

Ocena kształtu geometrycznego torów tramwajowych na podstawie pomiarów satelitarnych

Władysław KOC¹, Piotr CHROSTOWSKI²,
Jacek SZMAGLIŃSKI³, Cezary SPECHT⁴

Streszczenie

W artykule przedstawiono ocenę możliwości wykorzystania dwusystemowych fazowych odbiorników GNSS (GPS / GLONASS) do pomiaru inwentaryzacyjnego linii tramwajowych. Opisano przebieg pomiarów przeprowadzonych na terenie Gdańska i uzyskane wyniki. Wykazano, że w obszarach miejskich zastosowanie rozwiązań GNSS wykorzystujących lokalną stację referencyjną, może być alternatywnym podejściem w stosunku do pomiarów względem sieci ASG-EUPOS (GPS). Dokonano oceny kształtu geometrycznego torów w płaszczyźnie poziomej z wykorzystaniem opracowanych narzędzi wspomagania komputerowego.

Słowa kluczowe: tor tramwajowy, pomiary satelitarne, ocena kształtu

1. Wprowadzenie

Dzięki postępowi technologicznemu, stosowane obecnie klasyczne techniki geodezyjne w kształtowaniu i utrzymaniu drogi szynowej, umożliwiają bardzo dokładny pomiar odległości i kątów. Najpoważniejszym problemem jest konieczność operowania w lokalnych układach odniesienia. Wraz z rozwojem alternatywnych metod pomiarowych z wykorzystaniem sygnału satelitarnego (GPS, GLONASS i inne systemy satelitarne) [7], pojawiła się możliwość oceny układu geometrycznego trasy w całości w globalnym układzie odniesienia. Okazuje się również, że aplikacja metod pomiarów geodezyjnych z wykorzystaniem dynamicznie rozwijających się Globalnych Nawigacyjnych Systemów Satelitarnych (GNSS – ang.: *Global Navigation Satellite Systems*) może stanowić alternatywę dla metod klasycznej geodezji [1].

¹ Prof. dr hab. inż., Politechnika Gdańska, e-mail: kocwl@pg.gda.pl.

² Dr inż., Politechnika Gdańska, e-mail: piotr.chrostowski@wilis.pg.gda.pl.

³ Mgr inż., Politechnika Gdańska, e-mail: jacszmag@pg.gda.pl.

⁴ Prof. dr hab. inż., Akademia Morska w Gdyni, e-mail: c.specht@geodezja.pl.

Aplikacja pomiarów fazowych (geodezyjnych) GNSS do inwentaryzacji dróg szynowych natrafia jednak na wiele ograniczeń, spośród których jako zasadnicze, należy uznać częściowe ograniczenie odbioru sygnałów GNSS, wynikające z tzw. przeszkód terenowych, wpływających na wartość błędu wyznaczenia współrzędnych. O ile pomiary prowadzone w otwartej przestrzeni zapewniają dobrą widoczność segmentu kosmicznego⁵, to w warunkach zurbanizowanych, górzystych bądź leśnych zaobserwowano okresowe trudności w uzyskaniu precyzyjnego rozwiązania fazowego⁶, czy nawet kodowego⁷. Wynika stąd uzasadniony wniosek, że pomiary satelitarne powinny być uzupełniane innymi metodami pomiarowymi, niezależnymi od widoczności satelitów.

Na początku 2009 roku, w Politechnice Gdańskiej i Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni, utworzono zespół zajmujący się satelitarnymi badaniami inwentaryzacyjnymi linii kolejowych oraz projektowaniem ich układów geometrycznych dostosowanym do tej techniki pomiarowej. W skład zespołu weszli pracownicy naukowcy Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska PG – Katedry Transportu Szynowego i Katedry Geodezji oraz Instytutu Nawigacji i Hydrografii Morskiej AMW. Opracowana przez zespół metoda ciągłych pomiarów satelitarnych GNSS daje możliwość uzyskania odpowiedniej efektywności pomiaru, pozwalającej na precyzyjne odwzorowanie elementów geometrycznych trasy. Pierwsze badania zrealizowano w 2009 roku na odcinku linii kolejowej Kościerzyna – Kartuzy, kolejne kampanie pomiarowe przeprowadzono w 2010 roku na odcinku Gdańsk Główny – Gdańsk Zaspa Towarowa (linia 249) oraz na trasie Gdańsk Osowa – – Somonino. Do wyznaczenia współrzędnych przebiegu trasy kolejowej wykorzystywano zmienne konfiguracje fazowych odbiorników GNSS, różniące się liczbą i rozmieszczeniem odbiorników na platformie pomiarowej.

Po szczegółowej analizie warunków realizacji pomiarów, przeprowadzonych w latach 2009–2010 na długości około 100 km linii kolejowych, zdecydowano się odpowiednio zweryfikować dotychczasową metodykę badań. W lutym 2012 roku zrealizowano kolejne pomiary satelitarne linii tramwajowych w Gdańsku [8].

⁵ Segment kosmiczny – konstelacja satelitów poruszających się po orbitach kołowych na wysokości około 20 183 km, transmitujących sygnały, które umożliwiają określenie pozycji.

⁶ Rozwiązanie fazowe GPS – metoda określenia położenia odbiornika wykorzystująca pomiar fazy sygnału, dzięki której można określić odległości do satelitów (dokładność pomiaru odległości wynosi 2 mm).

⁷ Rozwiązanie kodowe GPS – metoda określenia położenia odbiornika, wykorzystująca pomiar opóźnienia kodu sygnału transmitowanego przez satelitę, dzięki której można określić odległości do satelitów (dokładność pomiaru odległości wynosi 6 mm).



