

Dr hab. inż. Paweł Wielgosz, prof. UWM

Olsztyn, 20.06.2015r.

Instytut Geodezji

Wydział Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. *Tomasza HADASIA*

pt. „***DOSKONALENIE METOD PRECYZYJNEGO POZYCJONOWANIA
SATELITARNEGO GNSS W CZASIE RZECZYWISTYM***”

Podstawą formalną recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu z dnia 24 kwietnia 2015 r.

Struktura rozprawy

Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi spójny tematycznie zbiór trzech artykułów opublikowanych 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, p. 055003
2. **Hadaś T.**, Bosy J. (2015) IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time. *GPS Solutions*, Vol. 19, No. 1, pp. 93-105
3. **Hadaś T.** (2015) GNSS-WAARP software for real-time Precise Point Positioning. *Artificial Satellites*, Vol. 50, No. 2, pp. 59-76

Wymienione artykuły zostały napisane w języku angielskim i ukazały się w bardzo dobrych czasopismach naukowych, w tym w dwóch indeksowanych przez Journal Citation Reports z dosyć wysokim Impact Factor, to jest:

- Measurement Science and Technology, IF = 1.435, 35 pkt MNiSW
- GPS Solutions, IF = 2.202, 30 pkt MNiSW
- Artificial Satellites, 8 pkt MNiSW.

Doktorant jest pierwszym lub jedynym autorem tych prac. W pracach wieloautorskich wkład własny doktoranta waha się od 30 do 70 % i został omówiony w streszczeniu rozprawy przedstawionym w języku polskim oraz angielskim.

Omówienie prac składających się na cykl artykułów

Pierwsza praca w cyklu pt. *“Near real-time regional troposphere models for the GNSS precise point positioning technique”* dotyczy zastosowania w pozycjonowaniu PPP dwóch regionalnych, wysokorozdzielczych modeli troposfery opartych na opracowaniu obserwacji GNSS oraz obserwacji meteorologicznych i generowanych w czasie prawie rzeczywistym. W tej pracy doktorant zajął się częścią związaną z zastosowaniem modeli troposfery, opracowanych przez zespół współautorów z Instytutu Geodezji i Geoinformatyki, w pozycjonowaniu absolutnym w trybie postprocessingu oraz symulowanego czasu rzeczywistego.

Doktorant do testów wybrał 3 dni w lutym 2012 z uwagi na przejście w tym czasie frontu atmosferycznego nad Polską. Słusznie zauważył, że front atmosferyczny stawia trudne wyzwanie modelom troposfery. Do badań wykorzystał dane GNSS aż z 86 stacji sieci ASG-EUPOS, które opracował w jednogodzinnych statycznych sesjach obserwacyjnych. Rozwiązanie PPP przeprowadził w 5 wariantach: (1) bez modelu ZTD, (2) z modelem Saastamoinen’a, (3) z modelem Saastamoinen’a z estymacją części mokrej, (4) z modelem IGGZH-G z opracowania danych GNSS i (5) z modelem IGGZH-M z opracowania danych meteorologicznych. Porównanie otrzymanych współrzędnych do współrzędnych referencyjnych pokazało, że wariant (4) pozwolił na otrzymanie najdokładniejszych wyników, szczególnie dla składowej wysokościowej. Także wyniki z wariantu (3) dały akceptowalne dokładności. Wyniki tej części pracy wskazują na przydatność zewnętrznych, dokładnych modeli troposfery w pozycjonowaniu statycznym PPP.

