

ANALIZA ISTOTNOŚCI WSPARCIA SYSTEMEM GLONASS POMIARÓW RTK GPS NA OBSZARACH KOLEJOWYCH

Andrzej Uznański

dr inż., Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, 30-059 Kraków, Al. A. Mickiewicza 30, e-mail: auznan@agh.edu.pl

Streszczenie. *Aktualnie wyznaczanie pozycji w oparciu o nawigację satelitarną jest możliwe dzięki amerykańskiemu systemowi NAVSTAR GPS, który może być wspomagany rosyjskim systemem GLONASS. W budowie są kolejne dwa systemy o zasięgu globalnym. Funkcjonują oraz są tworzone rozmaite regionalne systemy nawigacji satelitarnej oraz naziemne systemy wspomagające. W pracy poddano analizie istotność wsparcia sygnałami satelitów systemu GLONASS w geodezyjnym wyznaczaniu współrzędnych punktów w czasie rzeczywistym. Opracowanie oparto na wynikach pomiarów wykonanych na dwukilometrowym odcinku torów. Z punktu widzenia pomiarów satelitarnych w czasie rzeczywistym (RTK GPS, RTK GNSS, RTN) warunki realizacji pomiarów były niekorzystne ze względu na przesłonięcia horyzontu wynikające z topografii terenu i przede wszystkim sąsiadujących z mierzoną linią kolejową szpalerów drzew. W bardzo krótkich, kilkusekundowych pomiarach w czasie rzeczywistym aspekt wsparcia wyznaczania pozycji punktów sygnałami satelitów systemu GLONASS powinien być najbardziej widoczny, jeśli występuje.*

Słowa kluczowe: *systemy nawigacji satelitarnej, NAVSTAR GPS, GLONASS, pomiary satelitarne, pomiary kinematyczne w czasie rzeczywistym, sieciowe pomiary kinematyczne w czasie rzeczywistym*

1. Wprowadzenie

Pierwszym globalnym systemem nawigacji satelitarnej udostępnionym zastosowaniom cywilnym od 1993r. był amerykański system NAVSTAR GPS, którego system kosmiczny planowany na 24 satelity składa się aktualnie z 31 satelitów. Drugim chronologicznie systemem nawigacyjnym o zasięgu globalnym był rosyjski GLONASS, który został udostępniony użytkownikom cywilnym w 1999 r. Po kryzysie finansowym Rosji, system od 2011 roku dysponuje ponad 20 satelitami, których sygnały można wykorzystać w nawigacji, przy w sumie 31 satelitach na orbitach. Produkowane dwuczęstotliwościowe geodezyjne odbiorniki satelitarne są przystosowane do odbioru sygnałów radiowych z obydwu tych systemów.

Aktualnie trwają prace nad budową dwóch kolejnych systemów o zasięgu globalnym: chińskim systemem COMPASS oraz europejskim Galileo. W ofercie producentów pojawiają się odbiorniki, które potrafią śledzić sygnały także tych

systemów globalnych, jak również systemów regionalnych. Nie mniej systemem podstawowym w nawigacji satelitarnej jest nadal system NAVSTAR GPS.

Na łącznym wykorzystaniu różnych systemów nawigacji satelitarnej o zasięgu globalnym i regionalnym do wyznaczania pozycji opiera się projekt Komisji Europejskiej, ESA i organizacji Eurocontrol o akronimie GNSS (Global Navigation Satellite System). W projekcie określono jako podstawowe systemy NAVSTAR GPS oraz GLONASS. Wsparciem dla tych systemów mają być systemy typu ABAS (Aircraft Based Augmentation System), SBAS (Satellite Based Augmentation System) oraz GBAS (Ground Based Augmentation System). Stosowanie akronimu GNSS w połączeniu z pomiarami satelitarnymi jest aktualnie powszechne, ale często nieuzasadnione. W przypadku wykorzystania do obliczenia pozycji sygnałów tylko systemu NAVSTAR GPS mamy do czynienia z pomiarami GPS. Jeśli odbiornik satelitarny obliczenia wykonał dla sygnałów z min. dwóch systemów nawigacji satelitarnej, wówczas są to pomiary GNSS, gdyż taka jest istota tego projektu [2]. Korzystając z systemu ASG-EUPOS na większości obszaru kraju wykonywane są więc aktualnie pomiary GPS.

Wyznaczanie współrzędnych punktów osnów podstawowych na obszarach kolejowych realizowane jest z wykorzystaniem statycznych pomiarów satelitarnych. W innych pomiarach stosowane są także pomiary kinematyczne w czasie rzeczywistym RTK (Real Time Kinematic) oraz ich sieciowa odmiana RTN (Real Time Network).

Linie kolejowe nierzadko przebiegają przez obszary zalesione. Często też wzdłuż linii kolejowych rosną szpalery drzew, a w bliskim sąsiedztwie znajdują się budynki i zadaszenia peronów. Są to istotne przeszkody w pomiarach satelitarnych, gdyż przesłaniają horyzont wokół punktów oraz powodują zakłócenia sygnałów satelitarnych.

Analizie poddano możliwość poprawy dokładności i możliwości wyznaczania pozycji punktów z wykorzystaniem systemu GLONASS w niekorzystnych dla pomiarów satelitarnych warunkach na obszarach kolejowych. Z technik satelitarnych wybrano do opracowania pomiary kinematyczne w czasie rzeczywistym RTK GPS, RTK GNSS oraz RTN, gdyż są najbardziej wrażliwe na warunki realizacji pomiaru.

Wsparcie pozycjonowania kolejnym systemem nawigacji satelitarnej można rozpatrywać w aspektach umożliwienia wyznaczenia pozycji punktu oraz zwiększenia dokładności jej wyznaczenia. Analiza istotności wsparcia wyznaczania pozycji punktów sygnałami systemu GLONASS wynika z faktu, że jest to system, którego sygnały radiowe są powszechnie odbierane przez geodezyjne odbiorniki satelitarne. Ponadto wnioski z analiz być może będą mogły zostać rozszerzone na pojawiające się kolejne systemy nawigacji satelitarnej. Rodzaj technik i technologii pomiarowych oraz warunki pomiarów dobrano tak, aby pozytywny wpływ sygnałów systemu GLONASS mógł uwidocznić się najwyraźniej.