2. Strategie pomiarów GNSS

W przypadku wykorzystywania 8 satelitów GPS do określenia pozycji przez odbiornik geodezyjny wykonuje się jednocześnie 16 wyznaczeń pseudoodległości⁸. Przy jednoczesnym wykorzystaniu przez odbiornik geodezyjny satelitów systemu GLONASS, ta liczba zwiększy się blisko dwukrotnie – nawet do 32 jednocześnie zmierzonych pseudoodległości. Jest sprawą oczywistą, iż dokładność wyznaczenia współrzędnych pozycji w takim rozwiązaniu będzie większa. Należy również wspomnieć, że w ciągu około 3 lat będzie uruchomiony kolejny system satelitarny Chińskiej Republiki Ludowej o nazwie COMPAS, a około 2017 r. europejski system satelitarny Galileo. Dlatego można spodziewać się, że około 2018 roku liczba jednocześnie wykonywanych pomiarów pseudoodległości przez odbiornik geodezyjny osiągnie 64 (przy założeniu 30 satelitów operacyjnych w każdym z systemów). W zestawieniu z 16 pomiarami pseudoodległości (GPS) realizowanymi obecnie standardowo, znacząco podwyższy to dokładność wyznaczeń pozycji. Należy również zauważyć, że przez staranne planowanie kampanii pomiarowej z wykorzystaniem modeli ruchu sztucznych satelitów Ziemi, będzie można uzyskać około 80 pomiarów.

Przytoczone fakty świadczą zarówno o celowości, jak też obiecującej perspektywie przyszłych badań prowadzonych przez Zespół. Pozwoliło to na zdefiniowanie następującej hipotezy badawczej, dotyczącej realizacji prac związanych z aplikacją technik GNSS dla geodezyjnych pomiarów satelitarnych realizowanych w torze kolejowym: *W niedalekiej perspektywie czasowej (3–5 lat) możliwe stanie się uzyskiwanie dokładności określenia współrzędnych pozycji przez wielosystemowe odbiorniki fazowe (geodezyjne) GNSS na poziomie 2–3 mm; dokładność taka spełni większość wymagań w zakresie geodezyjnej obsługi transportu szynowego.*

Jedynym zagadnieniem, prawdopodobnie niemożliwym do wykonania, będzie prowadzenie badań w obiektach przesłoniętych, takich jak odcinki pod wiaduktami czy tunele. Jednakże wspomaganie odbiornika GNSS systemami inercyjnymi INS (już dziś relatywnie tanimi i bardzo precyzyjnymi na krótkich, przejeżdżanych przez kilka sekund odcinkach) powinno umożliwić utrzymanie wymaganego poziomu dokładności.

Powołanie zespołu badawczego zajmującego się optymalizacją wykorzystania technik GNSS w pomiarach geodezyjnych realizowanych w torze kolejowym, pozwoliło na ustalenie wstępnego harmonogramu prac, uwzględniającego rozwój technik pomiarów satelitarnych w Polsce i na świecie. Wieloletni plan badań Zespołu, skorelowany z rozwojem technik GNSS, przedstawiono w tablicy 1.

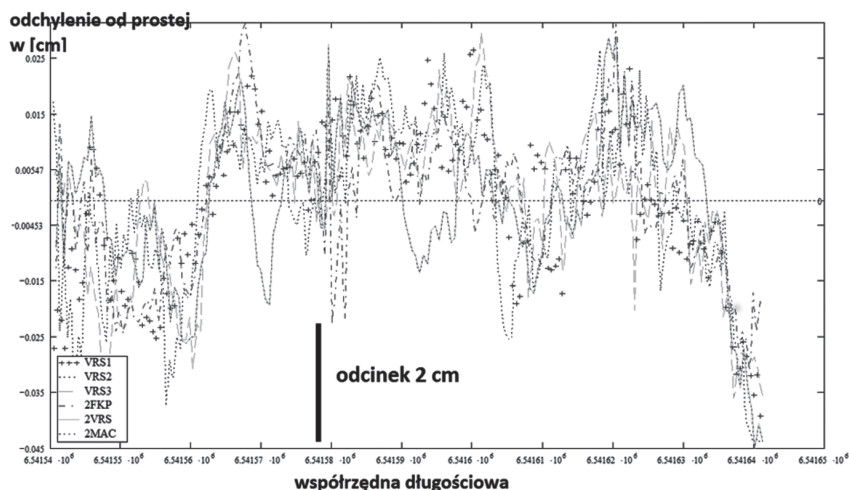
⁸ Pseudoodległość – odległość zmierzona na podstawie czasu przejścia fali elektromagnetycznej pomiędzy odbiornikiem i satelitą.



Tablica 1

Harmonogram badawczy zespołu PG / AMW / AMG

Lata	Dostępne rozwiązania GNSS	Uwagi
2009–2010	Sieć geodezyjna ASG-EUPOS (czas rzeczywisty, od 2008 roku).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dostępny system GPS. ▪ Badania porównawcze technik: VRS, FKP, MAC. ▪ Czas rzeczywisty 5 Hz.
2010–2012	Stacja GNSS Politechniki Gdańskiej (w serwisie geodezyjnym od 2011 roku).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dostępne systemy GPS / GLONASS. ▪ Spadek dokładności w funkcji odległości. ▪ Postprocessing 1 Hz.
2013–2014	Komercyjna sieć geodezyjna Leica Smart-NET (uruchomiona w 2012 roku w woj. pomorskim).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dostępne systemy GPS / GLONASS. ▪ Rozwiązanie sieciowe MAC, pozbawione spadku dokładności w funkcji odległości odbiorników. ▪ Czas rzeczywisty 20 Hz.
2014–2015	ASG-EUPOS (planowana rozbudowa sieci w województwie pomorskim, aktualnie realizowana).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dostępne systemy GPS / GLONASS ▪ Rozwiązanie sieciowe MAC, pozbawione spadku dokładności w funkcji odległości odbiorników. ▪ Czas rzeczywisty 20 Hz.
2015–2017	PTSG Pomorska Testowa Sieć Geodezyjna GNSS (lokalna – min. 6 stacji referencyjnych).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dostępne systemy GPS / GLO-NASS / Kompas / Galileo. ▪ Rozwiązanie sieciowe, pozbawione spadku dokładności w funkcji odległości odbiorników. ▪ Czas rzeczywisty 50 Hz.



