

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**Pana mgr inż. Jakuba KALITY**

**pt: „Analysis of factors that influence the quality  
of Precise Point Positioning method”**

Podstawą formalno-prawną sporządzenia recenzji jest pismo dr hab. inż. Jacka Rapińskiego, prodziekana Wydziału Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie z dnia 15 maja 2017 roku (sygnatura WGIPB-DZ.6350.9.2014) o powołaniu na recenzenta zgodnie z treścią Uchwały nr 129 Rady Wydziału Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa Uniwersytetu UWM z dnia 9 maja 2017 roku. Recenzja została sporządzona zgodnie z następującymi aktami prawnymi:

- Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595 z późn. zm.; tekst ujednoczony na podstawie Dz. U. z 2016 r. poz. 882, 1311, z 2017 r. poz. 859), zwana dalej „ustawą”
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U. 2016 poz. 1586), nazwane dalej „rozporządzeniem”.

Ocena rozprawy doktorskiej została przeprowadzona ze szczególnym uwzględnieniem Art. 13 ustawy, który mówi, że „Rozprawa doktorska, przygotowywana pod opieką promotora albo pod opieką promotora i promotora pomocniczego, powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne, lub oryginalne dokonanie artystyczne, oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej lub artystycznej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej” oraz § 6. pkt. 4. rozporządzenia, który mówi, że „Recenzja zawiera szczegółowo uzasadnioną ocenę spełniania przez rozprawę doktorską warunków określonych w art. 13 ust. 1 ustawy”.

## Przedmiot i cel rozprawy

Głównym celem rozprawy jest analiza czynników wpływających na jakość pozycjonowania z wykorzystaniem techniki Precise Point Positioning (PPP). Autor w pracy postawił następującą tezę: „wykorzystanie właściwego modelu, trybu przetwarzania oraz wartości początkowych parametrów w trakcie przetwarzania jest bardziej wydajne niż użycie standardowej, zazwyczaj stosowanej konfiguracji przetwarzania danych obserwacyjnych metodą PPP, polepszając wynikową pozycję zarówno w początkowym okresie pozycjonowania jak i po osiągnięciu wysokiego poziomu zbieżności.” Rozprawa dotyczy ponadto zagadnień związanych z modelowaniem efektów wpływających na obserwacje, typów parametrów użytych podczas przetwarzania, analizy deformacji skorupy ziemskiej związanych z ruchami pływowymi oceanów, opóźnień sygnału mikrofalowego przy przejściu przez niezjonizowaną część atmosfery oraz szczególnych aspektów związanych z zegarami odbiorników GNSS. Przeprowadzone testy bazują na własnych modyfikacjach oprogramowania gLab z wykorzystaniem parametrów początkowych i stosowanego modelu oceny jakości obserwacji.

## Struktura rozprawy

Rozprawa doktorska posiada formę maszynopisu książki, sporządzonej w całości w języku angielskim ze streszczeniem w języku polskim i angielskim, spisanej na 183 stronach (wraz z streszczeniami, wykazem tabel, rysunków, kodów źródłowych i referencji). Praca składa się z dziesięciu rozdziałów, przy czym ostatni rozdział zawiera podsumowanie rozprawy. Rozdział wprowadzający „Introduction” (bez numeracji) nakreśla istotę pozycjonowania GNSS z wykorzystaniem techniki PPP oraz definiuje cele i motywację przeprowadzonych badań naukowych. Rozdziały 1 „Observation equations and functional model” i 2 „Overview of Factors That Influence the Precise Point Positioning Method” wprowadzają podstawowe równania obserwacyjne oraz strukturę modelu funkcjonalnego stosowanego w PPP. Następnie autor omawia czynniki mające wpływ na pozycjonowanie techniką PPP w odniesieniu do efektów mających swoje źródło po stronie czynników satelitarnych, propagacyjnych i odbiorczych. Kolejna część pracy, w szczególności rozdziały 3 „Precise Point Positioning Kalman filtering”, 4 „Evaluation of PPP method” i 5 „Own implementation of PPP Kalman filter”, wprowadzają teoretyczne i praktyczne aspekty wykorzystania filtru Kalmana do przetwarzania danych GNSS przy użyciu techniki PPP. Filtr Kalmana PPP został zaimplementowany przez Autora w pakiecie typu *open source* programu gLAB. Rozwiązania z wykorzystaniem techniki PPP, wliczając w to elementy oceny rozwiązania, takie jak wariancja i korelacja między parametrami, a także rozkład rezyduów oraz pozycjonowanie w trybie statycznym i kinematycznym zostały omówione oraz przedstawione na wybranych przykładowych stacjach GNSS. W rozdziale 6 „Impact of site displacement based on the Ocean Tides Loading effect” została przeprowadzona analiza wpływu deformacji skorupy ziemskiej spowodowanych obciążeniami pływowymi mas oceanicznych oraz jej wpływ na pozycjonowanie PPP na stacji GUAM oraz BOR1. Różnice w wynikach PPP dla różnych modeli opóźnienia troposferycznego, w tym MOPS, GPT2w i VMF1, zostały zbadane w rozdziale 7 „Impact of tropospheric delay”. Wyniki zostały porównane z produktami IGS. Główny nacisk badań w tym rozdziale został położony na przedstawienie wpływu