Analizowano wyniki dwóch pomiarów tego samego odcinka w Słomnikach, przy czym tylko w drugim pomiarze odbiorniki satelitarne odbierały sygnały z sys-

temu GLONASS. Wyniki z pierwszego pomiaru były pomocne w analizie relacji między pomiarami RTK GPS oraz RTN.

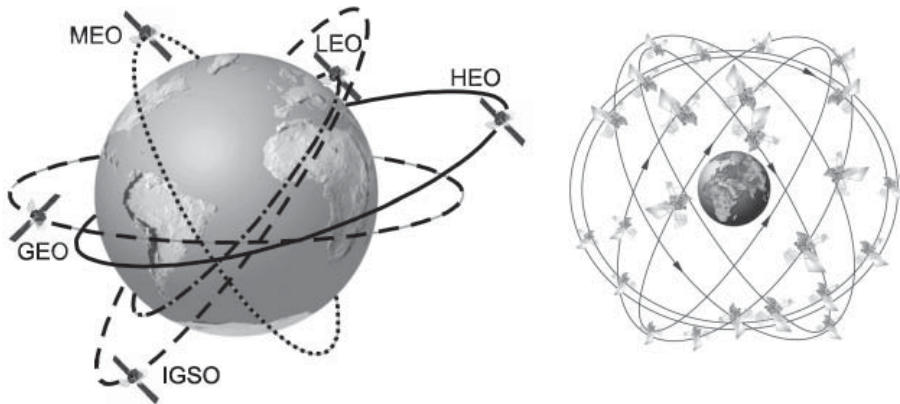
2. Systemy nawigacji satelitarnej

Literatura przedmiotu opisuje systemy nawigacji satelitarnej jako tworzone z trzech segmentów: kosmicznego, kontroli i użytkowników. Z punktu widzenia zakresu analiz istotne są wybrane aspekty budowy segmentu kosmicznego, który tworzą satelity nawigacyjne. Aby system mógł funkcjonować jako globalny, musi zostać odpowiednio zaprojektowany.

Rodzaj orbity, na którą wynoszony jest satelita nawigacyjny zależy m.in. od obszaru nawigacji danego systemu satelitarnego. Satelity nawigacyjne umieszczane są na orbitach MEO (Medium Earth Orbit), których promienie mogą wynosić od formalnie 2000 km (praktycznie od 6000 km w przypadku satelitów LAGEOS-1,2) do 35786 km (rys. 1) [4]. Satelity nawigacyjne systemów globalnych GPS umieszczane są na orbitach MEO o promieniach rzędu 20000 km. Satelity systemów regionalnych typu SBAS (np. EGNOS, WAAS) wynoszone są na orbity geostacjonarne o promieniu równym górnej granicy dla orbit MEO. Są one odmianną orbit geosynchronicznych. Orbitami geosynchronicznymi są też orbity HEO (Highly Elliptical Orbit), które zastosowano np. w indyjskim systemie IRNSS. Satelita umieszczony na orbicie HEO krążąc po orbicie kołowej, dla obserwatora na Ziemi porusza się po trajektorii przypominającej ósemkę, zachowując stałą długość geograficzną (rys. 2). W chińskim systemie BeiDou-2 (COMPASS) zaprojektowano zarówno 5 satelitów geostacjonarnych jak i 27 satelitów MEO oraz 3 satelity IGSO (Inclined Geostationary Orbit) o nachyleniu 55° do równika. Oznaczenie nachylenia orbity w nazwie wynika z faktu, że orbity geostacjonarne położone są w płaszczyźnie równika.

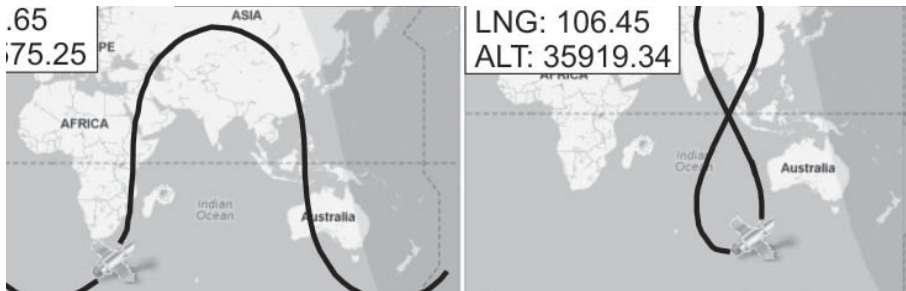
Pokrycie zasięgiem systemu nawigacyjnego całego globu uzyskuje się poprzez odpowiedni dobór liczby orbit (podstawą są orbity typu MEO), ich rozmieszczenia i nachylenia do równika, promienia oraz liczby satelitów. Przez zasięg globalnego systemu nawigacji satelitarnej należy rozumieć obszar, na którym odbiornik satelitarny może odebrać sygnały z liczby satelitów systemu umożliwiającej wyznaczenie pozycji.

Na rys. 1 przedstawiono konstelację 24 satelitów jednego systemu nawigacji globalnej. Wg NORAD aktualnie w przestrzeni kosmicznej znajduje się łącznie 13381 satelitów o różnym przeznaczeniu.



Rys. 1. Rodzaje orbit sztucznych satelitów Ziemi oraz konstelacja satelitów systemu NAVSTAR GPS na orbitach MEO ~20 200 km nad Ziemią

Do przedstawienia trajektorii satelitów nawigacyjnych na rys. 2 wybrano satelity systemu COMPASS ze względu niespotykane zróżnicowanie orbit w ramach jednego systemu.



