

Wydział Inżynierii Produkcji
Uniwersytet Przerodniczy w Lublinie
Katedra Inżynierii Środowiska i Geodezji

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Damiana Kiliszka pt. "Poprawa wydajności absolutnego pozycjonowania z wykorzystaniem systemów GPS i Galileo"

Opinię niniejszą opracowano na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport” Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie. Podstawę do przygotowania opinii stanowił przewodnik, w którym przedstawiony został cykl czterech tematycznie powiązanych ze sobą opublikowanych artykułów w latach 2018-2022, w tym trzech z listy A JCR (*Journal Citation Reports*) Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego:

[1] **Kiliszek, D.**, Kroszczyński, K. (2020). Performance of the precise point positioning method along with the development of GPS, GLONASS and Galileo systems.

Measurement, Volume 164, November 2020, 108009. DOI:

10.1016/j.measurement.2020.108009 (Lista A, 200 pkt.)

[2] **Kiliszek, D.**, Szolucha, M., Kroszczyński, K. (2018). Accuracy of Precise Point Positioning (PPP) with the use of different International GNSS Service (IGS) products and stochastic modeling. *Advances in Geodesy and Geoinformation (Geodesy and Cartography)*, Vol. 67, No. 2, 2018, pp. 207–238. DOI: 10.24425/gac.2018.125472 (Lista B, 20 pkt.)

[3] Araszkievicz, A., **Kiliszek, D.**, (2020). Impact of Using GPS L2 Receiver Antenna Corrections for the Galileo E5a Frequency on Position Estimates. *Sensors*, 20(19), 5536.

DOI: 10.3390/s20195536 (Lista A, 100 pkt.)

[4] **Kiliszek, D.**, Kroszczyński, K., Araszkievicz, A. (2022). Analysis of Different Weighting Functions of Observations for GPS and Galileo Precise Point Positioning Performance. *Remote Sensing*, 14(9), 2223. DOI: 10.3390/rs14092223 (Lista A, 100 pkt.)

Wszystkie cztery wymienione publikacje są zamieszczone w rozprawie doktorskiej, poprzedzonej przewodnikiem obejmującym pierwsze 38 stron pracy. Po opublikowanych artykułach umieszczono oświadczenia współautorów, dotyczące procentowego udziału oraz ich konkretnego wkładu merytorycznego w te publikacje.

W publikacjach: [1] (za 200 punktów), [2] (za 20 punktów) i [4] (za 100 punktów), mgr inż. Damian Kiliszek jest pierwszym autorem, uczestnicząc odpowiednio w 85%, 70% i 80%. W publikacji [3] (za 100 punktów) pełni rolę drugiego autora, uczestnicząc w 45%. Suma punktów zdobytych przez mgr inż. Damiana Kiliszka wynosi 314, a łączny Impact Factor wynosi 9.226, biorąc pod uwagę jego procentowy udział w publikacjach. W większości współautorami przedstawionych artykułów w cyklu publikacyjnym są promotor rozprawy, dr hab. inż. Krzysztof Kroszczyński, oraz promotor pomocniczy, dr hab. inż. Andrzej Araszkievicz. Zgodnie z przedstawionymi oświadczeniami przez doktoranta w pracach [1], [2] i [4], uczestniczył on w opracowaniu koncepcji i metodyki badań, interpretacji wyników oraz przygotowaniu pierwotnej wersji artykułu. Natomiast w pracy [3] wziął udział w analizie

obserwacji precyzyjnego pozycjonowania absolutnego (PPP - Precise Point Positioning) GPS i Galileo, interpretacji wyników oraz przygotowaniu pierwotnej wersji artykułu.

Publikacje, które wchodziły w skład rozprawy doktorskiej, dotyczą tej samej tematyki badawczej związanej z wykorzystaniem pomiarów GNSS (Global Navigation Satellite System) w celu poprawy wydajności PPP poprzez zwiększanie dokładności oraz skracanie czasu zbieżności za pomocą systemów GPS i Galileo. Teza badawcza pracy doktorskiej zakłada, że modelowanie obserwacji dostosowane do systemu GNSS poprawia precyzję absolutnego pozycjonowania GPS i Galileo. Cel szczegółowy pracy doktorskiej obejmuje wykazanie, że rozwój produktów GNSS i systemu Galileo zwiększa wydajność pozycjonowania PPP, a także zaproponowanie metody modelowania obserwacji GPS i Galileo w rozwiązaniach multi-GNSS.

