

Dr hab. inż. Tomasz Liwosz  
Katedra Geodezji i Astronomii Geodezyjnej  
Wydział Geodezji i Kartografii  
Politechnika Warszawska

Warszawa, 01.03.2024 r.

płk. prof. dr hab. inż. Michał Kędzierski  
Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny  
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport  
Wojskowa Akademia Techniczna

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Damiana Kiliszka  
pt. „*Poprawa wydajności absolutnego pozycjonowania z wykorzystaniem systemów GPS i Galileo*”  
Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Kroszczyński  
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Andrzej Araszkiewicz

### Podstawa formalna wykonania recenzji

Podstawą formalną wykonania recenzji jest pismo płk. prof. dr. hab. inż. Michała Kędzierskiego, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie z dnia 18 grudnia 2023 r., w związku z uchwałą nr 47/RDN/ILGiT/2023 Rady Dyscypliny Naukowej ILGiT z dnia 15 grudnia 2023 roku.

### Charakterystyka rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska została przygotowana w formie przewodnika pt. „*Poprawa wydajności absolutnego pozycjonowania z wykorzystaniem systemów GPS i Galileo*” w którym został przedstawiony cykl czterech artykułów naukowych powiązanych tematycznie. Przewodnik został napisany w języku polskim i zawiera najważniejsze zagadnienia dotyczące metody precyzyjnego absolutnego pozycjonowania oraz główne wyniki uzyskane w artykułach. Przewodnik zawiera również streszczenia w języku polskim i angielskim. W skład cyklu rozprawy doktorskiej wchodzi następujące artykuły powiązane tematycznie:

- 1) Kiliszek, D.; Kroszczyński, K. (2020) *Performance of the Precise Point Positioning Method along with the Development of GPS, GLONASS and Galileo Systems*, Measurement 2020, 164, 108009, udział Doktoranta 85%,

- 2) Kiliszek, D., Szołucha, M., Kroszczyński, K. (2018) *Accuracy of Precise Point Positioning (PPP) with the Use of Different International GNSS Service (IGS) Products and Stochastic Modelling*. Geodesy and Cartography 2018, 67, 207–238, udział Doktoranta 70%,
- 3) Araszkiwicz A, Kiliszek D. (2020) *Impact of Using GPS L2 Receiver Antenna Corrections for the Galileo E5a Frequency on Position Estimates* (2020) Sensors. 2020; 20(19):5536. <https://doi.org/10.3390/s20195536>, udział Doktoranta 45%,
- 4) Kiliszek D, Kroszczyński K, Araszkiwicz A. (2022) *Analysis of Different Weighting Functions of Observations for GPS and Galileo Precise Point Positioning Performance*. Remote Sensing. 2022; 14(9):2223. <https://doi.org/10.3390/rs14092223>, udział Doktoranta 80%.

Sumaryczny IF publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej wynosi 12.852. Liczba punktów wg listy MEiN wynosi 420. Udział Doktoranta w powyższych publikacjach wyniósł odpowiednio: 85%, 70%, 45% i 80%. Przewodnik zawiera również oświadczenia współautorów odnośnie do zakresu wykonanych prac i procentowego udziału w pracach nad artykułem.