Rys. 1. Odchylenia poprzeczne toru od kierunku prostego w pomiarach serwisu NAWGEO: VRS (4 przebiegi), MAC i FKP (odcinek o długości około 200 m)



Przeprowadzone w latach 2009–2010 pomiary miały na celu wybór optymalnej metody rozwiązania sieciowego GNSS spośród VRS (ang.: *Virtual Reference Station*), MAC (ang.: *Master-Auxiliary Concept*) i FKP (niem.: *Flächenkorrekturparameter*). Na rysunku 1 zaprezentowano wyniki inwentaryzacji fragmentu linii kolejowej z wykorzystaniem wszystkich trzech wymienionych metod. Analiza statystyczna wykazała, że błąd średni pomiarów mieścił się w przedziale 1,2–1,4 cm dla wszystkich trzech metod.

3. Realizacja pomiarów w torze tramwajowym

Po szczegółowej analizie warunków wykonania pomiarów zrealizowanych w latach 2009–2010, zdecydowano się gruntownie zweryfikować dotychczasową metodykę badań, w wyniku czego:

- Zrezygnowano z wykonania pomiarów w czasie rzeczywistym przy wykorzystaniu sieci ASG-EUPOS, ze względu na istniejące przerwy w pracy sieci związane z przesyłaniem korekt pseudoodległościowych GPS. W godzinach południowych znaczna liczba użytkowników skutkowałą odłączeniem użytkowników serwisu pakietowej transmisji danych (GPRS).
- Niestabilność pracy sieci ASG-EUPOS skłoniła do podjęcia decyzji o zastosowaniu późniejszego przekazu danych (*postprocessingu*), dzięki czemu opracowanie wyników dawało większą swobodę wykorzystania sygnałów różnych stacji referencyjnych.
- W celu podniesienia dokładności wyznaczenia współrzędnych, związanych bezpośrednio z dostępną liczbą satelitów GPS, zdecydowano się na realizację pomiarów z wykorzystaniem dwusystemowych odbiorników GNSS, wykorzystując w ten sposób sygnały dwóch systemów satelitarnych: GPS i GLONASS.
- Stosowanie odbiorników dwusystemowych spowodowało konieczność wykorzystania lokalnej stacji GPS / GLONASS, bowiem sieć ASG-EUPOS nie ma możliwości przesyłania korekt do odbiorników dwusystemowych. Lokalna stacja referencyjna powinna być zlokalizowana w rejonie prowadzenia pomiarów (do 10 km).

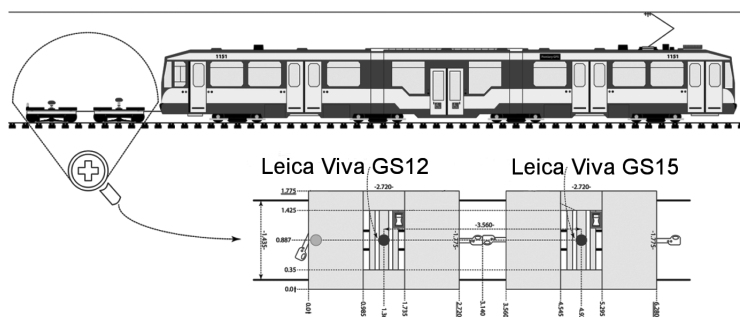
Inwentaryzację linii tramwajowych w Gdańsku przeprowadzono za pomocą dwóch odbiorników Leica – GS 15 oraz GS 12 z kontrolerami CS-15. Układ taki pozwala na uzyskanie dokładności w trybie kinematycznym⁹ RTK (pomiar fazowy) w poziomie: 10 mm + 1 ppm (rms) oraz w pionie: 20 mm + 1 ppm (rms). W celu zwiększenia tej dokładności, zdecydowano się na realizację badań z wykorzystaniem stacji referencyjnej Politechniki Gdańskiej do transmisji poprawek różnicowych

⁹ Tryb kinematyczny – sposób pomiaru współrzędnych punktów, w którym odbiornik przemieszcza się, kolejno je mierząc (czas pomiaru wynosi 3–5 sekund na punkt).



GPS / GLONASS. Ponadto, dokonywano zapisu danych w celu ich późniejszego przetwarzania (ang. *postprocessing*).

Zespół pomiarowy składał się z wagonu silnikowego i dwóch wagonów doczepnych, na których zamontowano anteny wraz z kontrolerami (rys. 2). Jako wagon silnikowy wykorzystano tramwaj N8C MF-01 1151 Zakładu Komunikacji Miejskiej w Gdańsku. Jako wagony doczepne wykorzystano dwa wózki przedwojennego tramwaju serii 300.



Rys. 2. Schemat umieszczenia urządzeń pomiarowych na wagonach

Z uwagi na duże natężenie ruchu tramwajów w ciągu dnia oraz konieczność utrzymania stałej prędkości (15 km/h), pomiar zaplanowano i wykonano w godzinach nocnych. Rozkład jazdy ułożono w taki sposób, aby pociąg pomiarowy nie zakłócał normalnego funkcjonowania tramwajów. Pomiar zakończono zgodnie z planem, po przejechaniu około 55 km, co zajęło około 4,5 godziny. Średnia prędkość jazdy wyniosła 12 km/h.

