

Renata PELC-MIECZKOWSKA¹

ANALIZA WIARYGODNOŚCI POZYCJONOWANIA GPS/RTK W TRUDNYCH WARUNKACH OBSERWACYJNYCH

Streszczenie

Dzięki dynamicznemu rozwojowi sieci permanentnych stacji referencyjnych techniki satelitarnego pozycjonowania GNSS stają się powszechnie stosowanymi technikami bezpośredniego pozyskiwania geodanych. Dostępne obecnie, geodezyjne odbiorniki GNSS są coraz bardziej zaawansowane technologicznie dzięki czemu mogą wyznaczać pozycję nawet w trudnych warunkach obserwacyjnych. Problemem pozostaje jednak wiarygodność takiego wyznaczenia pozycji. W pracy poruszono problem precyzji i dokładności pomiarów GNSS/RTK. Przedstawione w niniejszym opracowaniu wyniki badań pokazują, że podczas wykonywania pomiarów GNSS/RTK w warunkach ograniczonej dostępności satelitów mogą występować błędy grube, rzędu od kilkudziesięciu centymetrów nawet do kilku metrów, mimo niskich wartości parametrów precyzji. Źródłem tych błędów są prawdopodobnie błędy systematyczne prowadzące do nieprawidłowego wyznaczenia nieoznaczoności, które nie znajdują odzwierciedlenia w parametrach precyzji pomiaru będących jedynie odzwierciedleniem błędów przypadkowych. W pracy zwrócono uwagę na potrzebę opracowania metody zwiększającej wiarygodność pozycjonowania GNSS/RTK w trudnych warunkach obserwacyjnych np. poprzez wprowadzenie dodatkowej kontroli.

Słowa kluczowe: GNSS, RTK, zasłony terenowe, precyzja, dokładność

1. Wstęp

Techniki satelitarnego pozycjonowania GNSS/RTK są coraz częściej stosowane w pomiarach geodezyjnych przede wszystkim ze względu na możliwość szybkiego wyznaczenia dokładnych współrzędnych niezależnie od pory dnia, pogody czy dostępności punktów osnowy geodezyjnej. W Polsce zainteresowanie geodetów technikami satelitarnymi wzrosło wraz z uruchomieniem w 2008 roku systemu ASG-EUPOS, oferującego między innymi serwis czasu rzeczywistego NAWGEO dostarczający dane RTK. Deklarowana dokładność wyznaczenia pozycji z wykorzystaniem serwisu NAWGEO, przy zachowaniu ogólnych zasad dotyczących wykonywania pomiarów RTK, wynosi 0,03 m w poziomie i 0,05 m w pionie [1].

Podstawowym ograniczeniem satelitarnych metod pozycjonowania jest jednak konieczność zapewnienia antenie odbiornika dostępu do sfery niebieskiej, czyli na punkcie pomiarowym należy unikać zakryć horyzontu spowodowanych przeszkodami terenowymi (budynki, drzewa, krzewy itp.). Występowanie zasłon terenowych na punktach pomiarowych wpływa na znaczne pogorszenie dokładności i wiarygodności pomiarów GNSS, zarówno statycznych jak i kinematycznych [2, 3, 4]. Przenikanie sygnału przez korony drzew powoduje znaczne jego osłabienie. Zmiana wartości stosunku sygnału do szumu (SNR) spowodowana przenikaniem sygnału przez liście i igły oraz gałęzie zależy od gęstości materiału oraz drogi jaką w danym materiale pokonuje sygnał [5]. Największy wpływ na spadek współczynnika SNR ma jednak nie sama gęstość materiału przez który przenika sygnał, a ilość wilgoci zawartej w tym materiale [6]. Osłabienie sygnału powoduje z kolei występowanie uskoków

¹mgr inż., Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

fazy fali nośnej, które prowadzą do błędnego wyznaczenia nieoznaczoności. Prawdopodobieństwo wyznaczenia nieoznaczoności maleje zatem wraz ze wzrostem intensywności zasłon terenowych [7].

Dostępne obecnie, geodezyjne odbiorniki GNSS są coraz bardziej zaawansowane technologicznie dzięki czemu mogą wyznaczać pozycję nawet w trudnych warunkach obserwacyjnych. Problemem pozostaje jednak wiarygodność takiego wyznaczenia pozycji ponieważ błędy grube powodowane przez zasłony terenowe są trudne do wykrycia i wyeliminowania.

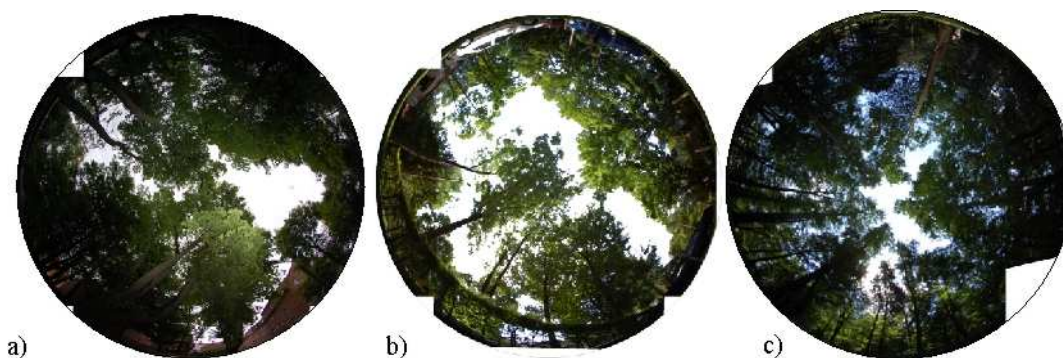
2. Metodologia badań

Eksperymenty pomiarowe prowadzono od kwietnia 2009 do lipca 2011 roku. Punkty pomiarowe zostały zlokalizowane na terenie kampusu uniwersyteckiego Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (rys. 1.). Lokalizację punktów wybrano w taki sposób aby znajdowały się w otoczeniu drzew iglastych i liściastych stanowiących zasłony terenowe dla pomiarów GNSS.