W pierwszym artykule, pt. „*Performance of the Precise Point Positioning Method along with the Development of GPS, GLONASS and Galileo Systems*” Doktorant przeanalizował wydajność metody PPP w zależności od rozwoju konstelacji GPS, GLONASS i Galileo. Autor przeanalizował obserwacje GNSS zarejestrowane na 19 globalnie rozmieszczonych stacjach IGS w ciągu trzech różnych tygodni (po jednym tygodniu w latach 2017, 2018 i 2019). Doktorant wykonał szereg testów obliczeniowych, w których stosował obserwacje konstelacji GPS, GLONASS i Galileo w różnych konfiguracjach (GPS, GLONASS, Galileo, GPS+Galileo, GPS+GLONASS, GLONASS+Galileo, GPS+GLONASS+Galileo) oraz powyżej różnych wartości minimalnej wysokości satelitów nad horyzontem ( $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $35^\circ$  i  $40^\circ$ ). W artykule Autor zbadał każdy z przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowym pod kątem takich parametrów jak: współczynnik PDOP, odchylenie standardowe pozycji, błąd systematyczny pozycji, czy czas zbieżności metody PPP do osiągnięcia założonej dokładności pozycji. Najlepsze wyniki uzyskano dla wariantu, w którym stosowano obserwacje dla wszystkich trzech konstelacji GNSS. Zadowolające wyniki uzyskano także dla rozwiązań, w których wykorzystane obserwacje powyżej  $40^\circ$  na horyzontem, co jest istotne zwłaszcza na obszarach o ograniczonej widoczności satelitów. Doktorant zwrócił szczególną uwagę na wpływ rozwoju systemu Galileo w analizowanym okresie (związany ze wzrost liczby dostępnych satelitów) na uzyskiwane wyniki. Wykorzystując obserwacje Galileo, samodzielnie jak i łącznie z obserwacjami innych systemów, Doktorant uzyskał najlepsze wyniki dla roku 2019, w którym było dostępnych najwięcej satelitów Galileo. Doktorant stwierdził również, że od roku 2019 wykorzystanie obserwacji Galileo samodzielnie w metodzie PPP umożliwia pozycjonowanie z dokładnością na poziomie 1 cm. Autor podkreślił także, że w dalszym ciągu obserwacje GPS umożliwiają osiągnięcie najwyższej dokładności oraz mają największy wpływ na dokładność w rozwiązaniach multi-GNSS.

W drugim artykule, pt. „*Accuracy of Precise Point Positioning (PPP) with the Use of Different International GNSS Service (IGS) Products and Stochastic Modelling*”, Doktorant przeanalizował wpływ różnych produktów IGS (kombinowanych i centrum analiz CODE) na wyniki uzyskiwane za pomocą metody PPP. W pracy zbadano dokładność uzyskiwanych współrzędnych punktów wyznaczonych z 3-godzinnych obserwacji GPS oraz błędy systematyczne pozycji, czas zbieżności metody PPP, a także wartości residuów obserwacji fazowych i kodowych. Autorzy wykonali obliczenia dla dwóch wariantów wagowania obserwacji fazowych i kodowych, w których przyjęto: (1) stałe wartości błędów średnich obserwacji i (2) zmienne wartości błędów średnich obserwacji, zależne od wysokości satelitów nad horyzontem.

W trzecim artykule, pt. „*Impact of Using GPS L2 Receiver Antenna Corrections for the Galileo E5a Frequency on Position Estimates*”, Doktorant przeanalizował wpływ stosowania różnych modeli anten dla odbiorników na pozycje punktów wyznaczane metodą PPP. W szczególności Doktorant zajął się problemem zastosowania w obliczeniach kalibracji wykonanych dla częstotliwości L2 GPS do korygowania obserwacji Galileo wykonanych na częstotliwości E5a. Doktorant wykonał pięć wariantów obliczeń, w trzech wykorzystując tylko obserwacje Galileo, a w dwóch tylko GPS. W obliczeniach Autor zastosował dwa rodzaje modeli anten odbiorników: indywidualne oraz uśrednione dla danego typu anteny (z modelu IGS). W dwóch wariantach dla obserwacji Galileo, Doktorant zastosował korekty GPS dla częstotliwości L2 dla obserwacji Galileo na częstotliwości E5a. Największą zgodność pozycji pomiędzy rozwiązaniami Galileo i GPS uzyskano w przypadku stosowania w obliczeniach Galileo kalibracji GPS L2 zamiast Galileo E5a. Stosując w obliczeniach Galileo tylko kalibracje przeznaczone dla tego systemu, Doktorant uzyskał różnice w stosunku do pozycji GPS na poziomie  $-9$  milimetrów. Doktorant przypisał powstałe rozbieżności niezgodności modeli IGS dla satelitów GPS i Galileo.