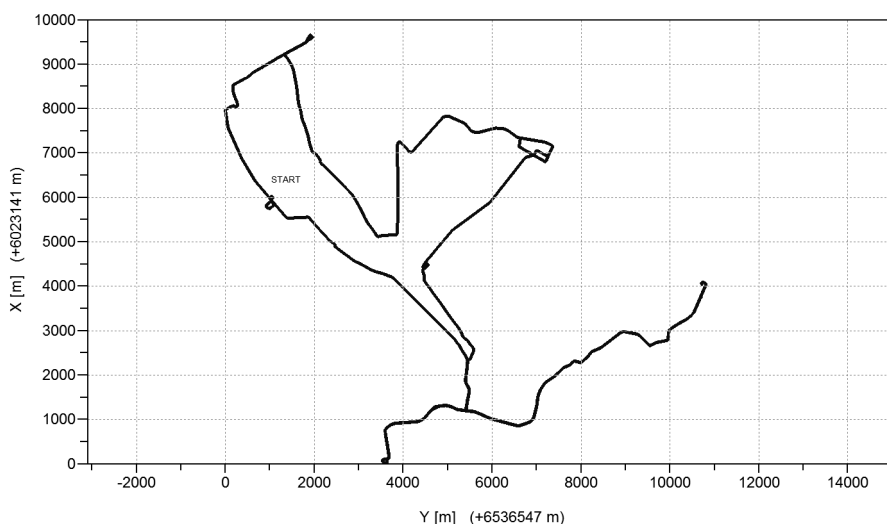
4. Wyniki inwentaryzacji

Odbiorniki GNSS uruchomiono niezwłocznie po wyjeździe zestawu z zadanej stacji, a wyłączono tamże po zakończeniu pomiarów. W tym samym czasie uruchomiono stację referencyjną GNSS Politechniki Gdańskiej, zlokalizowaną w rejonie prowadzenia pomiarów. Dane z tej stacji umożliwiają przetwarzanie sygnału w celu zwiększenia dokładności odbiorników pomiarowych na platformie przez eliminację większości błędów, którymi jest obciążony pomiar satelitalny [7]. W wyniku pomiarów, w odbiorniku GNSS nr 1 wyznaczono 15 854 współrzędnych, natomiast w odbiorniku GNSS nr 2 określono 16 015 wyznaczeń.

Przeprowadzone pomiary satelitarne torów tramwajowych na terenie Gdańska w terenie zabudowanym, pozytywnie zweryfikowały przyjęte założenia. Badania wykazały, że dokładność określenia współrzędnych pozycji w pomiarach 2D

osiąga wielkość poniżej 10 mm dla pomiarów GNSS opartych na dwusystemowym rozwiązaniu GPS / GLONASS. Rozwiązanie 3D tylko nieznacznie zwiększa wartość oczekiwaną (o około 10 mm). Stwierdzono, że dla sygnałów GPS / GLONASS nawet stosunkowo nieduża przesłona, pomimo bardzo wysokiej średniej liczby satelitów rejestrowanych podczas obserwacji, może być przyczyną istotnego zmniejszenia dostępności.

Współrzędne trasy tramwajowej wyznaczono w układzie odniesienia WGS 84¹⁰, a następnie, za pomocą oprogramowania Leica Geo Office 8.2., przeniesiono do państwowego układu odniesień przestrzennych 2000. Na ich podstawie dokonano wizualizacji przebiegu pomierzonej trasy za pomocą opracowanego programu SATTRACK (moduł TRACK_VIS) [4], działającego w środowisku Scilab [9]. Uzyskany układ linii tramwajowych pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Układ sieci tramwajowej w Gdańsku uzyskany za pomocą pomiarów satelitarnych

5. Metodyka analizy

Do przeprowadzenia oceny pomierzonego układu geometrycznego wykorzystywano trzy opracowane algorytmy obliczeniowe. Pierwszy algorytm umożliwia określenie, czy w analizowanym układzie występują krzywe przejściowe oraz określa przybliżone zakresy i promienie łuków kołowych składających się

¹⁰ WGS-84 – *World Geodetic System* (Światowy System Geodezyjny) powszechnie wykorzystywany na świecie w systemie GPS. Opisuje m.in. jednolity dla całej kuli ziemskiej układ współrzędnych, w którym są wykonywane pomiary.

na łuk koszowy, który jest typowym układem geometrycznym w torach tramwajowych. Jeżeli w torze będzie zidentyfikowana krzywa przejściowa w postaci paraboli trzeciego stopnia lub klotoidy, możliwe jest odtworzenie jej kształtu za pomocą drugiego algorytmu. Jeżeli będą zidentyfikowane łuki koszowe, trzeci algorytm pozwala na zaprojektowanie układu składającego się ze skończonej liczby łuków kołowych, dobrze opisujących istniejący układ. Istniejąca możliwość wizualizacji uzyskiwanych wyników pozwala na prowadzenie prac koncepcyjnych, związanych – przykładowo – z zastosowaniem innych postaci krzywej przejściowej, a także na określenie koniecznych przesunięć toru. Algorytmy są zbudowane w sposób umożliwiający łatwe dołączenie kolejnych modułów. Stwarzają szerokie możliwości aplikacyjne – np. do oceny i projektowania układów wybitnie niesymetrycznych (jak dla łuku nr 2).