W kolejnym rozdziale omawianej publikacji doktorant przeprowadził testy zastosowania wybranych metod modelowania troposfery w kinematycznym pozycjonowaniu PPP realizowanym w symulowanym czasie rzeczywistym w sesjach jednogodzinnych. Do testów wykorzystał ten sam okres danych jako opisany powyżej, z tym że opracował dane GNSS z 10 stacji, w tym 5 wyposażonych w czujniki meteorologiczne. Do testów wybrał cztery warianty modelowania – 2, 3, 4 i 5, pomijając wariant bez modelu troposfery (1). Otrzymane wyniki estymacji współrzędnych w trybie kinematycznym pokazują niewielki wpływ modeli troposfery na współrzędne horyzontalne i znaczący wpływ na wysokość stacji. Podobnie jak w poprzednim teście najlepiej wypadł model IGGZH-G (4).

Druga praca z cyklu składającego się na rozprawę doktorską pt. „*IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time*” dotyczy analiz jakości nowego serwisu służby IGS dostarczającego w czasie rzeczywistym dokładne poprawki orbit i zegarów satelitów GPS i testowo GLONASS. Temat ten znalazł się w kręgu zainteresowań doktoranta, gdyż dostępność takich poprawek w czasie rzeczywistym jest kluczowe do osiągnięcia rozwiązania real-time PPP, a ich dokładność bezpośrednio wpływa na jakość otrzymanego rozwiązania. W przedstawionej pracy doktorant na podstawie strumieni RTS rejestrowanych przez okres pełnego tygodnia przeprowadził analizy dostępności, opóźnień i dokładności nowych poprawek służby IGS. Oszacowana średnia dostępność poprawek wyniosła 92% co zbliża serwis IGS-RTS do operacyjności. Dokładność poprawek do pozycji satelitów jak i ich zegarów okazała się zadowalająca, osiągając odpowiednio 5 cm i 8 cm dla satelitów systemu GPS. Dokładność tych produktów dla satelitów GLONASS była kilkukrotnie niższa. Zaobserwowane przerwy w strumieniach poprawek skłoniły doktoranta do przeprowadzenia dodatkowych analiz spadku jakości tychże w czasie. Wykorzystując ten sam zestaw danych przeprowadził symulacje opóźnień w strumieniu poprawek od 5 s do 10 minut. Stwierdził, że dokładność poprawek do orbit satelitów GPS utrzymuje się w granicach 5 cm przez dwie minuty, jednak dokładność poprawek zegarów degraduje się znacznie szybciej. Wobec tego podjął próbę predykcji wartości poprawek co pozwoliłoby przedłużenie „żywności” poprawek RTS. Do tego celu zastosował wielomiany różnych stopni, co w efekcie pozwoliło wydłużyć ważność poprawek do orbit satelitów GPS aż do 8 minut, a satelitów GLONASS do 4 minut. Stwierdził również, że obecna krótkookresowa stabilność zegarów satelitów niestety nie pozwala na tak długą predykcję ich poprawek, może za wyjątkiem cyfrowych rubidowych zegarów atomowych satelitów GPS bloku IIF.

Trzecia praca z cyklu pt. „*GNSS-WAARP software for real-time Precise Point Positioning*” omawia najważniejsze osiągnięcia doktoranta jakim jest stworzenie własnego oprogramowania realizującego rozwiązanie PPP zarówno w czasie rzeczywistym jak i w trybie postprocessingu na podstawie opracowania obserwacji systemów GPS oraz GLONASS. Oprogramowanie to stworzone zostało w środowisku Matlab, a do pracy w czasie rzeczywistym wymaga jedynie wykorzystania programu BNC do dekodowania strumienia NTRIP. W pracy doktorant prezentuje także testy numeryczne potwierdzające poprawność zaimplementowanych algorytmów. W tym celu opracował dane z 20 stacji IGS oraz 10 ASG-EUPOS z okresu jednego tygodnia. Przedstawił wyniki pozycjonowania statycznego, kinematycznego oraz estymacji parametrów troposfery w czasie rzeczywistym. Przeprowadził także analizy zastosowania niezależni oraz łącznie różnych systemów GNSS. Osiągnięte wyniki są

porównywalne z osiąganymi przez najlepsze znane programy naukowe do opracowania obserwacji GNSS.