W czwartym artykule, pt. „*Analysis of Different Weighting Functions of Observations for GPS and Galileo Precise Point Positioning Performance*”, Doktorant zajął się analizą funkcji do wagowania obserwacji GPS i Galileo w zależności od wysokości satelitów nad horyzontem w obliczeniach PPP. W artykule wykorzystano obserwacje GNSS zarejestrowane na 13 globalnie rozmieszczonych stacjach IGS podczas jednego tygodnia w 2021 roku. Doktorant wykonał obliczenia dla ośmiu wariantów wagowania obserwacji GNSS, w tym również stosując jednakowe wagi, niezależnie od wysokości satelitów nad horyzontem. W obliczeniach zastosowano obserwacje GPS i Galileo łącznie (w dwóch wariantach: przyjmując jednakowe wagi dla GPS i Galileo w pierwszym wariancie i mniejsze wagi dla Galileo w drugim) i oddzielnie dla każdego systemu. Doktorant przeanalizował wpływ różnych funkcji wagujących na uzyskiwane pozycje punktów, opóźnienie troposferyczne i czas zbieżności algorytmu PPP. W przypadku pozycji punktów największy wpływ stosowania różnych funkcji wagujących odnotowano dla składowej wysokościowej. Spośród rozwiązań łącznych GPS+Galileo nieco gorsze wyniki uzyskano dla rozwiązania, w którym przyjęto mniejsze wagi dla obserwacji Galileo. Na podstawie uzyskanych wyników Doktorant zaproponował również własne podejście do wagowania obserwacji GPS i Galileo w rozwiązaniu łącznym, w którym dla obserwacji każdego systemu zastosował takie funkcje (inne dla GPS i Galileo), dla których uzyskał najlepsze wyniki w rozwiązaniach indywidualnych. W zaproponowanym podejściu uzyskano lepszą zgodność opóźnień troposferycznych z IGS oraz krótsze czasy zbieżności algorytmu PPP niż w przypadku dwóch rozwiązań łącznych analizowanych w pracy. Dla dokładności współrzędnych uzyskano nieco gorsze wyniki.

Wszystkie artykuły zawierają wprowadzenie, w którym Doktorant wyczerpująco przedstawił motywację dla podjętych badań oraz aktualny stan wiedzy odnośnie do badanej tematyki na świecie. Na uwagę zasługuje także pokaźna liczba cytowanych publikacji, która wynosi 78 w artykule 1, 54 w drugim, 42 w trzecim oraz 79 w ostatnim, czwartym artykule cyklu.

### **Ocena rozprawy doktorskiej**

Przedłożona rozprawa doktorska dotyczy opracowania obserwacji GNSS z wykorzystaniem metody precyzyjnego absolutnego pozycjonowania (PPP, ang. *Precise Point Positioning*). Metoda PPP jest alternatywnym podejściem do precyzyjnego pozycjonowania względem metody różnicowej. W metodzie PPP wykorzystuje się obserwacje kodowe i fazowe zarejestrowane na jednym punkcie pomiarowym. Kluczem do uzyskiwania wysokich dokładności wyznaczanych pozycji jest

wykorzystanie w obliczeniach precyzyjnych orbit oraz poprawek do zegarów satelitów GNSS, które są publikowane przez IGS (produkty kombinowane) oraz przez poszczególne centra analiz IGS (np. CODE). Produkty te są dostępne z różną dokładnością oraz z różnym opóźnieniem czasowym. Metoda PPP jest rozwijana od końca lat 90 XX wieku. W ostatnich latach jest ona szczególnie przedmiotem zainteresowania w wielu publikacjach naukowych. Powstało również kilka ogólnodostępnych oprogramowań do opracowania obserwacji GNSS wykorzystujących metodę PPP. Podjęta przez Doktoranta tematyka bardzo dobrze wpisuje się zatem w inne badania prowadzone na świecie związane z testowaniem i usprawnianiem metody PPP.

Doktorant w rozprawie doktorskiej postawił następującą tezę badawczą: *modelowanie obserwacji dostosowane do systemu GNSS zwiększa wydajność precyzyjnego absolutnego pozycjonowania GPS i Galileo*. Ponadto Doktorant zdefiniował główny cel rozprawy jako: „*zapropozowanie sposobu zwiększania wydajności pozycjonowania metodą PPP z wykorzystaniem systemów GPS i Galileo*” oraz dwa cele szczegółowe:

1. wskazanie, że rozwój produktów GNSS oraz rozwój systemu Galileo zwiększa wydajność pozycjonowania metodą PPP,
2. zaproponowanie sposobu modelowania obserwacji GPS i Galileo w rozwiązaniach multi-GNSS.