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych

Przy wyborze lokalizacji punktów pomiarowych szczególną uwagę zwrócono na charakter zasłon terenowych (rys. 2). Punkt *P* zlokalizowany wewnątrz parku, otoczony przez drzewa iglaste i liściaste charakteryzował się największą intensywnością zasłon terenowych. Nieco mniej osłonięte były punkty *K* i *D* zlokalizowane w pobliżu budynku Katedry Geodezji Satelitarnej i Nawigacji. Oceny intensywności zasłon terenowych dokonano na podstawie cyfrowych zdjęć fotograficznych wykonanych aparatem Nikon D70 z obiektywem szerokokątnym typu „fish eye” o ogniskowej 8mm.



Rys. 2. Zasłony terenowe nad punktami pomiarowymi: a) punkt D, b) punkt K i c) punkt P.

Do wykonania eksperymentu użyto trzech modeli geodezyjnych odbiorników GNSS: Topcon HiperPro, Leica Viva GS10 oraz Trimble SPS881. Na każdym z trzech punktów wykonano jedną, czterogodzinną sesję pomiarową każdym typem odbiornika. Pomiary wykonano metodą GPS/RTK z wykorzystaniem danych RTK serwisu NAWGEO systemu ASG-EUPOS. Podczas wszystkich pomiarów przyjęto następujące założenia techniczne:

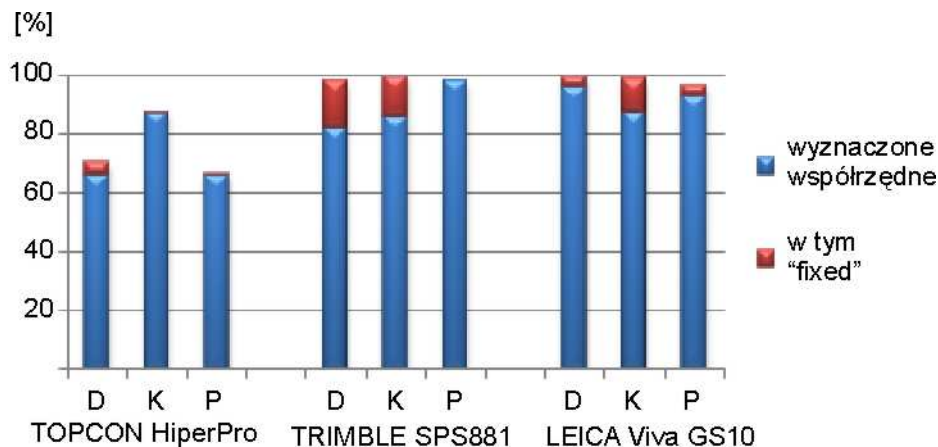
- interwał wyznaczania pozycji: 1s
- brak uśredniania pozycji
- maska elewacji: 10°

- strumień danych RTK: NAWGEO_VRS_3.1
- zapis obserwacji RTK precyzyjny (*fixed*), RTK zgrubny (*float*) oraz pozycji autonomicznych.

Czas wykonywania poszczególnych sesji pomiarowych zaplanowano w taki sposób, aby prowadzić pomiary przy możliwie najlepszej konstelacji satelitów GPS.

3. Analiza wyników

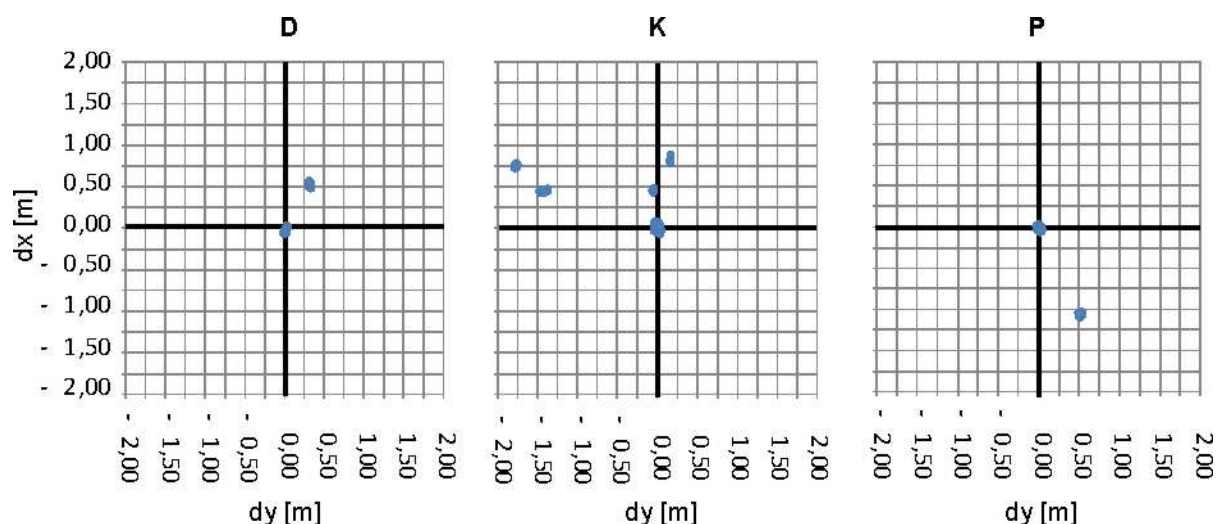
W wyniku pomiarów terenowych na każdym punkcie pomiarowym zarejestrowano łącznie około 40 tys. pozycji, z czego pozycji uzyskanych w wyniku rozwiązania dla którego nieoznaczoność została wyznaczona jako liczba całkowita (rozwiązanie *fixed*) 3171 na punkcie *D*, 4248 na punkcie *K* oraz zaledwie 594 na punkcie *P* (rys. 3).