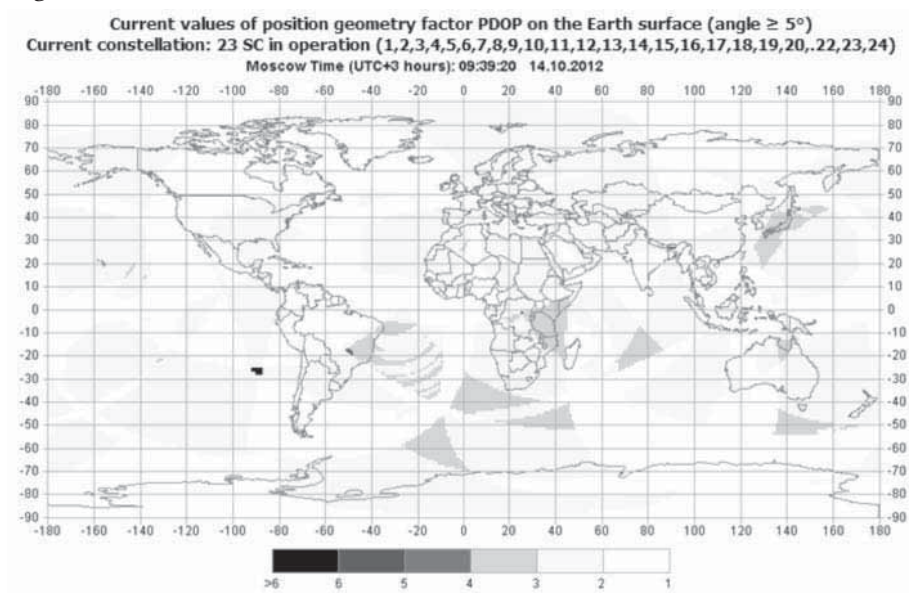
Rys. 2. Trajektorie satelitów systemu nawigacyjnego COMPASS

Segment kosmiczny systemu NAVSTAR GPS, projektowany na 24 satelity, tworzy aktualnie od 31 do 32 satelitów nawigacyjnych o statusie operacyjnym rozmieszczonych na 6 planach orbitalnych. W przypadku odkrytego horyzontu wokół anteny satelitarnej użytkownika konstelacja systemu NAVSTAR umożliwia oczywiście wyznaczenie pozycji punktów bez konieczności korzystania z sygnałów innych systemów nawigacji satelitarnej. W przypadku znacznych przesłoneń horyzontu mogą pojawić się problemy z uzyskaniem rozwiązania. Będą one mogły być wynikiem zbyt małej liczby satelitów lub zakłóceń sygnałów satelitarnych. Wówczas dodatkowe sygnały mogą umożliwić wyznaczenie pozycji lub to ułatwić.

W stosunku do systemu amerykańskiego system GLONASS ma tylko trzy orbity, ale ich nachylenie do równika jest większe i system może być autonomicznie wykorzystany do wyznaczenia pozycji na całej Ziemi. System GLONASS w przeciągu ostatnich lat znacznie poprawił kondycję segmentu kosmicznego i aktu-

alnie w jego skład wchodzi 31 satelitów, w tym statusem satelity operacyjnego oznaczone są zazwyczaj 22 - 24 satelity [7]. Dobrą kondycję systemu GLONASS ilustruje rys. 3. Przedstawione na nim wartości współczynnika PDOP (opis współczynników DOP w pkt. 3) na zdecydowanej większości powierzchni Ziemi nie przekraczają wartości 3.

Jednak nadal podstawowym systemem nawigacji satelitarnej na świecie jest amerykański system NAVSTAR GPS. Dla tematyki pracy jest to istotne stwierdzenie, gdyż pomiary kinematyczne w czasie rzeczywistym wymagają zinicjalizowania odbiornika ruchomego przed rozpoczęciem pomiarów. Aktualnie większość odbiorników wymaga, aby proces inicjalizacji był przeprowadzony w oparciu o sygnały min. 5 satelitów systemu NAVSTAR GPS. Z tego faktu wynika, że rozpoczęcie pomiarów wymaga takiej liczby satelitów, która umożliwi wyznaczenie pozycji bez korzystania z systemu GLONASS. System GLONASS praktycznie nie jest systemem, którego satelity warunkują zinicjalizowanie odbiornika satelitarnego.



Rys. 3. Wartość współczynnika PDOP systemu GLONASS na powierzchni Ziemi

3. Współczynniki DOP

Podstawowymi parametrami obliczanymi na bieżąco przez odbiornik satelitarny, które są wyświetlane na ekranie kontrolera w trakcie pomiarów kinematycznych w czasie rzeczywistym są: współczynnik DOP (Dilution of Precision) charakteryzujący precyzję absolutnej pozycji anteny satelitarnej oraz parametr charakteryzujący dokładność względnej pozycji anteny satelitarnej, różny u po-

szczególnych producentów (odchylenie standardowe, błąd średni kwadratowy, współczynnik Coordinate Quality).

W aspekcie tematyki opracowania interesujące są współczynniki DOP, gdyż ich wartości wyliczane są **wyłącznie** na podstawie liczby i położenia satelitów, których sygnał jest wykorzystywany przez odbiornik satelitarny do wyznaczania pozycji w danym momencie czasu. Z drugiej strony współczynniki DOP nie są zbyt miarodajne dla pomiarów względnych, gdyż są obliczane wyłącznie na podstawie pseudoodległości, podczas gdy podstawą pomiarów względnych są precyzyjne obserwacje fazy. Jest to jednakże podstawowy parametr ujmowany w różnych dokumentach określających warunki wykonywania względnych pomiarów satelitarnych.

Wsparcie systemu GLONASS w wyznaczaniu pozycji powinno uwidocznic się w lepszej konstelacji satelitów w momencie pomiaru, czego wyrazem mierzalnym powinny być niższe wartości współczynników DOP.