Prace przedstawione w cyklu umożliwiają doktorantowi sformułowanie dla każdej z nich odpowiednich hipotez badawczych. Pierwsza hipoteza zakłada, że rozwój systemu Galileo przyczynił się do zwiększenia dokładności pozycjonowania, skrócenia czasu zbieżności oraz zwiększenia dostępności rozwiązań. W ramach drugiej hipotezy stwierdza się, że interwał próbkowania poprawek do zegarów satelitów ma większy wpływ na dokładność pozycjonowania i czas zbieżności niż interwał próbkowania efemeryd precyzyjnych. Hipoteza trzecia zakłada, że zastosowanie modeli poprawek anten odbiornika z częstotliwości L2 systemu GPS do częstotliwości E5a systemu Galileo przyczynia się do zwiększenia spójności pozycjonowania PPP między rozwiązaniami GPS i Galileo. W ramach czwartej hipotezy stwierdza się, że wprowadzenie odpowiednich funkcji wagujących obserwacje GNSS do rozwiązań stanie się czynnikiem zwiększającym wydajność pozycjonowania.

Pierwsze dwie prace z cyklu wykazały, że rozwój produktów GNSS i systemu Galileo przyczynia się do wzrostu efektywności pozycjonowania metodą PPP. Natomiast dwie kolejne prace z tego cyklu przedstawiły propozycje modelowania obserwacji GPS i Galileo w rozwiązaniach multi-GNSS. Zaprezentowano różne modele poprawek położenia centrum fazowego anteny odbiornika oraz odpowiednie wagowanie obserwacji GPS i Galileo.

W pracy [1] zostało ukazane, jak zmieniała się efektywność metody PPP wraz z postępem systemów GPS, GLONASS i Galileo. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem danych obserwacyjnych z 19 globalnie rozmieszczonych stacji po jednym tygodniu w latach 2017, 2018 i 2019. Wszystko to oparte było na tym samym modelu, oprogramowaniu oraz produktach Center for Orbit Determination (CODE), przy zróżnicowanych kątach odcięcia elewacji: 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35° i 40°. Analiza ta ujawniła widoczną poprawę dokładności określania pozycji oraz skrócenie czasu zbieżności w kolejnych latach. Autorzy wykazali, że w 2017 roku użycie satelitów Galileo nie miało wpływu na dokładność pozycji, ale znacząco przyczyniło się do skrócenia czasu zbieżności. Najlepsze rezultaty, osiągając dokładność pozycji na poziomie 1 cm i czas zbieżności 13 minut, uzyskano dla rozwiązania GPS + GLONASS + Galileo w 2019 roku. Stało się to możliwe dzięki umieszczeniu w latach 2018 i 2019 odpowiednio po 4 satelity Galileo na orbitach MEO, co pozwalało na obserwację średnio 22 satelitów, a także dzięki wzrostowi dokładności produktów MGEX. Wyniki wykazały również, że największy wpływ na dokładność pozycjonowania multi-GNSS miało GPS. Nawet dla kąta odcięcia elewacji wynoszącego 40°, wykorzystanie GPS + GLONASS + Galileo pozwoliło osiągnąć około 90% dostępności rozwiązań z dokładnością na poziomie centymetrów.

Praca [2] obejmuje analizy dokładności pozycji czterech stacji EUREF Permanent GNSS Network (EPN) oraz czasu zbieżności metody PPP przy wykorzystaniu systemu GPS i różnych produktów International GNSS Service (IGS), takich jak: Final, Rapid, Ultra Rapid i MGEX, obliczanych przez CODE. Dodatkowo przeprowadzono obliczenia z uwzględnieniem funkcji ważenia obserwacji, zależnie od kąta elewacji. Najlepsze wyniki uzyskano dla produktów CODE, wykorzystujących precyzyjne efemerydy o interwale próbkowania 5 minut i precyzyjne poprawki do zegarów satelitów z interwalem próbkowania 30 sekund. W tych warunkach dokładność wyznaczania pozycji wyniosła 3 cm, a czas zbieżności wyniósł 44 minuty. Dla orbit Final i Rapid o interwale próbkowania 15 minut oraz poprawkach do zegarów o interwale próbkowania 5 minut, uzyskano podobne wyniki, osiągając dokładność pozycji na poziomie 4 cm i czas zbieżności 70 minut. Przy użyciu produktów Ultra Rapid, z interwalem próbkowania 15 minut, uzyskano najgorsze rezultaty, gdzie dokładność pozycji wyniosła 10 cm, a czas zbieżności osiągnął 2 godziny. Zastosowanie funkcji wagowych poprawiło dokładność określania pozycji w większości przypadków, z wyjątkiem obliczeń z użyciem produktów Ultra Rapid, gdzie czas zbieżności uległ wydłużeniu. Autorzy pracy zwrócili uwagę, że interwały próbkowania poprawek do zegarów satelitów mają większy wpływ na wydajność pozycjonowania metodą PPP niż interwały próbkowania orbit satelitów.