Rys. 3. Statystyka pomiaru

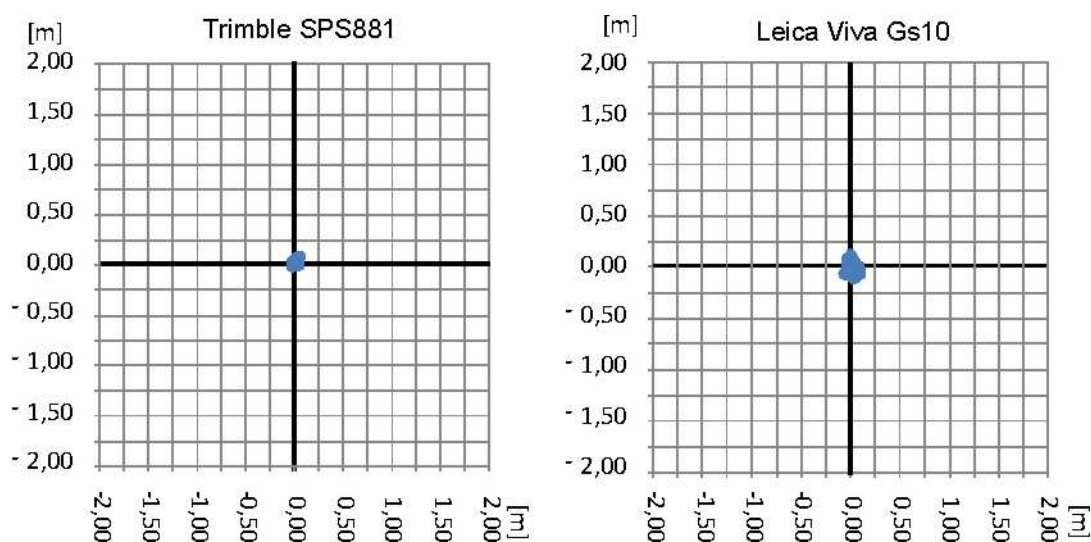
Liczba współrzędnych uzyskanych z rozwiązania *fixed* na poszczególnych punktach pomiarowych zdaje się być skorelowana z intensywnością zasłon terenowych występujących na danym punkcie. Widoczna jest także zależność pomiędzy modelem odbiornika, a procentowym udziałem wyznaczeń typu *fixed* w ogólnej liczbie współrzędnych wyznaczonych przez dany odbiornik na danym punkcie. Biorąc pod uwagę uzyskane w prezentowanym doświadczeniu wyniki można zauważyć, że najwięcej pozycji wyznaczonych z precyzyjnego RTK zarejestrował odbiornik Leica, nieco mniej Topcon, a najmniej Trimble. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że na punkcie o największym zagęszczeniu zasłon terenowych, a więc o najtrudniejszych warunkach pomiarowych odbiornik Leica nie zarejestrował żadnej pozycji typu *fixed* podczas gdy dwa pozostałe odbiorniki rejestrowały takie współrzędne. Nie należy zatem ulegać pokusie oceny jakości odbiornika, co zresztą nie jest przedmiotem niniejszego opracowania, na podstawie możliwości uzyskania współrzędnych z rozwiązania *fixed* ponieważ równie ważna jak możliwość wyznaczenia pozycji jest jej wiarygodność.

W dalszej części opracowania przeanalizowane zostaną wyłącznie współrzędne uzyskane z precyzyjnego pozycjonowania RTK czyli takie dla których nieoznaczoność została wyznaczona w zbiorze liczb całkowitych (rozwiązanie *fixed*). Analizy dokładności wyznaczenia współrzędnych dokonano w odniesieniu do współrzędnych przyjętych za prawdziwe, które zostały wyznaczone w długich (4 i 6 godzinnych), powtórzonych kilkakrotnie sesjach pomiarowych opracowanych w postprocessingu. Dokładność wyznaczenia pozycji w prezentowanym eksperymencie terenowym wynosiła od pojedynczych centymetrów do kilku, a w przypadku wysokości nawet kilkudziesięciu metrów (rys. 4).