Przedstawiając wzór na pseudoodległość w funkcji współrzędnych anteny satelitarnej użytkownika (x, y, z) i współrzędnych satelitów (x^k, y^k, z^k) otrzymamy równania w postaci:

$$\rho^k = \rho_0 + c \cdot \delta t = [(x - x^k)^2 + (y - y^k)^2 + (z - z^k)^2]^{1/2} + c \cdot \delta t \quad (1)$$

Po linearyzacji otrzymamy macierz równań obserwacyjnych w postaci:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{x^k - x_0}{\rho_0} & -\frac{y^k - y_0}{\rho_0} & -\frac{z^k - z_0}{\rho_0} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

Po transformacji z układu geocentrycznego do układu horyzontalnego wartości współczynników DOP są funkcjami elementów przekątnej macierzy obliczanej z zależności:

$$P = (A^T A)^{-1} \quad (3)$$

Wartości współczynników DOP wyrażają zależności:

$$- GDOP (Geometric DOP) = [P_{1,1} + P_{2,2} + P_{3,3} + P_{4,4}]^{1/2} \quad (4)$$

$$- PDOP (Position DOP) = [P_{1,1} + P_{2,2} + P_{3,3}]^{1/2} \quad (5)$$

$$- HDOP (Horizontal DOP) = [P_{1,1} + P_{2,2}]^{1/2} \quad (6)$$

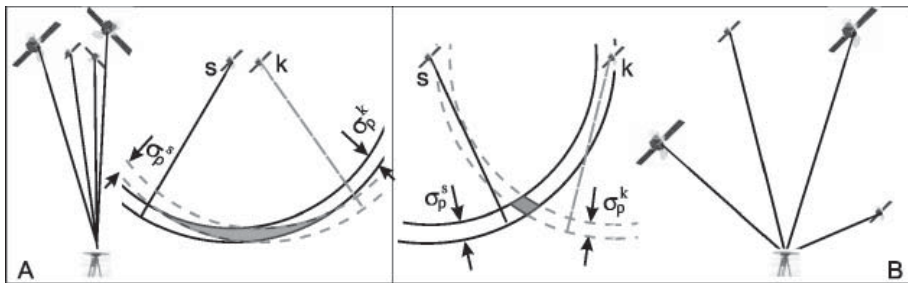
$$- VDOP (Vertical DOP) = [P_{3,3}]^{1/2} \quad (7)$$

$$- TDOP (Time DOP) = [P_{4,4}]^{1/2} \quad (8)$$

Rysunek 4 przedstawia niekorzystne i korzystne rozmieszczenie satelitów w sensie niskiej wartości współczynników DOP. Oznaczono na nim błąd pomiaru poszczególnych pseudoodległości σ_r .

W najprostszym i optymalnym przypadku 4 satelity są rozmieszczone w ten sposób, że jeden znajduje się w zenicie miejsca pomiaru, a 3 pozostałe znajdują się co 120° w płaszczyźnie horyzontu. W takim przypadku wartości współczynników DOP są najniższe i wynoszą odpowiednio: GDOP = 1.73, PDOP = 1.63, HDOP = VDOP = 1.15, TDOP = 0.58 [6].

Zalecenia techniczne opracowane przez GUGiK wymieniają dopuszczalną wartość współczynnika PDOP dla różnego typu pomiarów satelitarnych. Dla pomiarów statycznych określono wartość współczynnika PDOP ≤ 6 przy minimalnie 4 satelitach. W pomiarach kinematycznych w czasie rzeczywistym wartość współczynnika PDOP uzależniono od rodzaju mierzonych punktów. Dla punktów m.in. osnowy pomiarowej sytuacyjnej i wysokościowej wartość PDOP powinna być mniejsza od 3, a dla szczegółów I grupy dokładnościowej PDOP powinien być ≤ 4 [1].



Rys. 4. Ilustracja niekorzystnego (A) i korzystnego (B) rozmieszczenia satelitów

4. Charakterystyka obiektu i wykonanych pomiarów

Pomiary testowe, których wyniki są przedmiotem analizy, wykonano na dwukilometrowym odcinku linii kolejowej w rejonie Słomnik. Na prawie całej długości odcinka testowego od strony zachodniej i południowo-zachodniej występował szpaler wysokich drzew. W rejonie punktów osnowy nr 113, 114 drzewa rosły w bezpośrednim sąsiedztwie linii kolejowej z obydwu stron. Końcówka mierzonego odcinka przebiegała w głębokim wykopie, który kończył się w okolicach punktu 117.

Współrzędne punktów osnowy odcinka testowego wyznaczono w ramach sesji statycznych GPS/GNSS w nawiązaniu do stacji referencyjnych systemu ASG-EUPOS zlokalizowanych w Krakowie (stacja KRAW) i w Proszowicach (stacja PROS). Sesje pomiarowe na punktach trwały od 1h 18min do 9h 27min. Pomiar wykonano 7 odbiornikami firmy Leica Systemów 300, 500 oraz 1200. Punkty osnowy wykorzystano jako stanowiska dla precyzyjnego tachymetru TCA2003, którym wyznaczano współrzędne punktów testowych, oznaczonych na szynie w interwale 10 m i numerowanych zgodnie z kilometrażem (289850 - 291860). Równocześnie z pomiarami tachymetrycznymi prowadzono pomiary kinematyczne w czasie rzeczywistym.



Rys. 5. Odcinek testowy w Słomnikach z oznaczonymi punktami osnowy geodezyjnej

W Słomnikach wykonano dwa pomiary kinematyczne w czasie rzeczywistym. W pierwszym pomiarze pomiary RTK GPS i RTN wykonywano z wykorzystaniem anten choke ring AT503 o specjalnej konstrukcji ograniczającej wpływ sygnałów odbitych na wyznaczaną pozycję punktu. Pomiary wykonywano wg następującej sekwencji:

- min. dwukrotne wyznaczenie współrzędnych punktu z pomiaru RTN w nawiązaniu do systemu ASG-EUPOS z wykorzystaniem systemu NAVSTAR GPS,
- min. dwukrotne wyznaczenie współrzędnych punktu z pomiaru RTK GPS w nawiązaniu do własnej stacji referencyjnej z wykorzystaniem systemu NAVSTAR GPS,
- równoczesny pomiar precyzyjnym tachymetrem TCA2003.