Omówienie przedstawionej rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy zagadnień związanych z precyzyjnym pozycjonowaniem absolutnym GNSS – PPP. Jest to coraz powszechniej wykorzystywana alternatywa w stosunku do tradycyjnego rozwiązania względnego opartego na opracowaniu obserwacji podwójnie zróżnicowanych. Technika PPP posiada wiele zalet jak np. brak konieczności utrzymywania gęstych sieci stacji permanentnych, nieprzenoszenie się błędów rozwiązania sąsiednich punktów, bardziej wiarygodne wyznaczenia parametrów troposfery, itp. Wymaga jednak bardzo dokładnego modelowania zjawisk fizycznych oraz dostępu do precyzyjnych parametrów orbit i poprawek zegarów satelitów GNSS. Stanowi to spore wyzwanie twórcom algorytmów i oprogramowania zajmującym się precyzyjnym rozwiązaniem PPP. Doktorant podjął się bardzo ambitnego zadania stworzenia własnego oprogramowania realizującego to zadanie.

Początkowo doktorant zajął się badaniem wpływu jakości modeli troposfery na rozwiązanie PPP. Temat ten jest o tyle ciekawy, że większość autorów analizuje wpływ orbit, zegarów i ewentualnie jonosfery, zapominając, że opóźnienie troposferyczne stanowi tzw. czynnik geometryczny rozwiązania GNSS (podobnie jak orbity i zegary). Doktorant zbadał wpływ zastosowanych modeli troposfery na dokładność oraz czas inicjalizacji rozwiązania PPP. Stwierdził, że dokładny model stanu troposfery znacząca skraca czas inicjalizacji rozwiązania oraz poprawia dokładność estymacji współrzędnej wysokości.

Ponadto doktorant zaproponował wykorzystanie techniki PPP do walidacji modeli troposfery. Wprowadzając opóźnienia troposferyczne z wybranych modeli taktował je jako znane w wyrównaniu obserwacji GNSS, a następnie porównując wyniki rozwiązania PPP mógł określić dokładność testowanych modeli. Jest to bardzo ciekawe i nowatorskie zastosowanie techniki PPP.

W kolejnych badaniach doktorant opracował metodykę walidacji jakości nowych produktów służby IGS jakim są strumienie poprawek IGS-RTS. Produkty te są kluczowe do zastosowania techniki PPP w czasie rzeczywistym. Doktorant stworzył własne narzędzia do analiz w środowisku Matlab i przeprowadził wnikliwe badania dostępności, opóźnienia i dokładności poprawek do orbit i zegarów satelitów GPS oraz GLONASS. W mojej opinii jest to pierwsza praca przedstawiająca szczegółowe analizy poprawek IGS-RTS. Wykazał zadowalającą dokładność orbit i zegarów dla satelitów GPS, jednak dostępność tych poprawek na poziomie 92% wymaga dalszych prac nad serwisem. Przerwy w strumieniu poprawek IGS-RTS skłoniły doktoranta do

przeprowadzenia kolejnych badań związanych analizą spadku dokładności tych poprawek wraz z ich wiekiem. Jest to ważne zagadnienie, gdyż wiedza na temat szybkości degradacji jakości poprawek w przypadku utraty ich strumienia pozwala użytkownikowi wykorzystywać poprawki z poprzednich epok przez pewien okres czasu, co pozwala na nieprzerwane pozycjonowanie. Ponadto doktorant podjął próbę predykcji poprawek w celu wydłużenia czasu w jakim mogłyby być jeszcze wykorzystywane po utracie strumienia. Opracował i przetestował odpowiednie metody predykcji oparte na wielomianach różnych stopni, co w pozwoliło wydłużyć ważność poprawek do orbit satelitów GPS aż do 8 minut. Jest to bardzo ważne osiągnięcie doktoranta, pozwalające na zapewnienie pozycjonowania w przypadku przerw w strumieniu poprawek. Dodam, że jest to bardzo długi okres czasu, szczególnie gdy w technice RTK/RTN możemy korzystać z poprzednich danych w okresie do ok. 30 sekund. Niestety stabilność zegarów satelitów obecnie nie pozwala na tak długą predykcję za wyjątkiem rubidowych zegarów atomowych satelitów GPS bloku IIF. Przy doktorant okazji potwierdził wysoką stabilność, nowych cyfrowych zegarów rubidowych tego bloku.