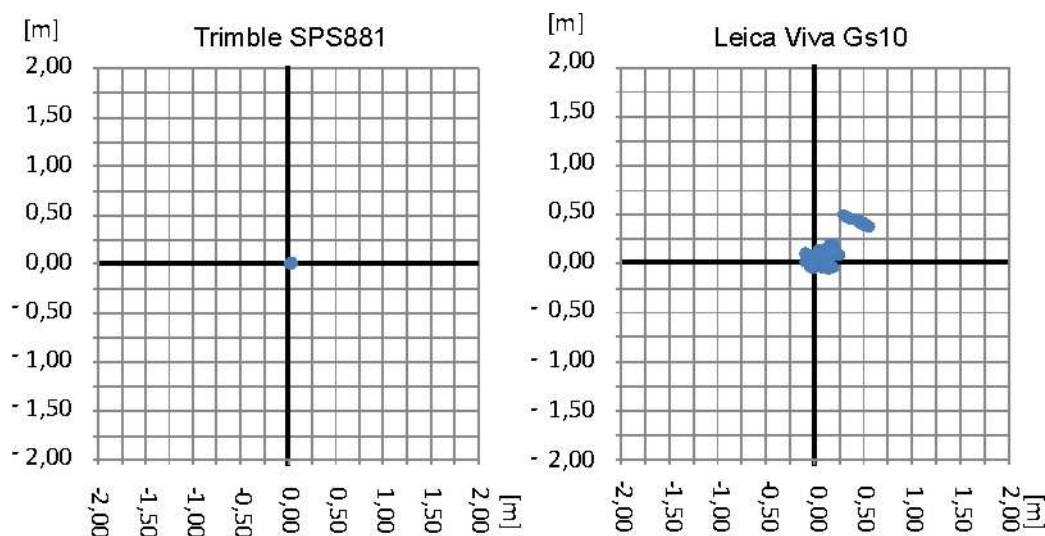
Rys. 4. Dokładność współrzędnych płaskich – Topcon HiperPro

Analizując rozkład współrzędnych płaskich wyznaczonych przez poszczególne modele odbiorników GNSS można zauważyć, że odbiornik Topcon HiperPro na każdym punkcie pomiarowym wyznaczał w trybie precyzyjnym RTK zarówno dokładne współrzędne jak współrzędne obarczone dużymi błędami dochodzącymi do dwóch metrów.



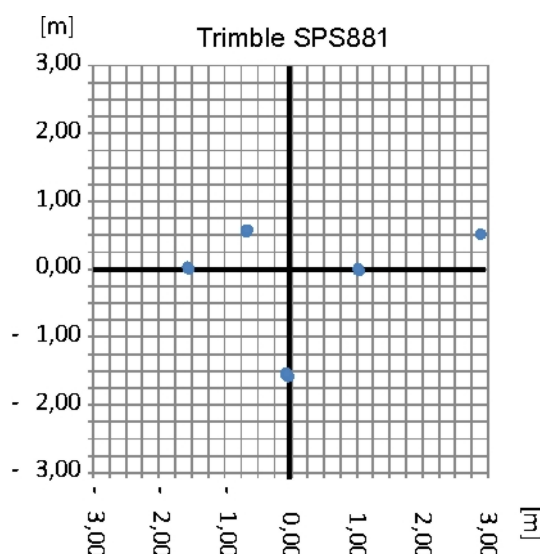
Rys. 5. Dokładność współrzędnych płaskich uzyskanych na punkcie D

Analizując wyniki pomiarów uzyskanych przez dwa pozostałe odbiorniki można zauważyć natomiast nieco inny rozkład błędów niż w przypadku odbiornika Topcon. Za najlepiej wyznaczony punkt można uznać punkt D (rys. 5) dla którego maksymalny błąd położenia punktu wynosił 0,13 m dla odbiornika Leica oraz 0,10 m dla odbiornika Trimble, a błędy średnie odpowiednio 6 cm i 3 cm.



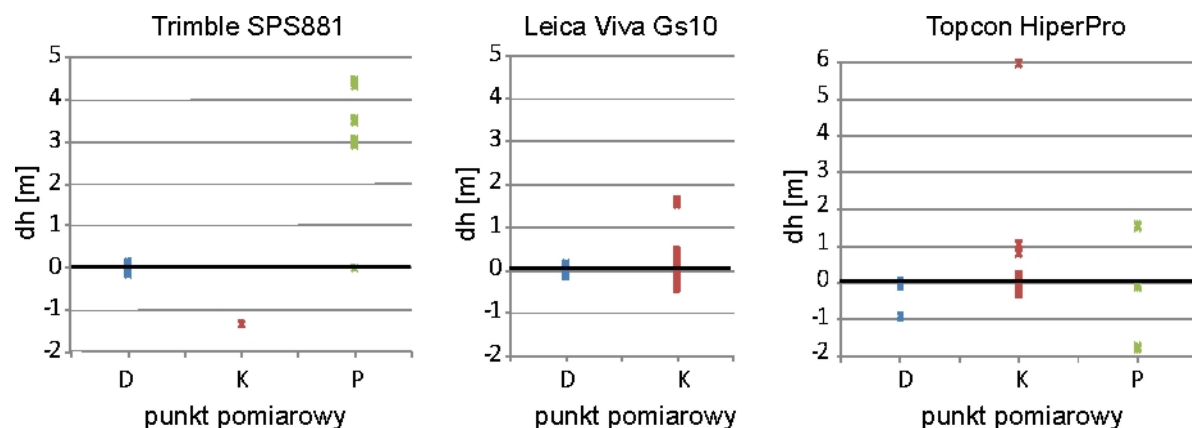
Rys. 6. Dokładność współrzędnych płaskich uzyskanych na punkcie K

