

Dr hab. inż. Jacek Paziewski

3 lipca 2018 r.

Instytut Geodezji

Wydział Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Ul. Oczapowskiego 1, 10-719 Olsztyn

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Kaźmierskiego na temat:

"Precyzyjne pozycjonowanie multi-GNSS w czasie rzeczywistym".

1. Podstawa formalna wykonania recenzji.

Formalną podstawą wykonania niniejszej recenzji rozprawy doktorskiej jest pismo Pana Dziekana Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu prof. dr hab. inż. Bernarda Kontnego nr IDDD0000.4000.105.2018 z dnia 17 maja 2018 roku z powołaniem na uchwałę Rady Wydziału z dnia 16 maja 2018.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej.

Rozprawę doktorską stanowi cykl trzech publikacji powiązanych tematycznie:

[1] Kaźmierski K, Sośnica K, Hadaś T, 2017, Quality assessment of multi-GNSS orbits and clocks for real-time precise point positioning, *GPS Solutions*, Volume: 22 Issue: 1. IF=4.061, (l. pkt. 35, udział 60%).

[2] Kaźmierski K Hadaś T, Sośnica K, 2018, Weighting of Multi-GNSS Observations in Real-Time Precise Point Positioning, *Remote Sensing*, Volume: 10 Issue: 1. IF=3.244, (l. pkt 35, udział 51%).

[3] Kaźmierski K, 2018, Performance of absolute Real-time Multi-GNSS Kinematic Positioning, *Artificial Satellites*, *Journal of Planetary Geodesy* (przyjęty do druku 24.04.2018). (l. pkt 8, udział 100%).

Dwie pierwsze publikacje z cyklu zostały opracowane w zespołach autorskich, gdzie doktorant jest pierwszym autorem i jego wkład jest, według oświadczeń, większościowy wynoszący odpowiednio 60% i 51%. Ostatnia z cyklu prac opublikowana w czasopiśmie *Artificial Satellites* jest pracą samodzielną. Wszystkie publikacje są według mojej oceny w sposób ścisły ze sobą powiązane, co nie rodzi żadnych wątpliwości, co do tego, że stanowią cykl prac spójnych tematycznie, a więc spełniający wymogi Ustawy

z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017r. poz. 1789), zwanej dalej Ustawą.

Rozprawa doktorska zawiera Wprowadzenie, Streszczenie oraz Wnioski w języku polskim przedstawione na 5 stronach maszynopisu, te same rozdziały przedstawione w języku angielskim, załączone kopie trzech wymienionych prac stanowiących osiągnięcie naukowe (łącznie 42 strony), oświadczenia dotyczące udziału i wkładu w powstanie poszczególnych publikacji współautorów oraz określenie kierunków przyszłych prac badawczych Doktoranta oraz opis jego najważniejszych osiągnięć naukowych wraz z dorobkiem w języku polskim i angielskim.

3. Ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej.

Dwie z publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe zostało opublikowanych w renomowanych czasopismach o wysokim współczynniku Impact Factor (*GPS Solutions, Remote Sensing*) rozpoznanych w środowisku naukowym zajmującym się tematyką opracowania obserwacji satelitarnych. Ostatnia z prac, choć nieznajdująca się w czasopiśmie wyróżnionym na liście A MNiSW, to również opublikowana została w czasopiśmie uznanym i cenionym w środowisku akademickim związanym z geodezją satelitarną. Dobór czasopism, w których Doktorant opublikował swoje prace, jest w mojej ocenie, godny podkreślenia. Sam temat pracy podjęty przez Doktoranta uważam za bardzo aktualny, gdyż dotyczący szczegółowych zagadnień metody precyzyjnego pozycjonowania absolutnego PPP (*Precise Point Positioning*) będącej obecnie przedmiotem intensywnych badań, których wyniki przedstawiane są w licznych publikacjach naukowych. Wszystkie prace tworzą spójny i chronologiczny cykl publikacji.

Głównym celem powyższego cyklu prac jest, według oświadczenia Doktoranta, opracowanie optymalnej metodologii przetwarzania obserwacji multi-GNSS w czasie rzeczywistym ze szczególnym naciskiem na dobór właściwego wagowania obserwacji z pochodzących z niezależnych systemów GNSS, co w mojej ocenie udało się osiągnąć. Tak postawiony cel pracy należy traktować, jako szczegółowe, a zarazem trudne zagadnienie z zakresu opracowania obserwacji GNSS. Jako dodatkowe osiągnięcia przedstawionego cyklu prac należy wskazać przeprowadzenie analizy jakości i dostępności produktów czasu rzeczywistego udostępnianych przez centrum analiz CNES jak również potwierdzenie silnego wpływu otoczenia na jakość kinematycznego pozycjonowania autonomicznego.