Analizę istniejącego układu geometrycznego rozpoczęto od podziału pomierzonego układu na odcinki międzywęzłowe i węzły, przy użyciu programu SATTRACK (moduł TRACK_VIS [4], funkcja EXTRACT). Mianem węzłów określono wszystkie punkty końcowe trasy oraz niektóre pętle i skrzyżowania torów. Oznaczono je pierwszą lub dwiema pierwszymi literami ich nazwy, odcinki międzywęzłowe zaś – pierwszymi literami węzła rozpoczynającego i kończącego. Przykładowo: odcinek Strzyża – Oliwa (StOl) jest odcinkiem pomiędzy dwiema pętlami przelotowymi (ST i Ol), odcinek Oliwa – Pomorska (OlP) jest odcinkiem pomiędzy pętlą przelotową i skrzyżowaniem tras tramwajowych w rejonie skrzyżowania Chłopska – Pomorska, odcinek Pomorska – Jelitkowo (PJ) jest odcinkiem pomiędzy skrzyżowaniem linii i pętlą końcową.

Następnie, odcinki międzywęzłowe i węzły podzielono na jednostkowe odcinki proste i łukowe. Każdy łuk określono za pomocą nazwy odcinka oraz jego kolejnego numeru na tym odcinku, licząc zgodnie z kierunkiem jazdy na danym odcinku. Przykładowo, łuk zakrętu z ulicy Grunwaldzkiej w ulicę Wojska Polskiego we Wrzeszczu nazwano OpSt10, gdyż jest to dziesiąty łuk na odcinku Opera Bałtycka – Strzyża.

Na początku procedury obliczeniowej, w module SAT_ARC [2] opisano (metodą najmniejszych kwadratów) kierunki główne (proste) trasy za pomocą funkcji MAIN. Określono w ten sposób ich azymuty oraz punkt przecięcia. Następnie w wyniku transformacji (przesunięcia i obrotu) pomierzony układ geometryczny ustawiono symetrycznie, w lokalnym układzie współrzędnych.

Punkty pomiarowe przedstawione w lokalnym układzie współrzędnych poddano analizie za pomocą funkcji ANALISE, która określa szacunkową wartość promienia oraz odpowiadający łukowi kołowemu zakres na osi odciętych [2]. Użytkownik, analizując różnice pomiędzy przebiegiem modelowym i rzędnymi rzeczywistymi (pomierzonymi) punktów trasy, może identyfikować łuk kołowy w coraz bardziej dokładny sposób. Do wyznaczonego właściwego łuku, program dopasowuje dwa łuki kołowe skrajne, łączące się stycznie zarówno z tymże łukiem,



jak też z prostymi kierunkami głównymi. W ten sposób powstaje układ łuku kołowego, składający się z łuków o trzech różnych promieniach – co zresztą jest zgodne z obowiązującymi „Wytycznymi Technicznymi” [10]. Alternatywnym sposobem postępowania jest wstawianie krzywych przejściowych z wykorzystaniem modułu TRACK_DESIGN [3]. Plik wynikowy jest zapisywany zarówno w lokalnym, jak też w globalnym układzie współrzędnych. Program komputerowy umożliwia graficzną prezentację układów – istniejącego i zaprojektowanego na jednym ekranie, a także wyznacza odpowiednie różnice rzędnych.

6. Ocena kształtu wybranych łuków

W artykule przedstawiono wyniki analizy kształtu trzech wybranych łuków kołowych. Są to:

- łuk nr 1 (oznaczony jako OPr4) – w ciągu ulicy Podwale Przedmiejskie, na wysokości ulic Sadowej oraz Reduta Żbik,
- łuk nr 2 (oznaczony jako OCh3) – w ciągu ulicy Armii Krajowej, na wysokości ulicy Pohulanka,
- łuk nr 3 (oznaczony jako OpSt10) – na skrzyżowaniu Alei Wojska Polskiego i Alei Grunwaldzkiej.

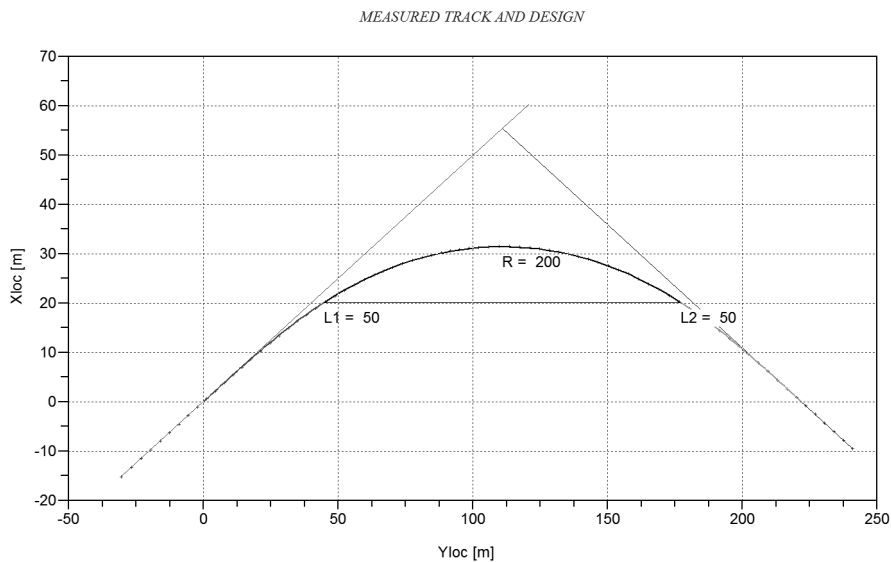
6.1. Łuk nr 1

Rok budowy 1995, nawierzchnia klasyczna, szyny S49, przytwierdzenia Sk1, podkłady drewniane. Trasa jest intensywnie eksploatowana, w godzinach szczytu obciążona ruchem szesnastu par pociągów. Blisko dwudziestoletnia eksploatacja doprowadziła do dużego zużycia bocznego szyn w toku zewnętrznym, o nieregularnym przebiegu, jednakże układ geometryczny umożliwia przejazd ze znaczną prędkością, bez szkody dla komfortu jazdy.