Punkt *K*, pomimo iż charakteryzował się nieco mniejszym zagęszczeniem zasłon terenowych niż punkt *D*, został wyznaczony prawidłowo (współrzędne płaskie) jedynie przez odbiornik Trimble (rys. 6), który wyznaczył pozycję tylko z jednej inicjalizacji i zarejestrował zaledwie 17 pozycji. Maksymalny błąd położenia punktu w tym przypadku wynosił 4 cm a średni błąd położenia punktu w poziomie 3 cm. Odbiornik Leica natomiast zarejestrował na tym punkcie łącznie ponad 2600 pozycji (z 5 inicjalizacji), wśród których były zarówno współrzędne o dużej dokładności jak i współrzędne obarczone błędem dochodzącym do 0,7 m, przy czym średni błąd położenia punktu w poziomie wynosił 13 cm.



Rys. 7. Dokładność współrzędnych płaskich uzyskanych na punkcie P

Na punkcie *P*, na którym zagęszczenie zasłon terenowych było największe, odbiornik Leica nie wyznaczył żadnej pozycji RTK *fixed*, natomiast wszystkie pozycje wyznaczone przez odbiornik Trimble były obarczone błędami grubymi o dużych i bardzo dużych wartościach od 80 cm do ponad 2 metrów (rys. 7). Na przykładzie wyznaczenia współrzędnych płaskich punktu *P* odbiornikiem Trimble widać wyraźnie specyficzny rozkład wyników pomiarów RTK prowadzonych w warunkach leśnych. Liczba reinicjalizacji w tym przypadku wynosiła 5 i widać dokładnie, że wyznaczone pozycje tworzą pięć grup charakteryzujących się bardzo wysoką precyzją pomiaru, ale obarczonych błędami grubymi, które są odzwierciedleniem błędów wyznaczenia nieoznaczoności spowodowanych prawdopodobnie uskokami fazy fali nośnej (*cycle slips*).



Rys. 8. Rozkład dokładności wysokości

Dokładność wyznaczenia wysokości w przeprowadzonym eksperymencie wahała się od pojedynczych centymetrów do kilku metrów, a w przypadku pomiaru punktu *P* odbiornikiem Trimble nawet kilkunastu metrów, co nie zostało zaprezentowane na wykresie ze względu na jego czytelność (rys. 8). Nawet trzykrotnie lub czterokrotnie większe błędy wysokości w stosunku do błędów horyzontalnych są charakterystyczne dla pozycjonowania satelitarnego co wynika z geometrii wcięcia przestrzennego, na podstawie którego są wyznaczane współrzędne. W prezentowanych wynikach pomiarów taka zależność też jest widoczna. Średni błąd wyznaczenia wysokości punktu *D* odbiornikami Trimble i Leica (błędy położenia punktu w poziomie poniżej 5 cm) wynosił odpowiednio 8 cm i 5 cm. Natomiast w przypadku pomiaru odbiornikiem Trimble punktu *K*, dla którego średni błąd położenia punktu w poziomie wynosił 4 cm, średni błąd wysokości wynosił aż 1,34 m. Należy jednak pamiętać, że ten wynik został uzyskany z zaledwie 17 wyznaczeń pozycji z jednej inicjalizacji odbiornika przez co nie może być miarodajny.