W drugim pomiarze wykorzystano anteny AX1202GG, zarówno na stacji referencyjnej, jak i dla odbiornika ruchomego, dzięki czemu możliwa była sekwencja pomiarowa:

- min. dwukrotne wyznaczenie współrzędnych punktu z pomiaru RTN w nawiązaniu do systemu ASG-EUPOS z wykorzystaniem systemu NAVSTAR GPS,
- min. dwukrotne wyznaczenie współrzędnych punktu z pomiaru RTK GPS w nawiązaniu do własnej stacji referencyjnej z wykorzystaniem systemu NAVSTAR GPS,
- min. dwukrotne wyznaczenie współrzędnych punktu z pomiaru RTK GNSS w nawiązaniu do własnej stacji referencyjnej z wykorzystaniem systemu NAVSTAR GPS oraz systemu GLONASS,
- równoczesny pomiar precyzyjnym tachymetrem TCA2003.

Stacja referencyjna zlokalizowana była w okolicy środka odcinka testowego, w tym samym punkcie dla obydwu kampanii pomiarowych. W przypadku pomiarów RTN korzystano z rozwiązania opartego na wirtualnej stacji referencyjnej VRS, dla której obserwacje generowało oprogramowanie systemu ASG-EUPOS.

W obydwu pomiarach do wyznaczania pozycji wykorzystywano sygnały radiowe z satelitów znajdujących się powyżej 15° nad horyzontem anten. Pomiar nad każdym punktem trwał 7 jednosekundowych epok.

5. Analiza dokładności wyników pomiarów

Podstawą analizy były współrzędne referencyjne punktów odcinka testowego w Słownikach wyznaczone z obserwacji wykonanych precyzyjnym półsekundowym tachymetrem TCA2003 oraz niwelatorem DNA03. Analizowane były różnice współrzędnych punktów obliczone z pomiarów naziemnych i satelitarnych pomiarów kinematycznych w czasie rzeczywistym RTK GPS (system NAVSTAR), RTK GNSS (systemy NAVSTAR i GLONASS) oraz RTN (system typu GBAS: ASG-EUPOS). W trakcie pierwszego z dwóch pomiarów w Słownikach, z racji użycia anteny choke ring AT503, przeanalizowanie istotności wsparcia pozycjonowania sygnałami systemu GLONASS było niemożliwe. Wyniki te były jednak pomocne w przeprowadzonych analizach, gdyż możliwa była lepsza ocena wyników pomiarów wykonanych w odniesieniu tylko do systemu NAVSTAR GPS (dwie niezależne próbki).

Czynnikiem istotnym dla wyników analizy może być wykorzystany w pomiarach sprzęt, gdyż pomiary przeprowadzane były w sąsiedztwie szpaleru drzew oraz w wykopie. Pomiary realizowane były odbiornikami firmy Leica GX1230GG z wykorzystaniem anten: w pierwszym pomiarze choke ring AT503, w drugim pomiarze AX1202GG. Firma Leica stosuje w swoich odbiornikach technologię Clear Track do ograniczania wpływu sygnałów odbitych na wyznaczone pozycje punktów oraz do wyznaczanie pozycji w przypadku sygnałów zakłóconych i słabszych.

Inni producenci również mają i stosują swoje rozwiązania sprzętowo-programowe w celu poprawiania jakości wyników otrzymywanych przez odbiornik satelitarny.

W tabeli 1 zestawiono wybrane, podstawowe statystyki [5] prób pomiarowych dla poszczególnych współrzędnych z uwzględnieniem sposobu wyznaczenia pozycji. Przedstawiają one m.in. zakres rozrzutu różnic współrzędnych oraz miarę tego rozrzutu określoną przez odchylenie standardowe, które dla wszystkich pomiarów zawiera się w przedziale 0,8 – 1,5 cm dla współrzędnych sytuacyjnych oraz w przedziale 1,2 – 1,8 dla wysokości. Oznacza to, że rozrzut wartości różnic wysokości jest przeciętnie większy niż w przypadku współrzędnych sytuacyjnych.

Tabela 1. Zestawienie wybranych statystyk pomiarów w (mm), V - współczynnik zmienności

Pomiar	1						2								
	RTN			RTK GPS			RTN			RTK GPS			RTK GNSS		
Metoda	ΔY	ΔX	ΔH	ΔY	ΔX	ΔH	ΔY	ΔX	ΔH	ΔY	ΔX	ΔH	ΔY	ΔX	ΔH
Min.	-33	-92	-50	-35	-44	-48	-40	-45	-57	-45	-56	-70	-49	-52	-57
Max.	20	21	49	13	2	76	43	35	59	50	12	28	46	12	36
Rozstęp	53	113	99	48	46	124	83	80	116	95	67	98	95	64	93
Średnia	-12	-12	-11	-13	-17	-4	-11	-4	13	-13	-13	5	-13	-14	5
Mediana	-13	-10	-11	-13	-17	-5	-10	-5	12	-13	-13	6	-14	-13	6
Od.St.	10	15	15	9	8	12	11	11	18	11	9	13	11	9	13
$ V $	83	125	136	69	47	300	100	275	138	85	69	260	85	64	260
Skośność	0.49	-1.73	0.56	0.16	-0.53	1.34	-0.24	-0.00	-0.21	1.20	-0.80	-1.87	0.99	-0.78	-1.48
Kurtoza	0.17	6.80	1.30	-0.32	0.75	8.9	0.67	1.54	0.68	8.35	2.90	6.63	7.34	2.32	4.51