Doktorant w przedłożonych artykułach badał wpływ rozmaitych czynników na wyznaczaną pozycję punktu, czas zbieżności algorytmu PPP, opóźnienie troposferyczne, residua obserwacji fazowych i kodowych, czy współczynnik PDOP. Autor wykonał bogatą liczbę eksperymentów obliczeniowych, w których zbadał wpływ na uzyskiwane wyniki takich czynników jak: produkty IGS o różnej dokładności i rozdzielczości czasowej, minimalna wysokość satelitów nad horyzontem, funkcje wagujące, modele anten odbiorczych, czy wykorzystane w obliczeniach obserwacje różnych konstelacji GNSS. Doktorant wykazał, że rozwój systemu Galileo i coraz większa liczba satelitów tego systemu ma istotne znaczenie w kontekście dokładności pozycjonowania metodą PPP, zarówno przy wykorzystaniu obserwacji Galileo samodzielnie, jak i łącznie z obserwacjami innych systemów. Doktorant wykazał również, że pozycjonowanie z wykorzystaniem obserwacji multi-GNSS pozwala uzyskać najdokładniejsze wyniki. Jest to szczególnie istotne w terenach o utrudnionej widoczności satelitów. Ciekawym wynikiem badań uzyskanym przez Doktoranta jest propozycja wagowania obserwacji GPS i Galileo z wykorzystaniem innych funkcji wagujących, które najlepiej odpowiadają charakterystyce obserwacji danej konstelacji. W mojej ocenie zastosowane przez Doktoranta metody badawcze są prawidłowe, a uzyskane wyniki mają dużą wartość praktyczną.

Analiza cyklu czterech powyższych artykułów wchodzących w skład recenzowanej rozprawy doktorskiej pt. „*Poprawa wydajności absolutnego pozycjonowania z wykorzystaniem systemów GPS i Galileo*” pozwala stwierdzić, że założone cele badawcze i naukowe zostały przez Doktoranta zrealizowane. Osiągnięte przez Autora wyniki dowodzą możliwości poprawy wydajności precyzyjnego absolutnego pozycjonowania.

### **Uwagi szczegółowe i pytania**

Tytuł rozprawy doktorskiej brzmi: *Poprawa wydajności absolutnego pozycjonowania z wykorzystaniem systemów GPS i Galileo*. W mojej ocenie tytuł jest nieściśły, ponieważ tylko w trzecim i czwartym artykule Doktorant zajmował się obserwacjami GPS i Galileo. W pierwszej publikacji były wykorzystywane dodatkowe także obserwacje GLONASS, które były ważnym

elementem prowadzonych badań. Z kolei w drugim artykule Doktorant wykorzystał tylko obserwacje GPS.

W przewodniku na stronie 21 Doktorant napisał: „Dodatkowo, wykorzystałem dokładniejsze poprawki do zegarów satelitów estymowane w oddzielnym, późniejszym procesie obliczeniowym zapisane w formacie *clk*”. Uwaga dotyczy wykorzystania w pracy 30-sekundowych i 5-minutowych poprawek do zegarów satelitów GNSS publikowanych przez jedno z centrów analiz IGS – CODE. Zawiera one jednak pewną nieścisłość ponieważ poprawki do zegarów w interwale 30-sekundowych są tworzone na podstawie poprawek 5-minutowych na drodze interpolacji z wykorzystaniem obserwacji fazowych. Nie są one zatem estymowane w późniejszym procesie obliczeniowym.