wykorzystania modelu troposferycznego na poprawę i przyspieszenie zbieżności rozwiązania PPP. Rozdział 8 „Tropospheric prediction for real-time PPP” zawiera omówienie możliwości przewidywania opóźnienia troposferycznego, które potencjalnie może być wykorzystane w pozycjonowaniu w czasie rzeczywistym. Oceniono m.in. jakość predykcji modelu VMF1 oraz przeprowadzono analizę predykcji opóźnienia troposferycznego przy użyciu metody Auto-Regressive Moving-Average (ARMA). Ostatni rozdział „Phase residual-based receiver clock correction” (rozdział 9) zawiera analizę wpływu zegara odbiornika na wyniki pozycjonowania PPP w trybie kinematycznym. Autor zaproponował wykorzystanie różnicy rezyduów fazy nośnej obserwacji GNSS w celu wyeliminowania podejścia czysto stochastycznego w parametrze zegara odbiornika na rzecz podejścia uwzględniającego błądzenie losowe tegoż parametru. Rozprawa kończy się konkluzjami oraz spisem bardzo obszernej i aktualnej literatury przedmiotu.

### Uwagi szczegółowe

W mojej ocenie tytuł został niezbyt trafnie sformułowany. PPP może być uważana jako *strategia obliczeniowa* albo *technika* przetwarzania danych GNSS, nie zaś jako *metoda*. Dlatego też tytuł rozprawy powinien brzmieć „Analiza czynników wpływających na jakość pozycjonowania z wykorzystaniem techniki Precise Point Positioning”.

W pracy występują drobne błędy językowe, takie jak: „ANETX” (str. 18), słowo „Sun” pisane raz od wielkiej, raz od małej litery, „upto” (str. 16), tytuł podrozdziału 2.2.1.2 „Troposphere” (str. 24), „ /A” (str. 31) powinno być „C/A”, „recursivness” (str. 50) powinno być „recursiveness”, „ismodeled” (str. 120), „unhomogenity” (str. 43) powinno być „inhomogeneity”. Nazwa podrozdziału 2.3.2.1 „Solid tides loading” powinna brzmieć „Solid Earth tides” albo „Loading of solid Earth tides”.

W rozdziale 2 wykorzystano nieprawidłowy układ do definicji poprawek offsetów anten na pokładzie satelitów GNSS. Na rysunku 2.1. posłużono się poprawkami w kierunku północnym, wschodnim i wysokościowym, a w treści rozprawy stwierdzono błędnie, iż „using solar panels means that they should point towards the Sun so that the  $y$ -axis of the body-fixed reference frame of a satellite is perpendicular to the direction of the sun and the  $x$ -axis is directed towards the Sun”. Standardowo (według konwencji IGS) przyjmuje się następującą definicję kierunków osi na satelicie (dotyczy to korpusu satelity):

- oś Z – zawsze skierowana w stronę środka ciężkości masy Ziemi,
- oś Y – leżąca wzdłuż głównej osi paneli słonecznych,
- oś X – prostopadła do osi Z i Y, tworząca układ kartezjański prawoskrętny oraz skierowana do półkuli, w której znajduje się Słońce względem płaszczyzny orbity.

Na potrzeby modelowania wpływu ciśnienia słonecznego na satelity GNSS orbitujące w trybie yaw-steering stosuje się następujący układ:

- oś D – skierowana do Słońca,
- oś Y - leżąca wzdłuż głównej osi paneli słonecznych oraz prostopadła do D,

- oś B – prostopadła do osi D i Y, tworząca układ kartezjański prawoskrętny oraz skierowana do półkuli, w której znajduje się Słońce względem płaszczyzny orbity.

