

**mgr inż. Tomasz Hadaś**  
**Instytut Geodezji i Geoinformatyki**

**Rozprawa doktorska pt.**  
**Doskonalenie metod precyzyjnego pozycjonowania**  
**satelitarnego GNSS w czasie rzeczywistym**

**Wprowadzenie**

Precise Point Positioning (PPP) jest techniką pozycjonowania satelitarnego wykorzystującą pojedynczy odbiornik GNSS (Globalny System Nawigacji Satelitarnej) i wymaga zewnętrznych informacji z analizy globalnych permanentnych sieci GNSS: precyzyjnych zegarów i orbit satelitów GNSS. Produkty te wprowadzane są do modelu wyrównawczego jako wartości bezbłędne, a opóźnienie jonosferyczne pierwszego rzędu jest eliminowane poprzez zastosowanie kombinacji liniowej obserwacji na dwóch częstotliwościach. Do estymowanych parametrów należą współrzędne odbiornika, błąd zegara odbiornika oraz opóźnienie troposferyczne w kierunku zenitu (ZTD) (ew. poprawka do części mokrej tego opóźnienia). Wadą techniki PPP jest długi czas inicjalizacji odbiornika wynikający z głównie wysokiej korelacji estymowanych parametrów: opóźnienia troposferycznego, offsetu zegara odbiornika, wysokości odbiornika. Ponadto wykorzystanie kombinacji liniowej wolnej od wpływu jonosfery powoduje, że nieoznaczoności fazowe nie są liczbami całkowitymi, co ogranicza wykorzystanie technik rozwiązywania nieoznaczoności fazowych w celu przyspieszenia zbieżności rozwiązania.

Wiarygodna estymacja parametrów wymaga opracowania obserwacji z wielu epok, w trakcie których nastąpiła istotna zmiana geometrii satelitów. Przy opracowaniu obserwacji w trybie postprocessing możliwe jest wyrównanie wszystkich obserwacji jednocześnie. W obliczeniach czasu rzeczywistego konieczne jest zastosowanie wyrównania sekwencyjnego z propagacją pełnej macierzy wariancyjno-kowariancyjnej lub filtracji Kalmana. W obu przypadkach wymagane jest prawidłowe modelowanie stochastyczne: współrzędne statyczne i nieoznaczoności fazowe modeluje się jako parametry stałe w czasie, opóźnienie troposferyczne jako spacer losowy (ang. random walk), natomiast współrzędne kinematyczne oraz błąd zegara odbiornika jako biały szum (ang. white noise).

**Streszczenie rozprawy doktorskiej stanowiącej spójny tematycznie zbiór artykułów opublikowanych lub przyjętych do druku w czasopismach naukowych**

1. Hadaś T., Kapłon J., Bosy J., Sierny J., Wilgan K. (2013): **Near real-time regional troposphere models for the GNSS precise point positioning technique. Measurement Science and Technology, Vol. 24 No. 5, 2013, pp. 055003 (12 pp.) - IF 1.435, lista A MNiSW pkt. 35, udział 30%**

W pracy zbadano jaki wpływ na czas inicjalizacji oraz dokładność estymowanych współrzędnych kinematycznych ma zastosowanie zewnętrznych modeli opóźnienia troposferycznego jako wartości a priori dla estymowanego ZTD.

Wykorzystując oprogramowanie Bernese GPS Software 5.0, w trybie postprocessing wyznaczono pozycje kinematyczne co 30 sekund dla 86 stacji systemu ASG-EUPOS w okresie 3 dni, w trakcie których odnotowano silny front atmosferyczny (wahania ciśnienia w granicy 20 hPa i zmiana średniej temperatury o ponad 10 stopni Celsjusza). Zastosowano 5 wariantów obliczeniowych: 1) bez modelowania ZTD, 2) z wykorzystaniem modelu Saastamoinen'a jako modelu bezbłędneho ZTD, 3) z wykorzystaniem modelu Saastamoinen'a i estymacją poprawek do ZTD (standardowa strategia obliczeniowa), 4) z wykorzystaniem wysokorozdzielczego regionalnego modelu stanu troposfery czasu prawie rzeczywistego bazującego na obserwacjach GNSS, 5) z wykorzystaniem