Najważniejszym w mojej ocenie osiągnięciem doktoranta jest stworzenie własnego oprogramowania realizującego rozwiązanie PPP. Autor podjął się tu bardzo trudnego zadania wymagającego znajomości i implementacji modeli wielu zjawisk fizycznych wpływających na pomiary GNSS. Jeszcze trudniejszym zadaniem jest implementacja metod pozycjonowania PPP w czasie rzeczywistym. Niemniej jednak doktorant wykonał to zadanie z sukcesem. Stworzył oprogramowanie GNSS-WARP, które realizuje pozycjonowanie statyczne i kinematyczne w postprocessingu jak i w czasie rzeczywistym. Program jest w stanie opracować dane z systemu GPS, a także GLONASS. Ponadto GNSS-WARP ma możliwość estymacji dodatkowych parametrów, jak np., opóźnienie troposferyczne. Skuteczność przyjętych w oprogramowaniu rozwiązań doktorant potwierdził przeprowadzając obszerne testy numeryczne. Jak już wspominałem osiągnięte wyniki są porównywalne z osiąganymi przez najlepsze zaawansowane programy naukowe do opracowania obserwacji GNSS. Należy podkreślić, że autor stworzył doskonałe narzędzie badawcze, co pozwoli mu w przyszłości kontynuować pracę naukową na wysokim poziomie. Już obecnie uzyskiwane przez niego wyniki są przedmiotem zainteresowania w międzynarodowym środowisku naukowym. Międzynarodową rozpoznawalność potwierdza fakt, że mimo niedawnego ukazania się jego publikacji, prace te były już cytowane 20 razy (wg. WoS).

W pracach składających się na rozprawę nie znalazłem znaczących błędów, ale jest to naturalne, gdyż przeszły już one rygorystyczny proces recenzyjny w wydawnictwach.

W czasie publicznej obrony chciałbym uzyskać odpowiedzi na 3 pytania:

- Czy według doktoranta można stworzyć dokładny model troposfery wspierający rozwiązanie PPP z rzadkiej sieci stacji GNSS (np. 10 stacji dla obszaru Polski) lub z innych źródeł?
- Czy oprogramowanie GNSS-WARP rzeczywiście realizuje pozycjonowania PPP-RTK jako podano w pracy w Artificial Satellites?
- Jaka jest oficjalna definicja GBAS wg. FAA? Czy system ASG-EUPOS jest systemem GBAS?

Podsumowanie recenzji:

Do głównych osiągnięć doktoranta należy zaliczyć opracowanie autorskiego oprogramowania do precyzyjnego pozycjonowania GPS+GLONASS PPP w czasie rzeczywistym, analiza dostępności i jakości produktów IGS-RTS, badania nad możliwością wiarygodnej predykcji poprawek IGS-RTS, wykazanie przydatności wysokorozdzielczych modeli troposfery w pozycjonowaniu PPP. Ponadto autor wykazał się bardzo dużą wiedzą z zakresu precyzyjnego opracowania obserwacji satelitarnych. Zawarte w pracy metodologia jak i wyniki badań nie budzą wątpliwości. Zostały one już wcześniej wielokrotnie zrecenzowane przez recenzentów zagranicznych.

W mojej ocenie przedstawiona przez mgr inż. Tomasza Hadasia rozprawa doktorska spełnia warunki określone w art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. nr 65 poz. 595 z późn. zm.).