W przypadku nowych systemów GNSS, takich jak GLONASS, BeiDou i Galileo, definicje orientacji i zwrotu osi mogą się różnić. Jednak IGS zaleca stosowanie konwencji przyjętych dla pierwszych bloków satelitów GPS. Stosowanie zatem kierunków typu północny, wschodni oraz wysokościowy nie ma żadnego zastosowania w przypadku satelitów GNSS, gdyż ich orientacja względem kierunków świata się zmienia w trakcie ruchu satelity po orbicie. Również nieprawdziwym jest stwierdzenie, iż oś X satelity jest skierowana do Słońca (strona 16 rozprawy). Żadna spośród osi korpusu satelity nie jest tak skierowana. Układ względem pozycji Słońca jest stosowany jedynie w obliczeniach, mających na celu uwzględnienie wpływu działania ciśnienia słonecznego na satelity GNSS. Dotyczy to w szczególności modeli empirycznych typu ECOM, w których prawidłowa definicja kierunków orbitalnych oraz definicja zbioru parametrów, które mają być estymowane, stanowi kluczowy aspekt w procesie prawidłowego wyznaczenia orbity precyzyjnej.

Na rysunku 2.2 oraz w treści rozprawy stosuje się stwierdzenie „GLONASS Block M”. Tymczasem satelity systemu GLONASS nie dzielą się na bloki - tak jak w przypadku satelitów GPS - tylko na typy.

Równanie 1.2 zawiera podwójny znak „+ +”.

Na stronie 18 stwierdzono, że maksymalny kąt nadirowy dla satelitów GPS wynosi  $17^\circ$ . Tymczasem dla odbiorników znajdujących się na powierzchni Ziemi wynosi on  $14^\circ$ . Zwiększenie wartości do  $17^\circ$  wynikało z potrzeby uwzględnienia zwiększonych kątów nadirowych przy śledzeniu satelitów GNSS przez satelity niskoorbitujące, takie jak Jason-2. Zważywszy na fakt, iż w przyszłości wyżej orbitujące satelity mogą również śledzić sygnał GNSS, wartość  $17^\circ$  zostanie przekroczona.

Na stronie 24 stwierdzono, iż „The troposphere is a non-dispersive medium, and thus propagation of the signal passing through this layer does not depend on the frequency of the signal”. Takie stwierdzenie nie do końca jest precyzyjne, ponieważ dotyczy sygnałów jedynie z zakresu radiowego i mikrofalowego. Natomiast w zakresie podczerwieni oraz fal widzialnych, troposfera staje się ośrodkiem dyspersyjnym, przez co opóźnienie sygnału jest zależne od częstotliwości fali nośnej.

W równaniu 2.31 użyto symboli  $a$  i  $b$ , które oznaczają współczynniki funkcji odwzorowującej opóźnienia troposferycznego. Te same symbole  $a$  i  $b$  zostały użyte również w równaniu 2.24, gdzie oznaczają współczynniki definiujące kombinację liniową wolną od opóźnienia jonosferycznego pierwszego rzędu, tzw. ‘ionosphere-free’. W Tabeli 7.4 symbole  $a$  i  $b$  są używane jako parametry regresji liniowej. Potrójna definicja z użyciem dokładnie tych samych symboli stanowi nieścisłość w nazewnictwie oraz może powodować nieprawidłową interpretację, gdy w dalszych częściach rozprawy omawiane są poszczególne współczynniki.

Na stronie 25 stwierdzono, że „The approximation of mapping by  $1/\sin$  gives the factor of 1 at zenith and about 11 at  $50^\circ$  elevation. Assuming a maximal ZTD of 2.9 m, the tropospheric correction for observation to satellite at  $50^\circ$  is about 33 m”. Tymczasem taka aproksymacja dla kąta elewacji  $50^\circ$  daje

współczynnik 1.3, który przekłada się na maksymalną wartość ukośnego opóźnienia troposferycznego równego 3.8 m, a nie jak stwierdzono w pracy 33 m. Wartości podane w pracy dotyczą kąta elewacji 5°, a nie 50°.

Wzór 2.43 przedstawia bardzo przybliżoną transformację, która uwzględnia jedynie rotację wokół osi Z. Takie podejście jest zazwyczaj wystarczające w przypadku rozwiązania nawigacyjnego GNSS. Jednakże w przypadku pozycjonowania precyzyjnego należy stosować pełną transformację, najlepiej zgodną z zapisami Konwencji IERS 2010.