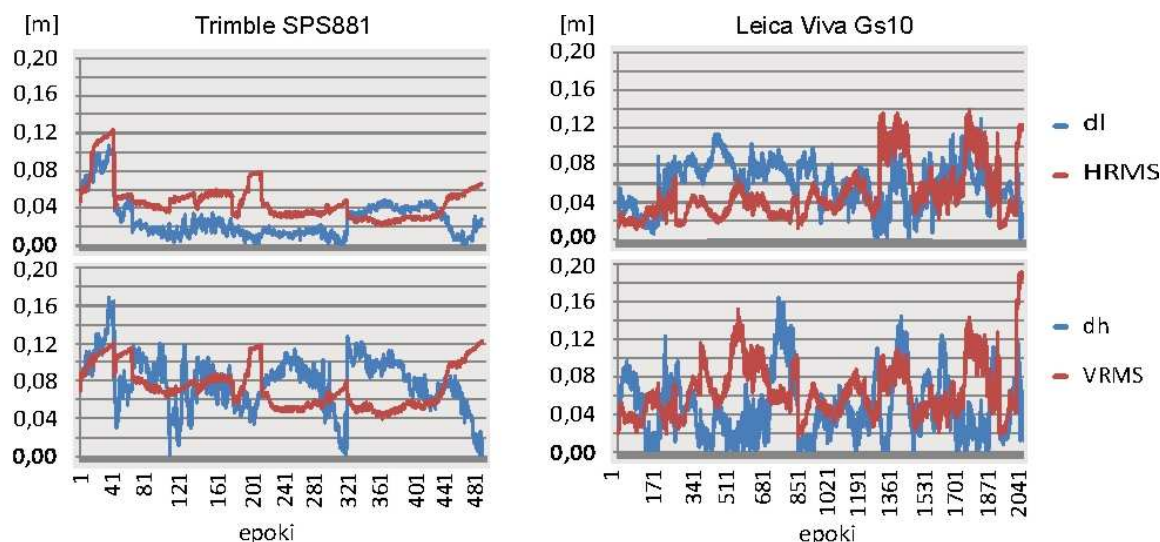
4. Parametry precyzji w pomiarach RTK

Precyzję pomiaru w najlepszy sposób określa błąd średni pojedynczego spostrzeżenia będący estymatorem odchylenia standardowego. Ze względu na fakt, że w przypadku pomiarów RTK wyznaczone wielkości nie są mierzone bezpośrednio, a są funkcjami pewnych wielkości obserwowanych (pseudoodległości kodowe oraz pseudoodległości fazowe), analiza precyzji pomiarów GNSS/RTK opiera się na analizie dokładności wyrównania metodą najmniejszych kwadratów w którym wariancja określona *a posteriori* wynosi:

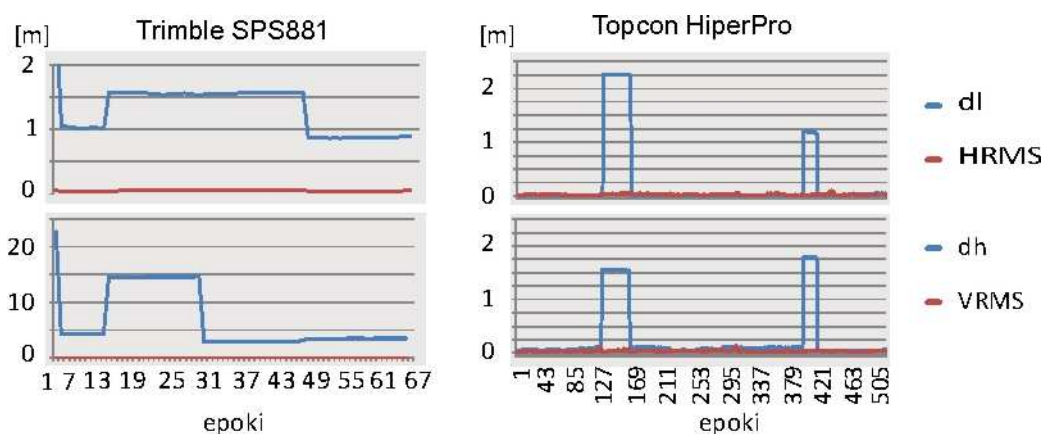
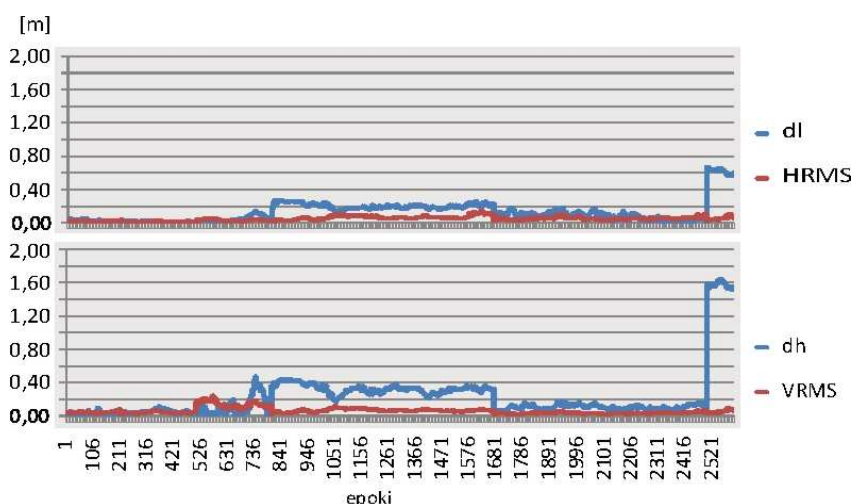
$$m_0^2 = \frac{V^T P V}{m - u} \quad (1.1)$$

gdzie m jest liczbą obserwacji a u jest liczbą niewiadomych, w więc w mianowniku występuje liczba obserwacji nadliczbowych [8]. Parametry precyzji wyznaczenia pojedynczego punktu są uzyskiwane przez mnożenie wariancji m_0 , będącej odzwierciedleniem błędów pomiarowych przez elementy macierzy kofaktorów, będące odzwierciedleniem stanu konstelacji satelitów GNSS. Tak obliczone parametry precyzji mogą okazać się zbyt optymistyczne, zwłaszcza w przypadku braku dostatecznej liczby obserwacji nadliczbowych. Producenci geodezyjnych odbiorników GNSS modyfikują metody obliczania parametrów precyzji biorąc pod uwagę pewne założenia oparte na spostrzeżeniach empirycznych [9], ale jak pokazały przeprowadzone eksperymenty, nie są to metody niezawodne. Dodatkowo należy pamiętać, że parametry te odnoszą się do poziomu ufności 1σ .

Analizując wyniki pomiaru punktu *D* odbiornikami Trimble i Leica, które to wyniki nie były obciążone błędami grubymi, można zauważyć brak korelacji pomiędzy parametrami precyzji HRMS i VRMS wyznaczanymi przez odbiornik GNSS a rzeczywistymi błędami położenia punktu (rys. 9).