W pracy [3] dokonano analizy modeli poprawek centrum fazowego anteny dostarczanych dla większości typów anten naziemnych przez IGS, obejmujące częstotliwości L1 i L2 sygnałów GPS oraz G1 i G2 sygnałów GLONASS. Ze względu na trudności z dostępem do poprawek centrum fazowego anteny dla sygnałów Galileo, w wielu przypadkach poprawki dedykowane dla GPS są używane dla częstotliwości E1 i E5a Galileo. Częstotliwości L1 GPS i E1 Galileo są identyczne, więc wykorzystano model IGS. Dla częstotliwości E5a Galileo, gdzie IGS nie udostępnia modeli średnich poprawek centrum fazowego anteny, konieczne jest zastosowanie innych modeli, np. L2 GPS lub modele opracowane w procesie kalibracji indywidualnych w komorach bezekowych. W przeprowadzonym badaniu doktorant skoncentrował się na wpływie wykorzystania poprawek dla częstotliwości L2 GPS do korekty sygnałów na częstotliwości E5a Galileo, z wykorzystaniem różnych modeli kalibracji anten, zarówno modeli średnich udostępnionych przez IGS, jak i z kalibracji indywidualnych. Celem przeprowadzonych badań było ocenienie wpływu różnych poprawek do położenia centrum fazowego anteny odbiornika na obserwacje systemu Galileo dla pozycjonowania metodą PPP. W pracy autorzy zaproponowali analizę różnicową dla obserwacji z jednego tygodnia w 2019 r., korzystając z 25 stacji Europejskiej Sieci Stacji Referencyjnych (EUREF), wyposażonych w indywidualnie skalibrowane anteny. W celu określenia wpływu modeli centrum fazowego anteny na obserwacje E5a systemu Galileo, współrzędne stacji zostały przeliczone do układu topocentrycznego. Zastosowanie modeli poprawek częstotliwości L2 GPS dla częstotliwości E5a Galileo wprowadza błąd systematyczny rzędu 9 mm dla składowej pionowej U, natomiast dla składowych horyzontalnych E i N są poniżej 1 mm. Ponadto, takie zastosowanie modeli poprawek anten odbiornika zwiększa spójność pozycjonowania GPS i Galileo metodą PPP w układzie IGS14.

Artykuł [4] przedstawia analizę wykorzystania różnych funkcji wagowych dla obserwacji PPP GPS i Galileo, przeprowadzonych w ciągu jednego tygodnia w 2021 roku dla 13 globalnie rozmieszczonych stacji MGEX (Multi GNSS Experiment). Wybrano osiem różnych funkcji wagowych, z których jedna zakłada, że wszystkie obserwacje mają taką samą wagę, niezależnie od kąta elewacji, podczas gdy dla pozostałych używano wybranych funkcji zależnych od kąta elewacji. Zbadano wpływ różnych funkcji wagowych na dokładność i czas zbieżności dla pozycjonowania GPS, Galileo oraz GPS+Galileo. Wykazano, że stosowanie

różnych funkcji wagowych nie wpływa na składową poziomą, ale ma zauważalny wpływ na składową pionową, opóźnienie troposferyczne i czas zbieżności. Uzyskane wyniki potwierdziły, że rozwiązanie Galileo ma porównywalną dokładność do rozwiązania GPS. Również dla rozwiązania Galileo najlepsze wyniki uzyskano dla funkcji o mniejszej zależności od kąta elewacji niż dla GPS, ponieważ obserwacje Galileo przy niższych kątach elewacji mają lepszą wydajność niż obserwacje GPS. W końcu zaproponowano nowe podejście wagowe, używając dwóch różnych funkcji wagowych z najlepszych rozwiązań GPS i Galileo dla rozwiązania GPS+Galileo. Zaproponowany przez doktoranta nowy sposób wagowania obserwacji dla rozwiązania GPS+Galileo umożliwił otrzymanie o 5% krótszego czasu zbieżności i większą o 30% zgodność opóźnienia troposferycznego z IGS, pomimo nieznacznie gorszej dokładności, która może wynikać z błędów systematycznego między systemami GPS i Galileo.

Uwagi Krytyczne

Uważam, że tytuł rozprawy powinien być taki, aby uwzględniał również system GLONASS czyli „Poprawa wydajności absolutnego pozycjonowania z wykorzystaniem systemów GPS, GLONASS i Galileo”.

