotekach którego znajdują się funkcje obliczające transformatę

Fouriera oraz transformację odwrotną do dziedziny wyjściowej. Napisany skrypt bazował na następującym algorytmie:

- wczytaj macierz sygnału pomiarowego (z pliku tekstowego),
- rozszerz macierz do rozmiaru 2^k wstawiając w dodatkowe komórki zero,
- utwórz wektor częstotliwości bazując na częstotliwości próbkowania sygnału,
- wykonaj FFT i wyświetl uzyskaną transformatę,
- określ parametr filtru dolnoprzepustowego i dokonaj filtrowania transformaty,
- wykonaj odwrotną transformację sygnału poddanego filtracji i wyświetl wynik na tle sygnału pierwotnego.

Jeśli założymy, że odfiltrowany sygnał przybliżył nas do rzeczywistego kształtu toru w płaszczyźnie pionowej, wówczas różnice pomiędzy sygnałem nieodfiltrowanym i odfiltrowanym będą stanowiły miarę błędu pomiarowego.

Ocena dokładności pionowej

Dla każdej serii pomiarowej określono położenie hipotetycznej linii niwelety przez odfiltrowanie wysokich liczb falowych, z zastosowaniem szybkiej transformacji Fouriera (FFT). Odcięte wartości transformaty zarezerwowano jako błąd pomiaru nie powiązany z kształtem rzeczywistym toru. Wówczas po dokonaniu odwrotnej transformacji Fouriera otrzymano właściwe położenie punktów pomiarowych H_{kor} . Próg odcięcia wyznaczono na 0,1 1/m (rys. 3). Jako wartość błędu pomiarowego przyjęto różnicę

$$\Delta H = |H - H_{kor}| \quad (10)$$

Należy zauważyć, że przyjmując mniejsze wartości progów odcięcia, odcina się z sygnału więcej składowych danej fali, co powoduje zwiększanie wartości zdefiniowanej powyżej miary błędu ΔH .

Wyniki przeprowadzonej analizy

Analizując wartości błędu wyznaczania współrzędnej wysokościowej, przeanalizowano 72 odcinki proste o jednostajnych pochyleniach. Zróżnicowana liczba odcinków testowych w poszczególnych latach wynikała z charakterystyki rozpatrywanych odcinków oraz z liczby pracujących odbiorników satelitarnych. Liczbę odcinków testowych przyjętych do analizy pokazano w tabeli 1.

Stosując przedstawioną wcześniej metodę postępowania, dla każdego odcinka testowego wyznaczono wartości średnie i odchylenia standardowe parametru. Na rysunku 4 przedstawiono histogram błędu ΔH wraz z podaną wartością średnią i odchyleniem standardowym dla przykładowego odcinka testowego z kampanii pomiarowej 2009, zaś na rysunku 5 – z kampanii pomiarowej 2015. Zgodnie z przyjętą konwencją, histogramy te przedstawiają rozkład wartości bezwzględnych błędu pomiarowego.

Ostateczny rezultat przeprowadzonej analizy stanowią wartości podstawowych statystyk: średnia arytmetyczna $\overline{\Delta H}$ i odchylenie standardowe $\sigma \Delta H$ określone dla wszystkich od-

cinków testowych w poszczególnych latach, w których prowadzono pomiary. Wartości te przedstawiono na rysunku 6 oraz w tabeli 2.

Z powyższych zestawień wynika jednoznaczny wniosek, że w na przestrzeni lat 2009 ÷ 2015 dokładność pomiaru wysokościowego w metodzie mobilnych pomiarów satelitarnych wyraźnie wzrosła. Związane jest to niewątpliwie z rozwijającą się technologią stosowaną w coraz to nowszych urządzeniach pomiarowych, jak również z rozwijającym się niezmiennie segmentem kosmicznym oraz naziemnym techniki pozycjonowania GNSS. Należy zauważyć, że przyjęty wskaźnik, reprezentujący dokładność pomiarów GNSS w płaszczyźnie pionowej, został na przestrzeni okresu prowadzenia pomiarów zwiększony kilkukrotnie, co stanowi zachęcający prognostyk dla dalszych badań w tym zakresie. Nie ulega wątpliwości, że zasadniczym czynnikiem, który się do tego przyczynił, było dołączenie do rozwiązania pozycyjnego drugiej (poza GPS) konstelacji satelitów – rosyjskiego systemu Glonass oraz wykorzystanie dwusystemowej aktywnej sieci geodezyjnej. Biorąc pod uwagę planowane, na przestrzeni najbliższych lat, uruchomienie nowych systemów: Galileo i Compass, proponowana technika pomiaru jawi się bardzo obiecująco.