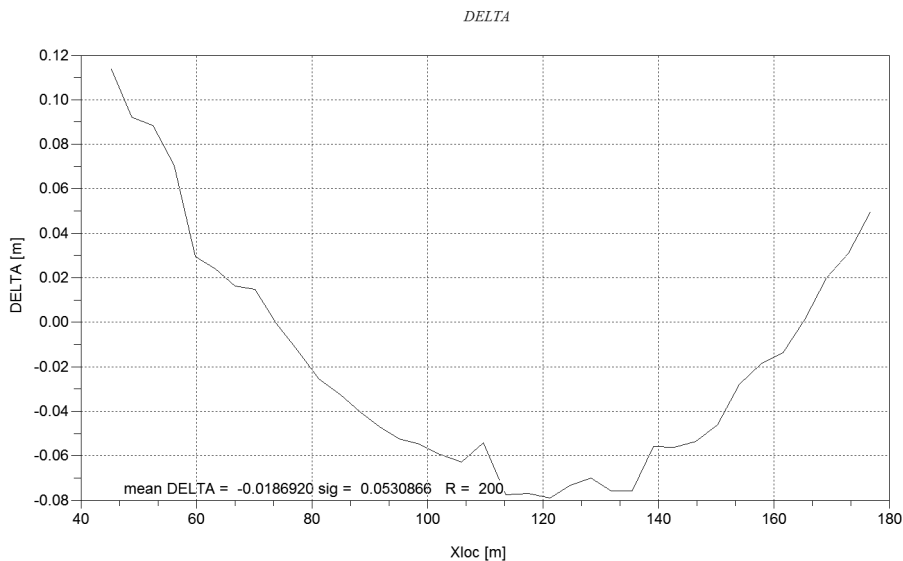
Za pomocą funkcji ANALISE określono promień i zasięg części kołowej łuku środkowego. Wartość promienia najlepiej opisująca pomierzone punkty wynosi 200 m, zaś najlepiej opisującymi układ krzywymi przejściowymi są symetryczne parabole 3 stopnia o długości 50 m (rys. 4). Wykres różnic rzędnych DELTA przedstawiono na rysunku 5. Jak widać, różnice pomiędzy układem pomierzonym a układem modelowym nie przekraczają 100 mm, co jest dobrym wyznacznikiem jakości zarówno projektowania, jak i wykonania.

Układ o podanych parametrach pozwala na bezpieczną jazdę z prędkością 60 km/h, przy zastosowaniu przechyłki minimalnej 90 mm. Obecnie stosowana przechyłka ma wartości znacznie mniejsze niż 90 mm, co jest jednym z powodów przyspieszonej degradacji toru (zużycie boczne główki szyny i poszerzenie szerokości toru przekraczające dopuszczalne wartości).





Rys. 4. Układ geometryczny łuku nr 1 zidentyfikowany na podstawie punktów pomiarowych

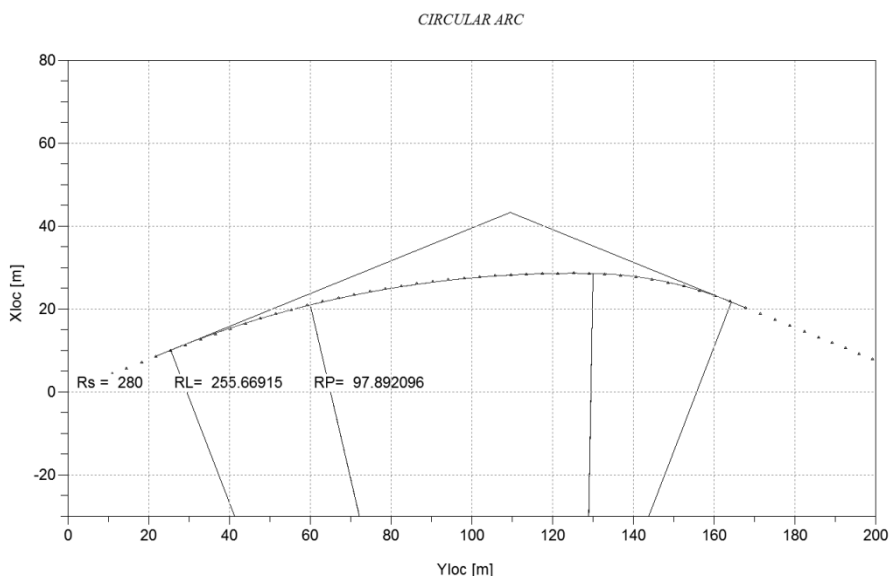


Rys. 5. Wykres różnic DELTA pomiędzy punktami pomierzonymi, a projektowymi na łuku nr 1

6.2. Łuk nr 2

Rok budowy 2007, nawierzchnia klasyczna, szyny 60Ri2, podkłady struno-betonowe, przytwierdzenia SB. Trasa jest intensywnie eksploatowana, w szczycie obciążona ruchem 27 par pociągów na godzinę. Prędkość na łuku ograniczono do 30 km/h. Łuk składa się z kilku odcinków o różnych promieniach, co jest uwarunkowane koniecznością dostosowania się do istniejącego w tym rejonie wiaduktu. Przejazd przez układ z dozwoloną prędkością nie wywołuje odczucia dyskomfortu u pasażerów.

Za pomocą funkcji ANALISE określono promień i zasięg części kołowej łuku w rejonie środkowym. Wartość promienia najlepiej opisującego ten rejon wynosi 290 m, a promieni łuków skrajnych, około 250 i 100 m (rys. 6). Z wykresu różnic rzędnych DELTA pomiędzy układem pomierzonym a modelowym wynika, że nie przekraczają one znacząco wartości 100 mm, co jest dobrym wyznacznikiem jakości zarówno projektowania, jak i wykonania. Pewne odstępstwa od tej reguły można zauważyć w lewej części łuku kołowego o większym promieniu, gdzie występuje krzywa przejściowa o długości około 50 m.