Rys. 9. Dokładność i precyzja wyznaczenia współrzędnych punktu *D*.

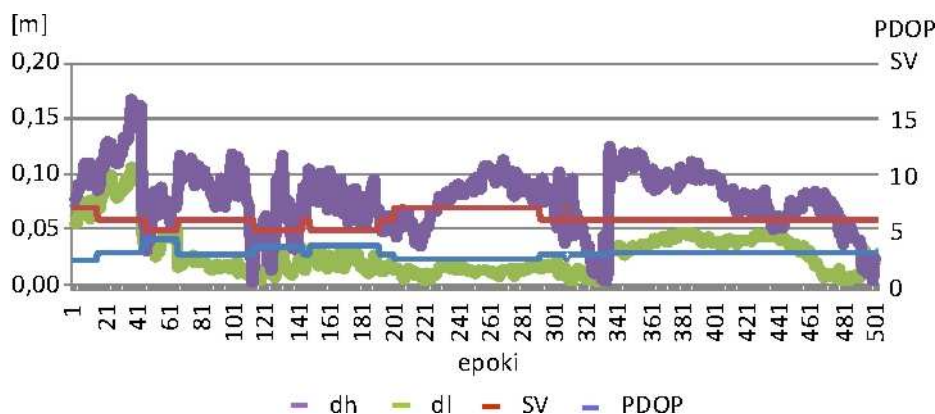
Dekorelacja precyzji i dokładności jest wyraźnie widoczna także w wynikach pomiaru punktu *P* zarówno odbiornikiem Trimble jak i odbiornikiem Topcon, a także punktu *K* odbiornikiem Leica. Co istotne, o ile w omawianym powyżej przypadku wartości błędów rzeczywistych oraz precyzji są tego samego rzędu o tyle w przypadku punktu *P*, w momentach wystąpienia błędów grubych, wartości precyzji pozostają nadal niskie przez co różnią się od dokładności nawet o rząd wielkości lub więcej (rys. 10 i 11).

Rys. 10. Dokładność i precyzja wyznaczenia współrzędnych punktu *P*.Rys. 11. Dokładność i precyzja wyznaczenia współrzędnych punktu *K*.

Jest to spostrzeżenie istotne z punktu widzenia zastosowań praktycznych technologii RTK do pomiarów geodezyjnych ponieważ, jak dowodzą prezentowane wyniki, określenie wartości współczynników HRMS i VRMS, przy jakich można wykonywać pomiary szczegółów terenowych poszczególnych grup dokładnościowych, nie jest warunkiem wystarczającym uzyskania dokładnych współrzędnych, zwłaszcza w trudnych warunkach obserwacyjnych.

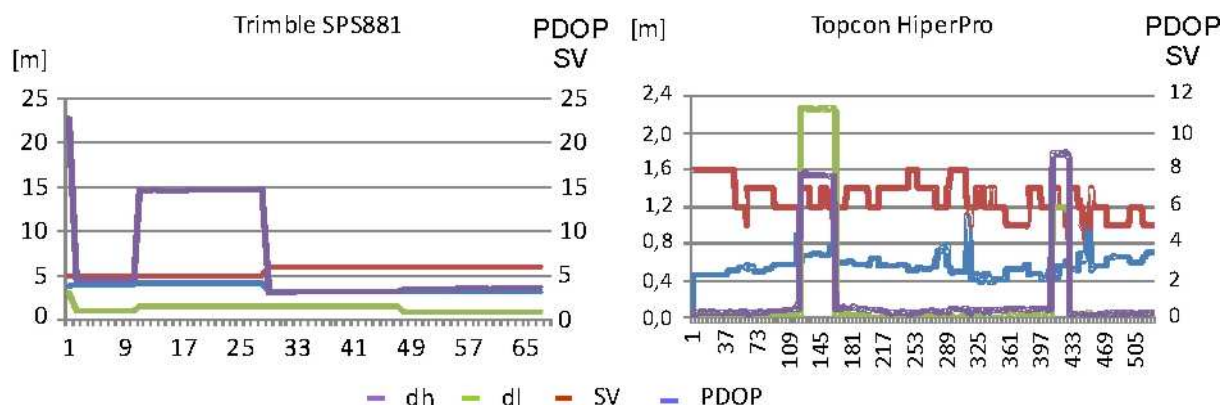
5. Liczba dostępnych satelitów i współczynnik PDOP

W ostatniej części niniejszych badań przeanalizowano zależność pomiędzy liczbą dostępnych satelitów i wartością współczynnika PDOP a dokładnością wyznaczania pozycji. Wszystkie analizowane pozycje uzyskano przy wartości współczynnika PDOP mniejszej od 6 oraz wykonując obserwacje minimum 5 satelitów co jest wymogiem precyzyjnego pozycjonowania RTK. Podobnie jak w przypadku parametrów precyzji współczynnik PDOP oraz liczba dostępnych satelitów nie są skorelowane z dokładnością uzyskanych wyników. W przypadku pomiaru punktu *D* odbiornikiem Trimble można zauważyć, że np. między epoką 220 a 290 wzrósłoby liczby dostępnych satelitów towarzyszy pogorszenie dokładności pozycjonowania (rys. 12).