Pierwsza praca z przedstawionego cyklu publikacji dotyczy zagadnienia oceny jakości produktów czasu rzeczywistego wykorzystywanych w precyzyjnym pozycjonowaniu absolutnym (*Precise Point Positioning*). Publikacja ta była doskonałym przyczynkiem do późniejszych badań nad optymalnym wagowaniem w procesie estymacji parametrów modelu pozycjonowania absolutnego. Przeprowadzona tam analiza dokładności i wiarygodności orbit oraz zegarów dostarcza istotnej wiedzy wykorzystywanej na etapie modelowania stochastycznego. Doktorant udowodnił,

iz korekty do produktów czasu rzeczywistego dla poszczególnych systemów dostarczane przez centrum CNES charakteryzują się zróżnicowaną dokładnością, co prowadzi do konkluzji, iż jednorodne wagowanie obserwacji w modelu multi-GNSS nie jest poprawnym podejściem. Właściwym jest stwierdzenie Doktoranta, iż błędy wyżej wymienionych korekt bezpośrednio przenoszą się na dokładność wyznaczonej pozycji anteny odbiornika GNSS. Powyższa konkluzja nabiera szczególnego znaczenia w odniesieniu do metod pozycjonowania absolutnego, gdzie odwrotnie do metod względnych, nieobecne różnicowanie obserwacji nie eliminuje części wpływu błędów systematycznych. Z tego względu podjęcie się analizy tak postawionego problemu badawczego jest istotne i uzasadnione w odniesieniu do wielosystemowego pozycjonowania absolutnego w czasie rzeczywistym. Z tego względu wysoko oceniam niniejszą publikację.

W kolejnej publikacji z cyklu Doktorant postawił sobie za cel wykorzystanie min. informacji o jakości produktów czasu rzeczywistego do doświadczalnego wyznaczenia optymalnych wag obserwacji w pozycjonowaniu czasu rzeczywistego. Zadanie to zrealizowane zostało w dużej mierze eksperymentalnie, poprzez analizę wyników pozycjonowania przy przyjęciu różnych scenariuszy wagowania opartych o informację, o jakości produktów, jak i jakości obserwacji. Parametrami oceny założonych strategii wagowania obserwacji były błędy średnie współrzędnych a posteriori, powtarzalność pozycji oraz czas konwergencji (zbieżności) w rozwiązaniu statycznym PPP. Według mojej oceny praca ta ma największy wkład w oceniany cykl, gdyż na podstawie jej wyników udało się osiągnąć główny założony cel rozprawy doktorskiej. Dodatkowo w pracy Doktorant w sposób pełny przedstawił model funkcjonalny pozycjonowania wraz ze szczegółami dotyczącymi strategii opracowania obserwacji. Z mojego punktu widzenia jest to dość istotny element w przypadku poświęcenia szczególnej uwagi modelowi wagowania. Publikacja ta odnosi się również do ważnych i aktualnych pozycji literatury w przedmiocie rozważań, co utwierdza mnie w przekonaniu, iż Doktorant jest dobrze zorientowany w aktualnych kierunkach badań dotyczących pozycjonowania GNSS i ma w tym zakresie ugruntowaną wiedzę.

Ostatnia z cyklu prac czerpie bezpośrednio z wyników wcześniejszych badań Doktoranta przedstawionych w publikacjach [1] i [2] i stanowi praktyczne wykorzystanie opracowanych algorytmów. Bazując na opracowanym modelu wagowania obserwacji multi-GNSS Doktorant przeprowadził samodzielnie eksperymenty dotyczące pozycjonowania kinematycznego w czasie rzeczywistym w warunkach terenowych dla obiektu znajdującego się w ruchu ulicznym. Rozwiązania metod absolutnych SPP (*Single Point Positioning*) oraz PPP zostały odniesione do rozwiązania referencyjnego RTK (*Real Time Kinematics*) i przeanalizowane w dziedzinie współrzędnych. Doktorant wykazał istotną poprawę dokładności oraz dostępności wyznaczenia pozycji w przypadku wykorzystania obserwacji wielosystemowych z założonym optymalnym modelem wagowania w stosunku do rozwiązania bazującego na pojedynczym systemie GPS. Doktorant potwierdził również spotykane we wcześniejszych pozycjach literatury przedmiotu tezy