Na stronie 30 podano, że efekt relatywistyczny dla satelitów GNSS wynosi do 13 m. Ta wartość odnosi się tylko do satelitów GPS, które poruszają się na orbitach zbliżonych do orbit kołowych. W przypadku satelity QZSS oraz satelitów Galileo wyniesionych na orbity mimośrodowe, wartość iloczynu skalarnego wektora pozycji i prędkości satelity ze wzoru 2.45 jest wielokrotnie większa.

Tabela 2.4, zawierająca budżet błędów w rozwiązaniach GNSS, zawiera tak naprawdę opis budżetu błędów rozwiązań GPS. Niektóre błędy, takie jak efemerydy IGS, osiągają wielkość 2.5 cm tylko dla systemu GPS. W przypadku nowych systemów: Galileo, BeiDou, QZSS, wymienione błędy są znacząco większe. Ponadto przyjęto, że szum rozwiązań „ionosphere-free” wynosi 1.5 cm. Biorąc pod uwagę szum obserwacji fazowych na poziomie 1-2 mm oraz około trzykrotne zwiększenie szumu związane z tworzeniem kombinacji liniowej ‘ionosphere-free’, błąd ten powinien być w zakresie 3-6 mm.

Na stronie 43 znajduje się sformułowanie: „Ideally, the constellation geometry should be repeated daily, with a small shift of about 4 minutes. However, due to perturbations caused by the unhomogeneity of the Earth's gravity field and attraction of the sun, moon and other planets as well as solar radiation pressure and atmospheric drag, the period changes. In 24 hours, the satellites complete two encirclements and Earth one, so that the constellation geometry repeats itself”. Wymienione perturbacje nieznacznie (albo wcale) zmieniają okres obiegu satelity, ponieważ powodują w większości perturbacje krótkookresowe i długookresowe, a nie przyczyniają się do powstania perturbacji wiekowych (za wyjątkiem strefowych harmonicznych sferycznych potencjału grawitacyjnego Ziemi stopnia parzystego  $C_{2n,0}$ , które powodują bezpośrednio zmianę wiekową okresu obiegu satelity). Wymienione perturbacje wpływają głównie na zmiany niektórych oskulacyjnych parametrów Keplerowskich orbity, ale nie przyczyniają się do perturbacji wiekowych ruchu średniego satelity, który jest związany z okresem obiegu. W rzeczywistości w ciągu 12 godzin konstelacja satelitów GPS powtarza się w układzie ziemskim, natomiast w układzie inercyjnym, w którym orbitują satelity, okres obiegu jest o około 2 minuty krótszy (system GPS został tak zaprojektowany).

W tabeli 4.2. podano długość interwału „4h”, jednakże z treści wynika, że raczej powinno być „24h”.

Strony 69-73 zawierają dużo stosunkowo prostych kodów źródłowych, opisujących m.in. skrypty do pobierania plików z obserwacjami. Napisanie skryptów tego typu stanowi co najwyżej krok pośredni w badaniach oraz jest rozwiązaniem czysto technicznym. Dlatego może dziwić zamieszczenie tego typu

kodów w treści pracy. Kody źródłowe mogą być zamieszczone w formie załącznika albo na płycie CD, celem weryfikacji działania. Niestety źródło nie zostało dostarczone przez autora na nośniku cyfrowym.

Rysunek 4.5 i 4.6 przedstawia te same dane, co tabela 4.6.

Tabela 5.18 i 5.19 zawiera współczynniki korelacji pomiędzy estymowanymi parametrami. Zamiast układu geocentrycznego XYZ do weryfikacji poziomu korelacji lepiej wykorzystać układ topocentryczny lokalny *North East Up*. W układzie lokalnym znacznie lepiej można przeprowadzić analizy korelacji składowej wysokościowej współrzędnych stacji *Up* oraz parametru zegara i opóźnienia troposferycznego w kierunku zenitu.

W testach dotyczących wpływu modelowania deformacji skorupy ziemskiej ze względu na obciążenia pływowych części mas oceanów (OTL) począwszy od str. 112, warto byłoby przeanalizować wpływ tychże poprawek nie tylko na współrzędne stacji, ale na inne estymowane parametry (parametr poprawki zegara oraz opóźnienie troposferyczne). Taka analiza pozwoli na wyciągnięcie wniosku, jaka część niemodelowanych wpływów deformacji skorupy ziemskiej ze względu na obciążenia pływowych części mas oceanów jest absorbowana przez współrzędne stacji, a jaka przez inne parametry.