Wartość średniej arytmetycznej różnic współrzędnych w każdym analizowanym przypadku praktycznie pokrywa się z medianą, czyli średnia dobrze opisuje analizowane dane. Jako miarę asymetrii rozkładu różnic danej współrzędnej zestawiono w tabeli skośność. Najbliższy symetrii jest rozkład różnic współrzędnych w pomiarze drugim w przypadku danych z ASG-EUPOS. W przypadku pomiaru drugiego widać korelację asymetrii rozkładów różnic odpowiednich współrzędnych dla pomiarów RTK GPS i RTK GNSS. Natomiast pierwszy pomiar RTK GPS nie jest w tym aspekcie skorelowany z pomiarami przeprowadzonymi w drugim terminie. Świadczy to o pewnej zależności wyników od warunków atmosferycznych związanych z dniem pomiaru oraz braku istotnych różnic w asymetrii rozkładów między pomiarami RTK GPS i RTK GNSS. Miarą koncentracji wyników jest kurtoza. Tylko w jednym z analizowanych przypadków wartość kurtozy nie jest dodatnia, a dla większości z nich jej wartość świadczy o dużej koncentracji różnic współrzędnych wokół wartości średniej dla danej współrzędnej, czyli występują relatywnie niezbyt liczne, ale w zestawieniu z wartościami ekstremalnymi, wyraźnie odstające obserwacje. Na podstawie wartości współczynnika zmienności można stwierdzić, że dla osiągniętych wyników istotna była technika pomiarowa. Przyjmu-

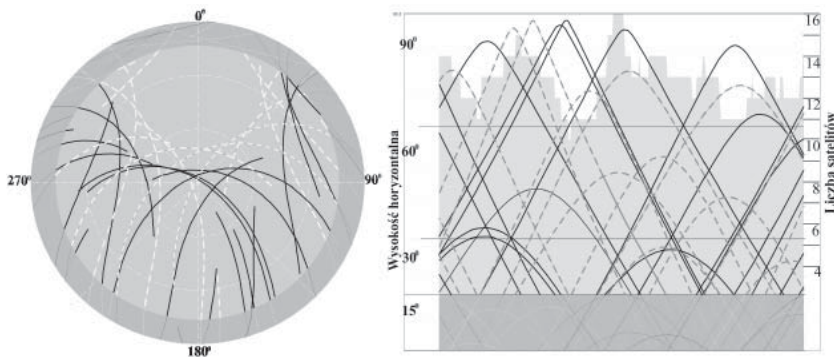
je się, że w zakresie 10% wartości współczynnika zmienności nie ma istotnych różnic w zróżnicowaniu cechy dwóch populacji. W analizowanych danych występuje istotne zróżnicowanie wyników między pomiarami RTN i RTK. Widoczniesze jest to w drugim dniu pomiarów, w którym pomiary RTK GPS i RTK GNSS mają prawie identyczne zróżnicowanie wyników, które jest wyraźnie odmienne niż dla pomiarów RTN w tym dniu. Identyczne wnioski płyną z analizy porównawczej histogramów.

Wyniki wskazują, że w zastosowaniach geodezyjnych istotniejsza jest metoda wyznaczania pozycji (RTK czy RTN), niż włączenie do rozwiązania satelitów z systemu GLONASS.

6. Analiza dostępności sygnału i wartości współczynników DOP

Na rysunku 6 przedstawiono trajektorie satelitów z drugiego dnia pomiarów w Słomnikach. Wynika z niego, że satelity systemu GLONASS mogą dobrze uzupełniać konstelację satelitów systemu NAVSTAR GPS jak również, że sygnały satelitów systemu amerykańskiego były wystarczające do realizacji pomiarów. Rysunek przedstawia jednakże sytuację bez uwzględnienia przesłoneń horyzontu.

W trakcie analizy określono liczbę satelitów, z których sygnał był odbierany przez antenę GNSS ruchomego odbiornika satelitarnego w trakcie poszczególnych pomiarów z liczbą satelitów znajdujących się powyżej minimalnej wysokości horyzontalnej w tych samych momentach czasu. Wyniki zestawiono w tabeli 2. Liczba wszystkich wyznaczonych pozycji dotyczy pozycji już uśrednionych z minimum 2 lub 3 kolejno po sobie wykonanych pomiarów danego punktu. Analizie poddano wszystkie pomiary, także te, w których wózek pomiarowy był ustawiany ponownie nad punktem po przejeździe pociągu. W pomiarze 2 większa liczba wyznaczonych pozycji wynika z włączenia do testów systemu GLONASS. Wartości procentowe wskazują natomiast, że problemy z dostępnością sygnału występowały generalnie proporcjonalnie do liczby wyznaczonych pozycji.



Rys. 6. Trajektorie satelitów w trakcie pomiaru odcinka w Słomnikach: linia ciągła - system NAVSTAR GPS, linia przerywana - system GLONASS

Tabela 2. Zestawienie dostępności sygnałów satelitarnych w trakcie pomiarów

Oznaczenie	Pomiar 1		Pomiar 2	
	Liczba	%	Liczba	%
Liczba pozycji	420	100,0	646	100,0
Sygnal wszystkich satelitów	304	72,4	489	75,7
Brak sygnału 1 satelity	95	22,6	139	21,5
Brak sygnału >1 satelity	21	5,0	18	2,8

Oprócz momentów, w których odbiornik satelitarny nie mógł odbierać sygnałów z satelitów z powodu przesłonięć horyzontu przez drzewa lub ściany wykopu, występowały też okresy, w których odbiornik nie mógł wyznaczyć pozycji z powodu zbyt małej liczby odbieranych sygnałów z satelitów lub z powodu zakłóceń sygnałów satelitarnych. Zestawienie przerw w pomiarach przedstawia tabela 3.