Rys. 6. Układ geometryczny łuku nr 2 zidentyfikowany na podstawie punktów pomiarowych

6.3. Łuk nr 3

Rok budowy 2011, nawierzchnia niekonwencjonalna, płyta żelbetowa, szyny 60Ri2. Trasa jest intensywnie eksploatowana, w szczycie obciążona ruchem 24 par pociągów na godzinę. Nie obowiązuje tutaj ustalone ograniczenie prędkości; prowadzący pojazd są zobowiązani utrzymywać taką prędkość, aby była zachowana spokojność jazdy. Z uwagi na umiejscowienie toru, który przecina jezdnię drogową, na łuku zastosowano minimalną przechyłkę, która pozwala na przejazd z prędkością nie przekraczającą 20 km/h.

Za pomocą funkcji ANALISE określono promień i zasięg części kołowej łuku w rejonie środkowym. Wartość promienia najlepiej opisującego ten rejon wynosi 50 m, a promieni łuków skrajnych – około 92 i 170 m. Z wykresu różnic rzędnych DELTA pomiędzy układem pomierzonym a modelowym wynika, że nie przekraczają one znacząco wartości 40 mm, co jest wzorowym wyznacznikiem jakości projektowania i wykonania.

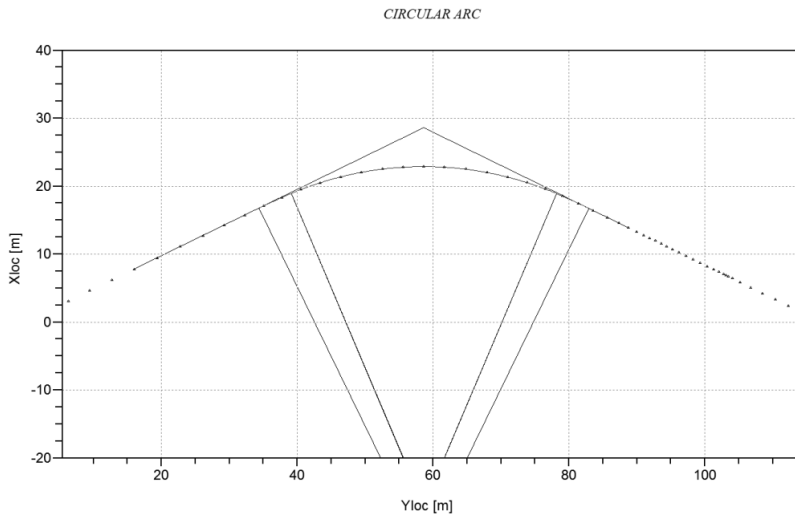
Stwierdzony regularny charakter układu geometrycznego skłania do zastosowania typowego rozwiązania opisanego w „Wytycznych Technicznych” [10], tj. połączenia (w sposób styczny) części środkowej łuku kołowego z prostymi za pomocą dwóch łuków o większym promieniu i niewielkiej długości. Zaprojektowano więc łuk koszowy składający się z trzech łuków kołowych: łuku zasadniczego o promieniu 50 m oraz dwóch skrajnych łuków przejściowych o promieniu 100 m i długości 5,236 m, opartych na kącie zwrotu równym 3 stopnie. Nowo zaprojektowany układ pokazano na rysunku 7, na którym można zaobserwować, że wpisuje się on bardzo dobrze w istniejący układ. Wykres różnic rzędnych DELTA, z podziałem na część środkową łuku oraz łuki przejściowe, przedstawiono na rysunku 8. Nawet widoczne wyraźniejsze różnice na częściach zewnętrznych układu są bardzo małe i w żadnym punkcie nie przekraczają wartości 30 mm.

7. Wnioski

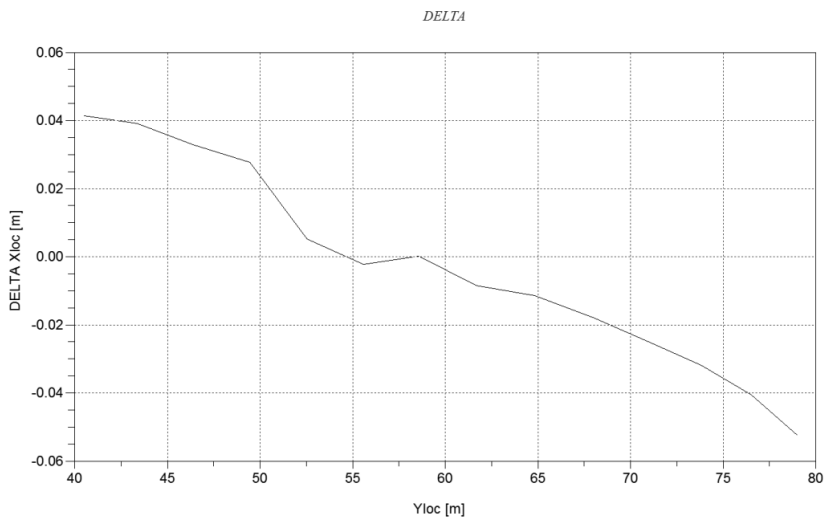
Prowadzone od kilku lat badania nad wykorzystaniem pomiarów satelitarnych do kształtowania geometrycznego toru kolejowego rozszerzono również na układy linii tramwajowych. Przedstawione badania w Gdańsku przyczyniły się zarówno do określenia kierunków dalszej modyfikacji techniki mobilnych pomiarów satelitarnych, jak też wskazały możliwości wykorzystania wyników takich pomiarów w projektowaniu i eksploatacji torów tramwajowych.