W publikacji 2 wykorzystano różne produkty IGS (kombinowane i centrum analiz CODE), które posiadały różną rozdzielczość dla poprawek do zegarów (30 sekund, 5 minut, 15 minut) i współrzędnych satelitów (5 i 15 minut). W obliczeniach Doktorant wykorzystał 30-sekundowe obserwacje GNSS. W jaki sposób były otrzymane poprawki do zegarów w interwałach 30-sekundowych? Czy była stosowana interpolacja (jaka)? Czy Doktorant zbadał wpływ ewentualnej interpolacji na otrzymane poprawki do zegarów (i współrzędne) satelitów? Interpolacja poprawek do zegarów satelitów może mieć niekorzystny wpływ na ich dokładność, co prawdopodobnie jest przyczyną uzyskania gorszych rezultatów dla produktów kombinowanych IGS (Final i Rapid) oraz CODE, dla których poprawki do zegarów satelitów były dostępne w interwale 5 minut, niż dla produktów CODE o interwale 30 sekund. Na przykład w oprogramowaniu Bernese GNSS Software w wersji 5.4 rozwijanym na Uniwersytecie w Bernie (będący główną siedzibą centrum analiz CODE) w celu zachowania maksymalnej dokładności poprawek do zegarów satelitów w obliczeniach PPP zaleca się w ogóle ich nie interpolować i stosować obserwacje GNSS z takim interwałem z jakim są dane poprawki do zegarów.

W artykule 1 Doktorant wykonał obliczenia przyjmując różne minimalne wysokości satelitów nad horyzontem. Pośród wybranych wartości była także wysokość  $0^\circ$ . Dla tego wariantu uzyskano nieco gorsze wyniki niż np. dla wysokości  $5^\circ$ . Niestety w pracy nie znalazłem żadnego komentarza odnośnie do tych wyników. Ponadto, czy funkcja troposferyczna GMF (ang. *Global Mapping Function*) powinna być stosowana dla wysokości  $0^\circ$ ? Dlaczego do policzenia współrzędnych referencyjnych wykorzystano obserwacje powyżej  $7^\circ$  nad horyzontem, czyli innej wartości niż w badanych wariantach?

Do analizy obserwacji GNSS w przedłożonych artykułach Doktorant stosował trzy różne oprogramowania: GAMP w pierwszym i trzecim artykule, gLAB w drugim oraz PPPH w czwartym artykule. Czy są jakieś istotne różnice pomiędzy tymi oprogramowaniami, które powodowały zmianę używanego w badaniach oprogramowania?

W przewodniku, w opisie odnośnie do artykułu 2 pominięto aspekt wagowania obserwacji.

W przedstawionych artykułach Autor często używa angielskiego określenia *error* dla błędu systematycznego pozycji. W mojej opinii lepiej byłoby używać pojęcia *systematic error* lub *bias*.

Pytanie dodatkowe. W niektórych oprogramowaniach do opracowania obserwacji GNSS metodą PPP (np. Bernese GNSS Software, GipsyX, PRIDE-PPPAR) możliwe jest wyznaczenie nieoznaczoności fazy jako wielkości całkowite. W badaniach wykonanych w przedłożonych artykułach całkowite wartości nieoznaczoności fazy nie były wyznaczone. Czy wyznaczenie całkowitych nieoznaczoności fazy mogłoby mieć istotny wpływ na uzyskane w pracy wyniki i wyciągnięte wnioski?

Należy podkreślić, że powyższe uwagi mają przede wszystkim charakter techniczny i nie wpływają w istotny sposób na przedstawione w rozprawie doktorskiej wnioski.

### **Wnioski końcowy**

Na podstawie analizy przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Damiana Kiliszka stwierdzam, że Doktorant rozwiązał postawiony problem naukowy oraz wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Doktorant wykazał się również ogólną wiedzą teoretyczną na wysokim poziomie. Wyniki rozprawy mają duże znaczenie naukowe i praktyczne w zakresie precyzyjnego absolutnego pozycjonowania. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne nie są istotne w kontekście uzyskanych wyników i wniosków. W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Damiana Kiliszka „*Poprawa wydajności absolutnego pozycjonowania z wykorzystaniem systemów GPS i Galileo*” spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65 poz. 595) z późniejszymi zmianami w brzmieniu z dnia 15 września 2017 r. (Dz. U. 2017 r. poz. 1789.), zgodnie z Art. 175. 1. Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce<sup>1</sup> (Dz.U. 2018 poz. 1669). Wnioskuje zatem o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr inż. Damiana Kiliszka oraz dopuszczenie jej do dalszych czynności w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora i publicznej obrony.

*Tomasz Diwon*