Jeden z moich ważnych komentarzy do przedstawionego cyklu prac w doktoracie dotyczy braku uwzględnienia chińskiego systemu Beidou w badaniach. Beidou rozwijał się równoległe z systemem Galileo w okresie przeprowadzonych w publikacjach analiz od 2017 do 2021. Poprzednia wersja, Beidou 2, zbudowana w latach 2002–2012, miała tylko 4 satelity na orbitach MEO, 5 na orbitach GEO i 5 na orbitach IGSO, co oznaczało ograniczony zasięg. Budowa konstelacji systemu Beidou3 od 2009 roku zakończyła się w 2020 roku z 24 satelitami na orbitach MEO, 3 na orbitach GEO i 3 na orbitach IGSO, co oznaczało globalne pokrycie. W 2017 roku pojawił się jeden satelita, w 2018 roku aż osiem, a w 2019 roku kolejne trzy na orbitach MEO. Włączenie systemu Beidou, wspomnianego jedynie we wstępach prac [1], [2] i [4], mogłoby przyczynić się do poprawy dokładności absolutnego pozycjonowania poprzez zwiększenie liczby dostępnych satelitów na orbitach MEO. To z kolei wpłynęłoby na zwiększenie liczby obserwacji i poprawę geometrii satelitów. Beidou, w połączeniu z innymi systemami GNSS, takimi jak GPS, GLONASS czy Galileo3, mógłby dostarczać nadmiarowych obserwacji. W przypadku utraty sygnału z jednego z systemów, to mogłoby przynieść zauważalne korzyści w poprawie dokładności pozycjonowania.

Uwagi krytyczne zawarte w niniejszej recenzji nie wpływają na wysoką ocenę rezultatów przedstawionych w rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Damiana Kiliszka.

Podsumowanie

Przedstawione w cyklu publikacji prace zostały już zrecenzowane przez niezależnych recenzentów i zatwierdzone do druku, dlatego ponowne przeprowadzanie ich recenzji byłoby niecelowe.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska prezentuje wysoki poziom merytoryczny. Badania przeprowadzone w publikacjach wpisują się w światowe trendy rozwoju pozycjonowania multi-GNSS. Jednocześnie uważam, że zagadnienia rozpatrywane w pracy doktorskiej wymagają dogłębnego poznania metody PPP, która, przy użyciu obserwacji multi-GNSS, może napotkać różne wyzwania związane zarówno z charakterystykami tych systemów, jak i z samą specyfiką metody PPP. Wśród tych trudności można wyróżnić: 1)

różnice w standardach i sygnałach poszczególnych systemów GPS, GLONASS, Galileo, co może prowadzić do problemów z harmonizacją i integracją sygnałów, 2) zmienna liczba dostępnych satelitów lub ich niedostępność w danym systemie, co może wpływać na dokładność i czas zbieżności metody PPP, 3) konieczność posiadania precyzyjnych danych orbitalnych i zegarowych, 4) zjawisko wielodrożności i interferencji sygnałów, 4) opóźnienia jonosferyczne i troposferyczne. W celu realizacji tych prac wszystkie te problemy musiały zostać przez doktoranta dobrze przemyślane.

Przeprowadzone badania skoncentrowały się na zwiększeniu wydajności absolutnego pozycjonowania i były związane z wykazaniem wpływu rozwoju systemu Galileo, korzystania z produktów o różnych interwałach probkowania, a także zastosowania różnych modeli anten odbiorczych i funkcji wagujących obserwacje. Doktorant w pracy [1] udowodnił, że rozwój systemu Galileo już w 2019 roku miał coraz większy wpływ na pozycjonowanie multi-GNSS poprzez zwiększenie dokładności oraz skrócenie czasu zbieżności. W kolejnej pracy [2] wykazał, że interwał probkowania poprawek do zegarów satelitów ma większy wpływ na wydajność pozycjonowania metodą PPP niż interwał probkowania orbit satelitów. W pracy [3] wykazał, że wykorzystanie indywidualnej kalibracji modeli anten dla częstotliwości E5a powoduje mniejszą zgodność rozwiązania Galileo z rozwiązaniem GPS, natomiast korzystanie z modeli anten z częstotliwości L2 dla częstotliwości E5a zwiększa spójność rozwiązań Galileo i GPS. W ostatnim artykule [4] pokazał, że dostosowane do systemu funkcje wagujące obserwacje zwiększają wydajność pozycjonowania metodą PPP przy użyciu systemów GPS i Galileo.

Przedstawione w cyklu prac badania uważam za istotne osiągnięcie naukowe. Doktorant wykazał zdolność do efektywnej współpracy zarówno z współautorami prac, jak i do samodzielnego prowadzenia badań naukowych, co wynika z jego umiejętności integrowania różnych aspektów opisanych w przewodniku do zgłoszonych prac. Poprzez przeprowadzenie wielu obliczeń, zdobył obszerne doświadczenie w zastosowaniu metody PPP, precyzyjnie dobierając produkty oferowane przez IGS. Jego staranność pozwoliła uzyskać współrzędne o najwyższej precyzji oraz skrócić czas zbieżności.

Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa mgr inż. Damiana Kiliszka w pełni spełnia warunki stawiane pracom doktorskim określone w 1) art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. 2018 poz. 1668), 2) art. 179. ustawy z dnia 3 lipca 2018r „Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1669), 3) Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. 2018.261) wnosząc o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Wiesław Kosek