o znacznym wpływie najbliższego środowiska obserwacyjnego tj. zasłon terenowych oraz infrastruktury elektrotechnicznej na parametry oceny jakościowej pozycjonowania GNSS. Przede wszystkim jednak praca ta pozwoliła na weryfikację poprawności założonych hipotez o zróżnicowaniu wag obserwacji wielosystemowych. Należy podkreślić, iż praca ta jest jedną z pierwszych prac tego typu wykonanych przez polskie środowisko naukowe. Z drugiej strony zawarte w streszczeniu pracy twierdzenie Doktoranta, iż „dobór wag zmienia otrzymane rezultaty”, choć właściwe, jest jednakże oczywiste. Z mojego doświadczenia zbyt daleko idące wydaje się też stwierdzenie, iż za zaobserwowane w pracy duże pogorszenie jakości rozwiązania PPP, odpowiada efekt wielotorowości (*multipath*). Należy mieć na uwadze, iż dla obserwacji fazowych wpływ ten nie przekracza $\frac{1}{4}$ cyklu. Tak duża degradacja nie występowała w przypadku rozwiązania SPP, co może jednak wskazywać na inne źródło pogorszenia rozwiązania np. na wpływ niewykrytych utraconych cykli obserwacji fazowych (*cycle-slips*). W niektórych przypadkach Doktorant otrzymał dokładność rozwiązania metodą PPP na poziomie niższym niż metodą SPP.

Podsumowując ocenę merytoryczną rozprawy należy podkreślić, iż wyniki zawarte w przedstawionych pracach stanowią postęp w zakresie rozwoju algorytmów wyznaczania pozycji opartych o systemy GNSS. Przedstawione w cyklu prace dotyczą niewątpliwie ważnych z punktu widzenia współczesnego pozycjonowania satelitarnego problemów i wpisują się w obecnie podejmowane zagadnienia badawcze.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne.

Nie wykluczam, iż pewne z podniesionych przeze mnie uwag krytycznych mogą wynikać z subiektywnych interpretacji, co mam nadzieję, że zostanie w pełni wyjaśnione na publicznej obronie.

Autor rozprawy doktorskiej stawiając sobie za główny cel opracowanie i walidację optymalnej metodologii przetwarzania obserwacji multi-GNSS w czasie rzeczywistym ze szczególnym naciskiem na dobór właściwego wagowania obserwacji z pochodzących z niezależnych systemów GNSS mniej uwagi poświęcił analizie jakości (szumu) samych obserwacji satelitarnych co wydaje się istotnym zagadnieniem przy tak postawionym celu pracy. Informacja o poziomie zaszumienia sygnałów satelitarnych została oparta o dane z jednej tylko pozycji literatury. Jednakże doskonałym uzupełnieniem rozprawy byłaby również samodzielna analiza jakości obserwacji przeprowadzona a priori dla różnych sygnałów lub ich kombinacji liniowych. Taki element powinien być nieodzowny na etapie formułowania wniosków o optymalnym modelu stochastycznym procesu wyrównania obserwacji satelitarnych. Łączna informacja zarówno, o jakości produktów/korekt czasu rzeczywistego jak i jakości samych obserwacji satelitarnych stanowić podstawę ustalenia optymalnego sposobu wagowania obserwacji. Choć wpływ orbit i zegarów satelitów jest na pewno istotnym czynnikiem, to światowe badania wskazują również na zróżnicowanie precyzji samych obserwacji satelitarnych, co zostało słusznie zauważone przez Doktoranta w Rozdziale

2.3.3 publikacji [2]. W tym miejscu Doktorant powołał się na wyniki wcześniejszych prac trafnie podkreślając, iż przyjęcie wartości średnich dla wszystkich sygnałów satelitów dla danego bloku i konstelacji jest podejściem uproszczonym w stosunku do niezależnej analizy szumów obserwacji dla każdego sygnału oddzielnie. Co więcej eksperymentalna analiza jakości sygnałów satelitarnych pozwala na ustalenie optymalnego stosunku błędów a priori obserwacji kodowych do fazowych, który to nie może być ustalony na podstawie wiedzy o jakości orbit i zegarów.

Również sam sposób wykorzystania przez Doktoranta informacji o wartościach szumów sygnałów zaczerpniętych z wybranej publikacji można określić, jako pośredni. Doktorant wykorzystał tę wiedzę do ustalenia proporcji błędów średnich a priori sygnałów pozostałych systemów w stosunku do wartości ustalonych samodzielnie dla systemu GPS, a nie pełnego wykorzystania wartości błędów średnich a priori sygnałów wszystkich systemów. Sposób taki prowadzi w konsekwencji do sytuacji, gdy błędy średnie a priori obserwacji kodowych np. systemu Galileo uwzględniając sam parametr SISRE mają większe wartości niż wtedy, gdy pod uwagę bierze się tenże parametr łącznie z szumem obserwacyjnym, co nie koresponduje ze wzorem 4 (Rys.4a) publikacja [2]).