Podsumowanie

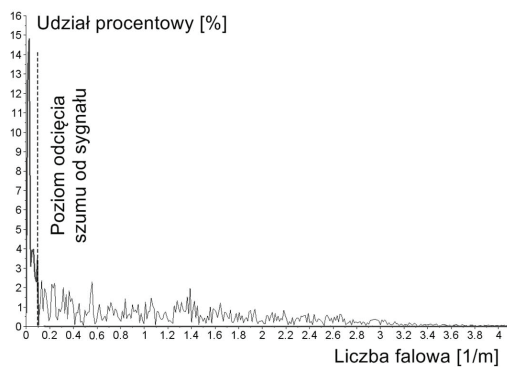
Opracowana przez interdyscyplinarny zespół naukowy Politechniki Gdańskiej i Akademii Marynarki Wojennej / Akademii Morskiej w Gdyni metoda mobilnych pomiarów satelitarnych GNSS pozwala na precyzyjne odwzorowanie elementów geometrycznych drogi szynowej. Uzyskiwana dokładność okazała się w zupełności wystarczająca dla celów projektowych. Do wyjaśnienia pozostałe nadal kwestia zastosowania mobilnych pomiarów satelitarnych w diagnozowaniu geometrii toru.

Znaczne zwiększenie precyzji pomiarów staje się możliwe dzięki temu, że poprawki dla stacji wirtualnej transmitowane są zarówno do systemu satelitarnego GPS (jak w przypadku ASG-EUPOS), jak i do rosyjskiego systemu GNSS Glonass. W ten sposób zwiększa się znacznie liczba dostępnych satelitów, co ma kluczowy wpływ na dokładność wyznaczeń oraz znacząco wpływa na podniesienie dostępności pozycji o wysokiej precyzji (zwłaszcza w terenie zabudowanym). Możliwości takie stwarza funkcjonująca w województwie pomorskim od 2012 roku prywatna satelitarna sieć geodezyjna – Leica SMART-NET, oferująca korekty do dwóch systemów GNSS.

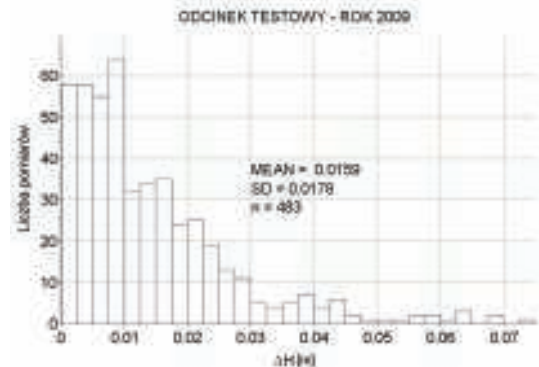
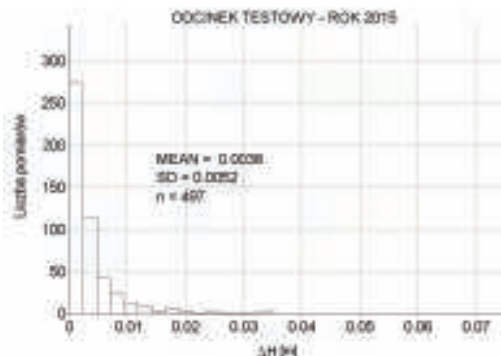
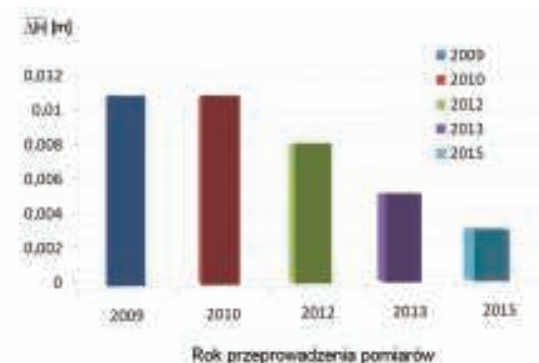
Przeprowadzone na przestrzeni lat 2009 ÷ 2015 kampanie pomiarów satelitarnych miały również na celu sprawdzenie, na jaką dokładność można było liczyć na danym etapie roz-

Tab. 1. Charakterystyka liczebności odcinków testowych w poszczególnych latach wykonywania pomiarów satelitarnych

rok	2009	2010	2012	2013	2015
liczba odcinków testowych	14	27	14	9	8



3. Wynik transformacji Fouriera dla pomiaru płaszczyzny pionowej

4. Rozkład empiryczny wartości ΔH dla wybranego odcinka testowego z kampanii pomiarowej 20095. Rozkład empiryczny wartości ΔH dla wybranego odcinka testowego z kampanii pomiarowej 20156. Kształtowanie się wartości średnich $\overline{\Delta H}$ z poszczególnych odcinków testowych w kampaniach pomiarowych 2009 ÷ 2015

woju omawianej techniki pomiarowej. Przez długi okres czasu preferowane było rozpatrywanie współrzędnych trasy w płaszczyźnie poziomej (kluczowych z punktu widzenia zadań projektowych); w niniejszej pracy postanowiono zająć się dokładnością wyznaczania współrzędnych pionowych. Założono, że tak jak odcinki proste trasy (w płaszczyźnie poziomej), również odcinki o jednostajnym pochyleniu (w płaszczyźnie pionowej) są jednoznacznie zdefiniowane pod względem geometrycznym, więc ocena ich kształtu, wyznaczonego satelitarne, może stanowić podstawę określenia uzyskiwanej dokładności.