W rozdziale 7 to samo rozwiązanie przyjmuje 3 różne nazwy „Simple” (str. 123), „ZERO-WET” (tabela 7.1) oraz „WET” (tabela 7.2). Stanowi to pewną niekonsekwencję w nazewnictwie oraz utrudnia interpretację wyników. Ponadto dobór barw na rys. 7.3 został wykonany dość niefortunnie, przez co nie można rozróżnić rozwiązania „VMF1” od „MOPS”.

W tabeli 7.4 brakuje jednostek przy parametrach regresji liniowej  $a$  i  $b$ , natomiast jednostki błędów  $m_a$  są podane nieprawidłowo (jest [m], powinno być [m/m]).

Rysunek 8.1 zawiera nieprawidłowe opisy osi. Na osi pionowej brakuje jednostki, natomiast oś pozioma odnosi się prawdopodobnie do okresu, a nie jak podano do częstotliwości.

Rozdział 9 zawiera oryginalną propozycję estymacji poprawek zegara odbiornika, nie jako parametru w pełni stochastycznego, ale z uwzględnieniem błędzenia losowego. Autor słusznie zauważa ograniczenia tego podejścia (odbiornik musi być w spoczynku). Jednakże przedstawiona metoda jest bardzo ciekawa, dlatego też testy propozycji algorytmu powinny zostać przeprowadzone na większej liczbie stacji, a nie tylko BOR1.

## Ocena merytoryczna i konkluzja

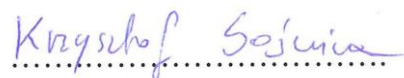
Autor skupił się na wielu aspektach dotyczących błędów pozycjonowania z wykorzystaniem techniki PPP, dzięki czemu praca porusza bardzo szerokie spektrum czynników, zaczynając od deformacji skorupy ziemskiej ze względu na pływy oceaniczne, poprzez modelowanie opóźnienia troposferycznego, a na stabilności zegarów odbiornika kończąc. Tak szeroko zakrojone badania nie pozwoliły na pełną koncentrację na wybranych aspektach. Przykładowo, wyniki z tabeli 7.4 zostały jedynie pobieżnie skomentowane w treści rozprawy, a przydałaby się wnikliwa dyskusja nad nimi, z odpowiednim

odniesieniem do literatury, zważywszy na fakt, iż np. parametr regresji liniowej pomiędzy składową wysokością stacji a VMF1 wyniósł nieco więcej (prawie -5 m/m), niż zazwyczaj przyjmuje się w literaturze (około -3 m/m). Zdaniem recenzenta warto byłoby skupić się na wybranych aspektach błędów w pozycjonowaniu PPP, dostarczając tym samym wyników przesuwających aktualną granicę wiedzy, zamiast próbować analizować wszystkie możliwe aspekty związane z pozycjonowaniem PPP. Ponadto teza rozprawy została sformułowana w taki sposób, że w zasadzie zawsze będzie prawdziwa.

Podstawowym mankamentem pracy jest przeprowadzenie testów numerycznych na niewielkich zbiorach danych – zazwyczaj są to 1-2 wybrane stacje GNSS, rzadko te same w różnych rozdziałach – przez co nie można mówić o reprezentatywnej grupie statystycznej stacji testowych. Często analizowane szeregi czasowe są dość krótkie. Wyjątek stanowią analizy z podrozdziału 5.4, gdzie wzięto pod uwagę dane z całego roku, dzięki czemu można było przedstawić na rys. 5.13 statystyczne ujęcie reprezentacyjnej liczby rozwiązań.

Pomimo powyższych mankamentów, Autor rozprawy zdecydowanie udowodnił swoją umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a przedstawiona praca wykazuje zarówno wiedzę teoretyczną, jak i wiedzę praktyczną z zakresu pozycjonowania GNSS. Ponadto zaproponowany algorytm z rozdziału 9, pomimo swoich ograniczeń, stanowi zdecydowanie oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Implementacje opisane w rozdziale 5 stanowią natomiast rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie technologiczne (pozycjonowanie z wykorzystaniem filtra Kalmana). Dlatego też rozprawę doktorską można ocenić **pozytywnie**. Tym samym zostają **spełnione wymagania wynikające z art. 13 ustawy** stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora.

Niniejszym stwierdzam, iż przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie technologiczne oraz wskazuje na ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie *geodezja i kartografia* oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedstawiona rozprawa spełnia zatem wymagania wynikające z Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595 z późn. zm.) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U. 2016 poz. 1586). Tym samym składam wnioski do Przewodniczącego Rady Wydziału Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie o dopuszczenie kandydata do dalszych czynności w przewodzie doktorskim, w tym do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

  
.....  
dr hab. inż. Krzysztof Sośnica