W trakcie kolejnych pomiarów celowe będzie zastanowienie się nad lepszym wykorzystaniem dostępności satelitów. Należy odpowiednio zaplanować czas prowadzenia pomiarów na odcinkach szczególnie narażonych na zakłócenia,





Rys. 7. Nowo zaprojektowany układ geometryczny łuku nr 3 na tle pomierzonych punktów



Rys. 8. Wykres różnic DELTA pomiędzy punktami pomierzonymi, a nowo zaprojektowanym łukiem nr 3

z wykorzystaniem almanachu (zbioru danych efemerydycznych, pozwalających na przewidzenie położenia satelitów). Często bowiem niewielkie, kilkuminutowe opóźnienie rozpoczęcia pomiaru na określonym odcinku może dostarczyć dużo lepszych danych pomiarowych.

Nie wszystkie stacje referencyjne sieci ASG-EUPOS mają dwusystemowe odbiorniki GPS / GLONASS, ograniczając w ten sposób możliwość przesyłania poprawek tylko do amerykańskiego systemu nawigacyjnego. Wykorzystana stacja referencyjna Politechniki Gdańskiej, znajdująca się 2,5 km od stacji referencyjnej GDAN ASG-EUPOS, umożliwiła nie tylko odbiór poprawek dla systemów GPS i GLONASS, ale także opracowanie (przetworzenie) zebranego dużego zbioru danych po przeprowadzonym pomiarze.

Wyniki uzyskane w czasie prowadzonej kampanii pomiarowej okazały się bardzo przydatne z punktu widzenia ich wykorzystania do oceny ukształtowania geometrycznego linii tramwajowych. W pierwszej kolejności mogą one posłużyć do wykonania całościowej inwentaryzacji sieci tramwajowej. Przy użyciu opracowanego wcześniej programu SATTRACK można z łatwością oddzielić odcinki proste od łukowych, określić niezbędne parametry, takie jak promienie łuków czy długości krzywych przejściowych, następnie połączyć dane w całościowy model sieci. Moduł projektowy programu TRACK_DESIGN umożliwia projektowanie nowych przebiegów trasy, korzystniejszych od istniejących.

Literatura

1. Gocał J.: *Wybrane technologie pomiarów inżynierskich oparte na wykorzystaniu instrumentów elektronicznych*, Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, tom XLVIII, zeszyt 102, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Kraków 2001.
2. Koc W., Chrostowski P.: *Ocena trasy położonej w łuku na podstawie pomiarów satelitarnych*, Przegląd Komunikacyjny, nr 4/2013, s. 25–29.
3. Koc W., Chrostowski P.: *Program komputerowy do projektowania zmiany kierunku trasy kolejowej*, Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej Oddział w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne, nr 3 (zeszyt 99), Kraków 2012, s. 213–223.
4. Koc W., Chrostowski P.: *Wizualizacja przebiegu trasy kolejowej na podstawie pomiarów satelitarnych*, (Materiały) IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Projektowanie, Budowa i Utrzymanie Infrastruktury w Transporcie Szynowym INFRASZYN 2011”, Zakopane 2011.
5. Landau H., Ulrich V., Xiaoming C.: *Virtual Reference Stations versus Broadcast Solutions in Network RTK – Advantages and Limitations*, Proceedings of GNSS 2003, Graz, Austria, 2003.
6. Leica Geosystems: *Networked Reference Stations, Take it to the MAX!* White Paper, June, 2005.
7. Specht C.: *System GPS*, Wydawnictwo BERNARDINUM, Pelplin 2007.



8. Specht C. i in.: *Dostępność fazowych rozwiązań GPS/Glonass podczas geodezyjnej inwentaryzacji dróg szynowych – na przykładzie linii tramwajowej Gdańska*, Technika Transportu Szynowego nr 9/2012, CD-ROM, s. 3441–3451.
9. *The Free Platform for Numerical Computation*, Scilab Enterprises 2012, [dostęp: 9 października 2013], dostępny na WWW <http://www.scilab.org>.
10. *Wytyczne techniczne projektowania, budowy i utrzymania torów tramwajowych*. Ministerstwo Administracji, Gospodarki Terenowej i Ochrony Środowiska – Departament Komunikacji Miejskiej i Dróg, Warszawa, 1983.
11. Wübbena G., Bagge A., Schmitz M.: *Network-Based Techniques for RTK Applications GPS*, GPS Society, Japan Institute of Navigation, Tokyo, 14–16 November, 2001.

Evaluation of Tram Track Geometric Shape Based on Satellite Surveying

Summary

The article presents an assessment of possibility making use of dual system phase receivers GNSS (GPS/GLONASS) for inventory measurements of tramway tracks. The authors describe course of measurements executed on territory of Gdańsk, and results obtained. The thesis is proved, that for urban areas application of GNSS solutions based on a local reference station might be an alternative approach in relation to measurements based on a network ASG-EUPOS (GPS). A geometric shape of tracks on horizontal plane has been evaluated, with an application of worked out computer-aided tools.

Keywords: tramway track, satellite measurements, shape evaluation



Оценка геометрической формы трамвайных путей на основе спутниковых измерений

Резюме

В разработке представлена оценка возможности использования двухсистемных фазовых приёмников GNSS (GPS / GLONASS) для проведения измерений по инвентаризации трамвайных линий. Описан ход измерений, проведённых на территории г. Гданьс, и полученные результаты. Доказано, что для городских областей применение техник GNSS, опираясь на локальную референтную станцию, может быть альтернативным подходом по отношению к измерениям, основанным на сети ASG-EUPOS (GPS). Проведена оценка геометрической формы путей в горизонтальной плоскости с применением разработанных средств компьютерной поддержки.

Ключевые слова: трамвайный путь, спутниковые измерения, оценка формы