W wyniku przeprowadzenia odpowiedniej procedury obliczeniowej wykazano, że na przestrzeni lat 2009 ÷ 2015 dokładność pomiaru wysokościowego w metodzie mobilnych pomiarów satelitarnych wyraźnie wzrosła. Określona średnia wartość błędu pomiarowego wynosi obecnie kilka milimetrów. Ponieważ dotyczy to również ukształtowania poziomego torów [8], są to stwierdzenia bardzo obiecujące z punktu widzenia perspektyw zastosowania mobilnych pomiarów satelitarnych w diagnostyce toru. Jak należy się spodziewać, znaczną

poprawę uzyskiwanej dokładności powinna zapewnić odpowiednia konstrukcja pojazdu szynowego do przewożenia anten, gwarantująca ścisłe wpisywanie się w tor oraz pozwalająca na wyznaczanie korekt położenia osi toru wynikających z różnic wysokości toków szynowych. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Koc W. Metoda projektowania rejonu zmiany kierunku trasy kolejowej, Problemy Kolejnictwa, 152, 2011.
- [2] Koc W. Projektowanie łuków kosзовych dostosowane do pomiarów satelitarnych, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Transport, 98, 2013.
- [3] Koc W., Chrostowski P. Wizualizacja przebiegu trasy kolejowej na podstawie pomiarów satelitarnych, IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Projektowanie, Budowa i Utrzymanie Infrastruktury w Transporcie Szynowym INFRASZYN 2011”, Zakopane 2011.
- [4] Koc W., Specht C., Chrostowski P., Palikowska K. The accuracy assessment of determining the axis of railway track basing on the satellite surveying, Archives of Transport 2012, 24, 3.
- [5] Koc W., Specht C., Jurkowska A., Chrostowski P., Nowak A., Lewiński L., Bornowski M. Określanie przebiegu trasy kolejowej na drodze pomiarów satelitarnych, II Konferencja Naukowo-Techniczna „Projektowanie, Budowa i Utrzymanie Infrastruktury w Transporcie Szynowym INFRASZYN 2009”, Zakopane 2009.
- [6] Korn G.A., Korn T.M. Matematyka dla pracowników naukowych i inżynierów, PWN,

Warszawa 1983.

- [7] Specht C. System GPS, Wydawnictwo BERNARDINUM, Pelplin, 2007.
- [8] Specht C., Koc W., Chrostowski P., Szmagliński J. Ocena dokładności mobilnych pomiarów satelitarnych toru w płaszczyźnie poziomej i pionowej, Projektowanie, Budowa i Utrzymanie Infrastruktury w Transporcie Szynowym INFRASZYN 2014, Radom 2014.
- [9] Specht C., Koc W., Smolarek L., Grządziela A., Szmagliński J., Specht M. Diagnostics of the tram track shape with the use of the Global Positioning Satellite Systems (GPS/Glonass) measurements with a 20 Hz frequency sampling, Journal of Vibroengineering, 16, 6, 2014.
- [10] Specht C., Koc W., Szmagliński J., Gajdzica P., Specht M., GNSS inventory of historic narrow-gauge railway line in Koszalin under extremely unfavorable measurements conditions from the point of view of satellite signals availability, Proceedings of 1st International Conference on Innovative Research and Maritime Applications IR-MAST, Gdansk University of Technology, April, 2015.
- [11] Specht, C.; Oszczak, S.; Nowicki, K.; Testowanie serwisów i infrastruktury teleinformatycznej aktywnej sieci geodezyjnej ASG-EUPOS, Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2/2010, Politechnika Gdańska, str. 104-112, Gdańsk, 2010.
- [12] Strona internetowa: <http://www.scilab.org> (The Free Platform for Numerical Computation).
- [13] Zieliński T. P. Przetwarzanie sygnałów: od teorii do zastosowań, WKŁ, Warszawa 2007.

Tab. 2. Zestawienie wartości średnich i odchyłeń standardowych parametru ΔH

Kampania pomiarowa	Wartość średnia (ΔH) [mm]	Odchylenie standardowe $\sigma_{\Delta H}$ [mm]
2009	10,59	4,84
2010	10,66	16,68
2012	11,52	12,39
2013	5,11	4,79
2015	3,00	2,98