Dyskusyjną kwestią jest to, iż najlepszą strategią wagowania obserwacji okazała się ta, która nie wykorzystywała informacji o poziomie szumu sygnałów a jedynie wartościach parametru SISRE. Nadto strategia wykorzystująca łączną informację o wartości parametru SISRE oraz poziomie szumu obserwacyjnego, a więc taka, która teoretycznie wykorzystuje pełną wiedzę o jakości obserwacji i produktów, dała w rezultacie jedne z gorszych wyników pod względem błędów średnich współrzędnych a posteriori, powtarzalności pozycji i konwergencji rozwiązania [2]. Najlepsze zaś rezultaty otrzymano wtedy, gdy pominięto informację o zróżnicowaniu szumu sygnałów z różnych systemów GNSS na etapie ustalania wag obserwacji, a oparto się jedynie na wartości parametru SISRE. W publikacji nie odnalazłem wyczerpującej dyskusji odnoszącej się do tej kwestii, być może została zawarta w odpowiedziach na recenzje procesie wydawniczym, tym niemniej proszę o komentarz w tej sprawie podczas publicznej obrony.

Eksperymentalny dobór wag na podstawie wyników pozycjonowania oraz błędu średniego spostrzeżenia typowego m_0 może też być obarczony niekorzystnym wpływem wykorzystania różnej liczby satelitów w poszczególnych konstelacjach oraz ich geometrii skutkującym faworyzowaniem grupy obserwacji pochodzących z systemów o większej liczbie satelitów. W tym miejscu zasadnym mogłoby być podjęcie próby wyznaczenia lokalnych współczynników wariacji dla określonych grup obserwacji, na przykład oddzielnie dla systemów GNSS bądź też obserwacji fazowych i kodowych. Tak postawiony problem może już jednak wykraczać poza zakres niniejszej rozprawy.

Dość ogólny tytuł rozprawy nie odzwierciedla w pełni szczególnego nacisku na opracowanie optymalnego modelu wagowania obserwacji w procesie

wielosystemowego autonomicznego pozycjonowania GNSS. Tytuł nie precyzuje również, iż mamy do czynienia z techniką PPP.

Jak już było wspomniane wcześniej Doktorant za główny cel pracy założył sobie opracowanie optymalnej metodologii przetwarzania obserwacji multi-GNSS w czasie rzeczywistym ze szczególnym uwzględnieniem wagowania obserwacji. Jednakże z mojej perspektywy trudno jest odnaleźć w rozprawie te elementy, które dotyczyłyby metodologii opracowania obserwacji innych niż wagowanie. We wszystkich pracach wykorzystano ten sam model funkcjonalny, sposoby eliminacji opóźnień, produkty oraz modele poprawek. Sposób obliczenia wag na podstawie znajomości błędów średnich a priori i ich zależność od kąta elewacji sygnałów satelitarnych de facto również nie podlegał analizie.

W pracy dość szczegółowo zostały określone cele główny oraz pośrednie. Z drugiej jednak strony z treści wprowadzenia przedstawionego przez Doktoranta trudno jest wyłuskać tezę rozprawy doktorskiej, która nie została w sposób klarowny zdefiniowana. Po analizie wprowadzenia można wysnuć wniosek, iż tezą rozprawy jest stwierdzenie, iż połączenie dokładnych produktów wraz z optymalnym ich przetwarzaniem bazującym na ich charakterystyce dokładnościowej może przyspieszyć czas zbieżności rozwiązania, poprawić powtarzalność i zmniejszyć błędy współrzędnych. Niemniej na publicznej obronie rozprawy proszę o odniesienie się do tej kwestii.

5. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę wartość merytoryczną przedłożonej rozprawy doktorskiej, a w szczególności podjęcie trudnego tematu będącego obecnie przedmiotem wyjątkowych badań w wielu międzynarodowych grupach badawczych zajmujących się tematyką opracowania obserwacji satelitarnych pochodzących z systemów GNSS, uważam, że przedłożona **rozprawa doktorska spełnia warunki przewidziane Ustawą**. Przedstawione uwagi krytyczne nie obniżają istotnie wartości pracy, a mogą stanowić przyczynek do dyskusji naukowej rozpoczętej na publicznej obronie rozprawy. W mojej opinii doktorant wykazał się wiedzą teoretyczną w zakresie precyzyjnego pozycjonowania absolutnego oraz, co więcej, potrafi tę wiedzę zaaplikować w praktyce w postaci algorytmów implementowanych w wybranym środowisku programistycznym. Uważam, iż Doktorant poza wskazaną wiedzą posiada również umiejętność samodzielnego projektowania i prowadzenia eksperymentu naukowego wspartą umiejętnością interpretowania jego wyników i wnioskowania. Mając na uwadze powyższe, **stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Kamila Kaźmierskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej**.

J. P. P.