Rys. 12. Liczba dostępnych satelitów oraz wartość współczynnika PDOP - punkt D, odbiornik Trimble

Analizując zależność pomiędzy wartością współczynnika PDOP a dokładnością uzyskanych współrzędnych na punkcie *P* charakteryzującym się największym zagęszczeniem zasłon terenowych należy zwrócić uwagę na fakt, że wystąpieniu ponad metrowych błędów grubych nie towarzyszą ani znaczące zmiany wartości współczynnika PDOP ani zmniejszenie liczby obserwowanych satelitów.



Rys. 13. Liczba dostępnych satelitów oraz wartość współczynnika PDOP – punkt *P*

Brak korelacji pomiędzy wartością współczynnika PDOP a dokładnością uzyskanych współrzędnych wskazuje na to, że głównym źródłem błędów wyznaczenia pozycji w pomiarach

GNSS/RTK są obserwacje obciążone błędami systematycznymi a mała liczba obserwowanych satelitów uniemożliwia przede wszystkim wykrycie takich błędów.

6. Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w niniejszym opracowaniu wyniki badań pokazują, że podczas wykonywania pomiarów GNSS/RTK w warunkach ograniczonej dostępności satelitów mogą występować błędy grube, rzędu od kilkudziesięciu centymetrów nawet do kilku metrów, mimo niskich wartości parametrów precyzji. Pomimo obserwowanego w ostatnich latach dynamicznego rozwoju algorytmów obliczeniowych stosowanych w odbiornikach GNSS żaden z testowanych odbiorników nie był w stanie poprawnie ocenić dokładności wyznaczanej pozycji i każdy z nich generował błędy. Źródłem tych błędów są prawdopodobnie błędy systematyczne prowadzące do nieprawidłowego wyznaczenia nieoznaczoności, które nie znajdują odzwierciedlenia w parametrach precyzji pomiaru będących jedynie odzwierciedleniem błędów przypadkowych. Należy zatem zwrócić uwagę na fakt, że przestrzeganie pewnych wymagań co do minimalnej liczby obserwowanych satelitów lub maksymalnych wartości współczynnika PDOP oraz wartości parametrów precyzji HRMS i VRMS jest warunkiem koniecznym, ale nie jest warunkiem wystarczającym do uzyskania wysokich dokładności wyników pomiarów. Najprostszym rozwiązaniem tego problemu byłoby unikanie zasłon terenowych na punktach wyznaczanych metodą GNSS/RTK, jednak w praktyce warunek ten bywa trudny lub niemożliwy do spełnienia. Innym rozwiązaniem jest wprowadzenie dodatkowej, niezależnej kontroli pozwalającej na wykrycie i wyeliminowanie błędów grubych.

Literatura

- [1] ORUBA A., LEONCZYK M., RYCHYWOLSKI M., WAJDA S. (2009). *ASG-EUPOS po roku*. Geodeta - magazyn geoinformacyjny, 4/2009 (167):10-14, Geodeta Sp. z o. o., Warszawa 2009.
- [2] HASEGAWA H., YOSHIMURA T. (2003) *Application of dual-frequency GPS receivers for static surveying under tree canopies*. J For Res 8:103-110
- [3] BAKUŁA M., OSZCZAK S., PELC-MIECZKOWSKA R. (2009). *Performance of RTK Positioning in Forest Conditions*. Journal of Surveying Engineering, 135(3): 125-130, ASCE, USA.
- [4] BAKUŁA M., PELC-MIECZKOWSKA R., TYSZKO A., CHODNICKA G., ROGALA B. (2008). *Initial results of RTK/OTF positioning using the NTRIP data teletransmission technology*. Technical Sciences, 11:213-227, Olsztyn.
- [5] SAWAGUCHI I., SAITOH Y., TATSUKAWA S. (2005) *A study of the effects of stems and canopies on the signal to noise ratio of GPS signals*. J For Res 10:395-401.
- [6] SAWAGUCHI I., NEMOTO Y., TATSUKAWA S. (2009) *Effects of moisture in wood materials on the SNR of GPS signals*. J For Res 14:63-72.
- [7] HASEGAWA H., YOSHIMURA T. (2007) *Estimation of GPS positional accuracy under different forest conditions using signal interruption probability*. J For Res 12:1-7.
- [8] LEICK A. (1995). *GPS Satellite Surveying*. John Wiley and Sons, Inc
- [9] Leica GPS Newsletter Sensor 00/16, August 28, 2000.

ANALYSIS OF GPS/RTK POSITIONING RELIABILITY IN HARD OBSERVATIONAL CONDITIONS

Summary

Thanks to the dynamic development of networks of permanent reference stations GNSS positioning satellite technology becomes widely used techniques for the direct acquisition of geodata. Available now, geodetic GNSS receivers are becoming more technologically advanced that the position can be obtain even in hard observational conditions. The problem remains, however, determine the reliability of such a position. This paper addresses the problem of precision and accuracy of GNSS / RTK. Presented in this paper test results show that when performing

measurements of GNSS / RTK in conditions of limited availability of satellites gross errors may occur on the order of tens of centimeters up to several meters, despite the low values of the parameters of precision. The source of these errors are probably systematic errors leading to incorrect determination of ambiguity, which are not reflected in the parameters of the measurement precision which are only an indication of random errors. The paper highlighted the need to develop methods for increasing the reliability of positioning GNSS / RTK observation in difficult observation conditions such as by introducing some independent control.



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Autor otrzymał stypendium współfinansowane przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.