wysokorozdzielczego regionalnego modelu stanu troposfery czasu rzeczywistego bazującego na obserwacjach meteorologicznych. Analiza rezydów współrzędnych (względem oficjalnych współrzędnych stacji) pokazała, że w wariancie 4) uzyskano najbardziej dokładne i precyzyjne wysokości stacji, podczas gdy współrzędne horyzontalne wyznaczone są ze zbliżoną dokładnością i precyzją w wariantach od 2) do 5), a największe rezydua uzyskano w wariancie 1).

Przeprowadzono również obliczenia symulujące pomiary w czasie rzeczywistym wykorzystując oprogramowanie GPSTools. Wyznaczono pozycje kinematyczne co 30 sekund w 72 godzinnych sesjach pomiarowych dla 10 wybranych stacji ASG-EUPOS: 5 stacji wyposażonych w sensor meteorologiczny oraz 5 bez takiego sensora. Obliczenia wykonano w wariantach od 2) do 5). Aplikacji regionalnego modelu troposfery bazującego na obserwacjach GNSS (wariant 4) skracala czas inicjalizacji odbiornika i ponownie skutkowała estymacją najbardziej dokładnych i precyzyjnych współrzędnych.

- 2. Hadaś T., Bosy J. (2015): IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time. GPS Solutions, Vol. 19 No. 1, Berlin Heidelberg 2015, pp. 93-105, IF 2.202, lista A MNiSW pkt. 30, udział 70%**

W kwietniu 2013 Międzynarodowa Służba GNSS (IGS) uruchomiła serwis czasu rzeczywistego (RTS), poprzez który dostarczane są precyzyjne współrzędne satelitów i poprawki do zegarów satelitów. Oprócz oficjalnych produktów dla systemu GPS, RTS dostarcza także produkty nieoficjalne dla systemu GLONASS. Podstawowym celem tego serwisu jest umożliwienie użytkownikom wykonywania pomiarów techniką PPP w czasie rzeczywistym. Jakość precyzyjnych produktów bezpośrednio wpływa na dokładność i precyzję współrzędnych wyznaczanych tą techniką. Stało się to motywacją dla przeprowadzenia szczegółowej analizy dokładności produktów IGS RTS.

Na podstawie strumieni poprawek RTS zarejestrowanych przez okres jednego tygodnia sprawdzono dostępność, opóźnienie, dokładność i precyzję produktów czasu rzeczywistego. Potwierdzono, że dostępność produktów dla obu systemów GNSS wynosi powyżej 92%, chociaż dla pojedynczych satelitów dostępność ta wyniosła mniej niż 30%. Stwierdzono również przerwy w dostępności poprawek dla satelitów GLONASS znajdujących się w zaćmieniu. Opóźnienie poprawek wahało się między 28 a 30 sekund, i było duże większe niż deklarowane przez RTS. Poprzez porównanie współrzędnych satelitów (w trzech kierunkach: radialnym, zgodnym z ruchem satelity i prostopadłym do dwóch poprzednich) i poprawek zegara ze strumienia RTS z produktami finalnymi IGS dokonano oceny dokładności produktów czasu rzeczywistego. Potwierdzono wysoką jakość produktów dla systemu GPS. Dokładność 3D orbit wynosiła 48 mm a zegara 0.28 ns. Dla systemu GLONASS dokładność 3D orbit wynosiła 132 mm i zegara 0.82 ns, co uzasadnia klasyfikację produktów GLONASS jako nieoficjalnych.