Procentowo udział czasu przerw w całkowitym czasie pomiarów ujęto w tabeli 4. W pierwszym pomiarze nie odbierano sygnałów z satelitów systemu GLONASS. Istotny jest moment pomiaru i aktualna konstelacja satelitów w miejscu pomiarów. Wpływ braku satelitów na możliwość przeprowadzenia pomiarów większy był w pierwszym pomiarze i wyniósł średnio 26%. Natomiast w drugim przy odbiorze sygnałów z satelitów systemu GLONASS wyniósł średnio 19%. Można więc oszacować orientacyjnie istotność skorzystania z systemu GLONASS na 7%. Należy jednakże podkreślić, że wniosek nie jest uniwersalny i dotyczy tylko wykonanego pomiaru ze względu na zbyt małą reprezentatywność próbki związanej z jednym obiektem pomiarów. Analizowano cztery dni pomiarowe, a rozbieżności podane w tabeli 4 są większe, niż oszacowany wpływ skorzystania z systemu GLONASS.

Tabela 3. Zestawienie przerw w pomiarach

Punkt	Pomiar i godzina przerwy	Czas trwania przerwy	Przyczyna
289990	1: 12:25:38	01:08:32	Brak danych z ASG-EUPOS
	2: 13:13:57	01:13:06	Za mało satelitów Brak danych z ASG-EUPOS
290320	1: 15:15:32	00:52:50	Za mało satelitów
	2: 17:07:30	00:48:22	Za mało satelitów
290520	1: 17:07:49	00:49:02	Za mało satelitów
290720	1: 18:39:36	00:21:16	Brak danych z ASG-EUPOS
290820	2: 11:55:00	00:26:12	Brak danych z ASG-EUPOS
291090	1: 10:28:14	01:11:56	Za mało satelitów
291080	2: 13:59:15	00:29:04	Brak danych z ASG-EUPOS
291300	2: 15:56:20	00:55:01	Za mało satelitów, zakłócenia sygnału GPS
291310	1: 12:50:53	01:01:59	Za mało satelitów, zakłócenia sygnału GPS
291340	2: 17:31:42	00:16:09	Za mało satelitów, zakłócenia sygnału GPS
291560	1: 15:14:59	00:52:33	Za mało satelitów

Tabela 4. Udział przerw w pomiarach do czasu pomiarów: A - brak danych z ASG-EUPOS, S - za mało śledzonych satelitów

Pomiar 1				Pomiar 2			
dzień 1		dzień 2		dzień 1		dzień 2	
A+S	S	A+S	S	A+S	S	A+S	S
36%	19%	33%	33%	26%	26%	22%	12%

Określenie wpływu zakłóceń ciągłości i poprawności odbioru sygnałów satelitarnych i modemowych na dokładność wyznaczenia pozycji punktów w warunkach terenowych jest bardzo trudne. W przypadku odcinka testowego Słomniki występowały szpalery drzew, który to rodzaj przeszkody dla sygnałów satelitarnych jest bardzo charakterystyczny dla obszarów kolejowych, ale i bardzo trudny do analizy ze względu na brak regularności i w pewnym nieprzewidywalnym zakresie zmienność położenia w czasie ze względu na wiatr.

Należy podkreślić, że szpaler drzew występował od południowego zachodu w bezpośrednim sąsiedztwie toru lub w pewnej odległości na niemal całej długości odcinka testowego Słomniki. Z punktu widzenia pomiarów satelitarnych i występowania przeszkód terenowych, najtrudniejszy odcinek znajdował się w kilometrażu 291200-291450 ze względu na obustronne bezpośrednie sąsiedztwo wysokich drzew. Z tego powodu w okolicy mostu na Szreniawie następowały w obydwu kampaniach pomiarowych przerwy około godzinne ze względu na zbyt małą liczbę satelitów. Dodatkowo ich sygnał był zakłócany przez sąsiednie drzewa powodując utraty ciągłości śledzenia sygnału GPS na częstotliwości L2, a momentami na obydwu częstotliwościach – było to dla 5. czy 6. satelity, które to satelity były nieodzowne do wyznaczenia pozycji. Charakterystyczne jest wystąpienie problemów z wyznaczaniem pozycji tych samych lub sąsiednich punktów w obydwu kampaniach pomiarowych.

Z kolei w tabeli 5 zestawiono odcinki, na których punkty miały większe wartości różnic współrzędnych z pomiarów naziemnych i satelitarnych w czasie rzeczywistym. Największe problemy wystąpiły w trakcie pomiarów punktu 291370. Pomiar powtarzany był czterokrotnie, a różnice w stosunku do pomiaru precyzyjnym tachymetrem dla współrzędnej X wahały się na poziomie 6 – 9 cm, przy pozycjonowaniu w odniesieniu do 8 satelitów. W trakcie drugiego pomiaru nie osiągnęły nawet 2 cm przy pozycjonowaniu w odniesieniu do 7 satelitów. Teoretyczne wzmocnienie rozwiązania poprzez włączenie aż 6 satelitów systemu GLONASS w tym przypadku nie przyniosło wyraźnej poprawy współrzędnych sytuacyjnych, natomiast różnica wysokości była największa i sięgnęła 45 mm, przy 33 mm dla systemu NAVSTAR GPS i 18 mm przy korzystaniu z danych ASG-EUPOS w pomiarze RTN. W trakcie pomiarów tego punktu współczynnik GDOP wynosił 2,5 przy korzystaniu z sygnałów systemu NAVSTAR. Włączenie do rozwiązania satelitów systemu GLONASS spowodowało spadek współczynnika GDOP do 1,7.

Tabela 5. Zestawienie odcinków z większymi różnicami współrzędnych punktów

Lp.	Początek	Koniec	Współrzędna
1	290220	290310	X, Y
2	290390	290550	X, Y
3	290320	290560	H
4	290590	291130	X, Y
5	290610	290910	H
6	290140	291170	H
7	291230	291560	X, Y
8	291340	291650	H
9	291840	291860	X, Y
10	191610	291640	H

W analizie korelacji między wartością współczynników DOP i liczbą satelitów widoczna jest zależność ujemnie wysoka, przy czym nieznacznie, ale zawsze wyższa w przypadku pomiarów z wykorzystaniem systemu GLONASS. W związku z tym można stwierdzić, że w aspekcie poprawy geometrii przestrzennego wcięcia wstecz wykorzystanie satelitów systemu GLONASS nie przyniesie istotnych korzyści. Badanie korelacji między dokładnością pomiaru satelitarnego a współczynnikami DOP oraz liczbą satelitów wykazało korelację nikłą, sporadycznie słabą, o wartości współczynnika $r < 0.2$.