Ze względu na występujące ograniczenia w dostępności produktów RTS, przeanalizowano możliwość predykcji wartości korekt na podstawie szeregów czasowych wcześniejszych danych. Przeprowadzono szereg symulacji, w których wartości poprawek były wyznaczone z różnym krokiem predykcji, na podstawie różnych długości szeregów czasowych i z wykorzystaniem wielomianów stopnia 1 do 5. Symulacje przeprowadzono na danych z jednego tygodnia dla wszystkich satelitów, dla których dostępne były korekty IGS RTS. Predykowane wartości korekt, dla każdej składowej współrzędnych i dla zegara, porównywano z rzeczywistą wartością korekty ze strumienia RTS. Odkryto, że największą dokładność predykowanych korekt orbitalnych można otrzymać, gdy krok predykcji jest 3-krotnie krótszy od długości szeregu w jaki wpasowany jest wielomian, minimalna długość tego szeregu powinna wynosić 3 minuty dla GPS i 5 minut dla GLONASS. Dla GPS i predykcji krótszej niż 5 minut zaleca się stosowanie wielomianów stopnia 2, a dla predykcji krótszych stopnia 3. Dla GPS, zmiana stopnia wielomianu z 2 na 3 powinna nastąpić przy predykcji powyżej 2.5 minuty. Zaproponowane metody predykcji pozwalają korzystać kilkakrotnie dłużej z korekt orbitalnych niż standardowy algorytm aplikacji, bez istotnej utraty dokładności. Niestety metody predykcji wielomianowej okazały się nieskuteczne dla predykcji poprawek dla zegarów satelitów.



3. Hadaś T. (2015): GNSS-WARP software for real-time Precise Point Positioning. *Artificial Satellites, Journal of Planetary Geodesy*, Vol. 50, No. 2, 2015 (przyjęty do druku), lista B MNiSW pkt. 8

Doskonalenie i weryfikacja oryginalnych algorytmów pozycjonowania GNSS techniką PPP w czasie rzeczywistym wymagały rozwoju autorskiego oprogramowania GNSS-WARP (Wrocław Algorithms for Real-time Positioning). Oprogramowanie umożliwia opracowanie obserwacji GPS i GLONASS w czasie rzeczywistym (ze strumienia RTS), symulowanym rzeczywistym (na podstawie zarejestrowanych orbit i zegarów ze strumienia RTS) i w trybie postprocessing (na podstawie produktów finalnych), estymację współrzędnych statycznych i kinematycznych. Zaimplementowano w nim wszystkie wymagane modele zgodne z konwencją IERS, w celu zapewnienia pełnej zgodności z używanymi produktami. Model wyrównawczy bazuje na przetwarzaniu obserwacji epoka po epoce wraz z propagacją macierzy wariancyjno-kowariancyjnej według zmodyfikowanego wyrównania metodą najmniejszych kwadratów:

$$\delta = (A^T P A + C_x^{-1})^{-1} A^T P l$$

gdzie  $\delta$  jest wektorem poprawek,  $A$  jest macierzą planu obserwacji,  $P$  jest macierzą wag,  $C_x$  to macierz wariancyjno-kowariancyjna, a  $l$  jest wektorem wyrazów wolnych. Działanie oprogramowania zostało zweryfikowane licznymi testami numerycznymi na reprezentatywnym zbiorze danych. Umożliwia analizę (także graficzną) estymowanych parametrów i rezyduów obserwacji kodowych i fazowych.

Wykorzystując autorskie oprogramowanie przeprowadzono analizę jakości pozycjonowania statycznego i kinematycznego PPP w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem obserwacji GPS oraz GPS+GLONASS. Stwierdzono, że w pozycjonowaniu statycznym czasu rzeczywistego wprowadzenie systemu GLONASS może prowadzić do kilkukrotnie mniejszej dokładności współrzędnych, ze względu na niższą jakość produktów RTS dla systemu GLONASS. Natomiast w pozycjonowaniu kinematycznym z wykorzystaniem obu systemów GNSS błąd wyznaczenia współrzędnych jest nieznacznie wyższy, ale czas inicjalizacji skraca się z ponad godziny do około 15 minut.