Zakładając, że korelacja nie ma charakteru liniowego, można przeanalizować zakres i częstość zmian wartości współczynników DOP przy pomiarach RTK GPS i RTK GNSS wykonywanych bezpośrednio po sobie, a więc w warunkach atmosferycznych i zakłóceń sygnałów możliwie najbardziej zbliżonych. Z analizy 201 różnic par pomiarów wynika, że dla prawie 90% wyników zmiana współczynnika DOP wynikająca z większej liczby satelitów nie przekroczyła 0,2 (tabela 6). Liczba satelitów systemu GLONASS powodująca tak nieznaczne zmiany wartości współczynników DOP wynosiła 4 - 8, przy 5 - 8 satelitach systemu NAVSTAR GPS. Współczynnik GDOP przyjmował wartości od 1,4 do 5,1. Istotne zwiększenie liczby satelitów, nawet o 50%, skutkowało nieznaczną poprawą geometrii zadania w sensie współczynników DOP.

Tabela 6. Zakres zmiany wartości współczynnika DOP i odpowiadający mu udział procentowy wszystkich pomiarów

Przedział $\Delta DOP^{RTK\ GPS-RTK\ GNSS}$	Liczebność [%]
[-0,2, 0,2]	90
[-0,5, -0,2) \cup (0,2, 0,5]	6
[-1,0, -0,5) \cup (0,5, 1,0]	3
[-1,5, -1,0) \cup (1,0, 1,5]	1

7. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych analiz wyników pomiarów dwukilometrowego odcinka testowego toru w Słomnikach nie stwierdzono istotnego wsparcia przez system GLONASS satelitarnych pomiarów kinematycznych w czasie rzeczywistym realizowanych w oparciu o sygnały satelitów systemu NAVSTAR GPS.

Analiza wyników pomiarów została przeprowadzona tak, aby uzyskać odpowiedź na pytania, czy w bardziej wymagających warunkach pomiaru (przesłonięcia horyzontu wraz z powodowanymi przez nie zakłóceniami sygnałów satelitarnych):

- korzystanie z systemu GLONASS umożliwia uzyskanie wyższych dokładności wyznaczanych pozycji punktów?
- odbieranie sygnału z satelitów systemu GLONASS poprawia istotnie geometrię przestrzennego wcięcia wstecz w sensie mierzalnym, czyli współczynników DOP?

Nie można stwierdzić poprawy dokładności wyznaczania współrzędnych punktów przy korzystaniu z sygnałów satelitów systemu GLONASS. Niejednokrotnie wyniki były mniej dokładne, niż w przypadku korzystania tylko z systemu NAVSTAR GPS.

O ile generalnie równoległe prace nad systemami NAVSTAR GPS i GLONASS wynikały z rywalizacji militarnej dwóch państw, o tyle europejski system Galileo jest w założeniach systemem cywilnym. Jedną z podstawowych idei twórców systemu Galileo jest zwielokrotnienie liczby radioźródeł dla nawigacji satelitarnej. W aspekcie zastosowań geodezyjnych pożytek z tego tytułu może się okazać niewielki. Wnioskowanie, że system GLONASS nie jest wsparciem dla pomiarów satelitarnych nie jest uzasadnione, ale można stwierdzić, że zdarzają się nierzadko sytuacje, w których użytkownik tego wsparcia nie odczuje. Projekt GNSS przyniesie znaczące korzyści dla nawigacji lotniczej. W geodezji należy je ocenić jako raczej umiarkowane. Wpływ przesłonięć horyzontu może przejawiać się poprzez:

- ograniczenie liczby satelitów, z których sygnał jest odbierany przez antenę GPS odbiornika satelitarnego,
- zakłócanie sygnałów satelitarnych,
- zakłócanie sygnałów GSM (głównie źródła fal elektromagnetycznych, ale również brak zasięgu sieci GSM),
- zakłócanie sygnałów modemów radiowych w sposób analogiczny jak dla sygnałów GSM.

Z wypunktowań wynika, że dodatkowy system nawigacji satelitarnej nie jest w stanie skompensować problemów w trudniejszym dla pomiarów satelitarnych terenie. W przypadku większych przesłonięć horyzontu wokół mierzonego punktu następowała przerwa w pomiarze. Wynikała ona ze zbyt małej lub minimalnej liczby satelitów przy istotnie zakłóconym ich sygnale. Ograniczenie dostępności sygnałów z satelitów będzie zazwyczaj powodowało pogorszenie geometrii przestrzennego wcięcia wstecz. Natomiast ten wpływ przeszkód terenowych na dokładność pozycjonowania satelitarnego nie jest aż tak istotny, jak wpływ zakłóceń

sygnałów satelitarnych oraz przerwy w ciągłości odbioru sygnału satelitarnego przez antenę odbiornika satelitarnego.

Bibliografia

- [1] GUGiK, Zalecenia Techniczne. Pomiary satelitarne GNSS oparte na systemie stacji referencyjnych ASG-EUPOS. Warszawa, 2011.
- [2] ICAO, Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual. 2005.
- [3] Kaplan E.D (editor), Understanding GPS, Principles and Applications. Artech Hause, Boston, 1996.
- [4] Seeber G., Satellite Geodesy. Walter de Gruyter, Berlin - New York, 2003.
- [5] StatSoft Inc., Statistica (data analysis software system), version 9.1. 2010.
- [6] Tsui J., Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach. John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [7] <http://new.glonass-iac.ru/en/GLONAS>.