W kolejnych badaniach oceniono wpływ aplikacji wysokorozdzielczych modeli opóźnienia troposferycznego do pozycjonowania kinematycznego w czasie rzeczywistym. Różnica w stosunku do standardowego procesu opracowania obserwacji polega na tym, że model zewnętrzny ZTD nie służy tylko dostarczeniu informacji a priori na początku opracowania danych, ale pozwala nałożyć dodatkowy warunek na estymowaną wartość poprawki do ZTD z modelu a priori. Wykorzystując autorskie oprogramowanie, przeprowadzono obliczenia pozycji kinematycznej z częstotliwością 0.1 Hz w ciągu jednego tygodnia dla 10 wybranych stacji EPN na terenie Polski. Obliczenia wykonano w wariancie standardowym, wykorzystując Vienna Mapping Function (VMF) jako model a priori, oraz w zaproponowanym wariancie, w którym modelem zewnętrznym był model troposfery z obserwacji GNSS wyznaczony w czasie prawie rzeczywistym (opóźnienie godzinne). Uzyskano poprawę dokładności współrzędnej wysokościowej sięgającą nawet 40% przy nietypowych, szybkozmiennych warunkach atmosferycznych – średnie odchylenie standardowe rezyduów współrzędnych spadło z 14 cm do 8 cm. Zaobserwowano też istotną redukcję rezyduów współrzędnych już w pierwszych epokach opracowania danych, pomimo znacznie większego błędu estymowanych współrzędnych, co może zostać wykorzystane w dalszych pracach nad rozwiązywaniem nieoznaczoności fazowych w pozycjonowaniu GNSS techniką PPP w czasie rzeczywistym.



## Wnioski

1. Zaimplementowano autorskie oprogramowanie do precyzyjnego pozycjonowania satelitarnego GNSS (GPS+GLONASS) w czasie rzeczywistym. Oprogramowanie zostało zweryfikowane oraz wykorzystane w większości zrealizowanych prac do przetwarzania danych oraz graficznej wizualizacji wyników.
2. Dostępne produkty czasu rzeczywistego serwisu IGS RTS charakteryzują się jakością i dostępnością umożliwiającą pozycjonowanie w czasie rzeczywistym techniką Precise Point Positioning. Nieoficjalne produkty dla systemu GLONASS powinny być stosowane tylko w pozycjonowaniu kinematycznym.
3. Możliwe jest dłuższe niż przewidziane przez standard SSR, stosowanie precyzyjnych korekt orbitalnych w przypadku utraty łączności ze strumieniem czasu rzeczywistego, przy zastosowaniu zaproponowanej metody predykcji wielomianowej.
4. Pozycjonowanie kinematyczne techniką PPP może być wspomagane systemami GBAS (Ground Base Augmentation System) w zakresie modelowania opóźnienia troposferycznego. Wprowadzenie dodatkowej pseudo-observacji nakładającej warunek na estymowaną wartość opóźnienia troposferycznego zwiększa dokładność i precyzję wyznaczenia składowej wysokościowej nawet o 40%.

## Dalsze prace

1. Rozszerzenie zaimplementowanego modelu funkcjonalnego PPP o system Galileo oraz obserwacje na trzech częstotliwościach.
2. Zasilenie modelu wyrównawczego obserwacji modelem jonosfery, co umożliwi rozszerzenie układu równań o dodatkowe kombinacje liniowe obserwacji (narrow-lane, wide-lane oraz Melbourne-Wubbena).
3. Aplikacja technik rozwiązania nieoznaczoności fazowych dla techniki PPP w czasie rzeczywistym, z wykorzystaniem obserwacji fazowych na oryginalnych częstotliwościach.