

Warszawa, dnia 24 maja 2021 r.

prof. dr hab. Jolanta Nastula
Centrum Badań Kosmicznych PAN

Recenzja rozprawy doktorskiej pt.:

„Short period variations of Earth Rotation from measurements made by Ring Laser Gyroscopes”.

Autor: mgr inż. Monika Tercjak

Promotor: prof. dr hab. Aleksander Brzeziński

Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Rajner

1. Podstawy opracowania recenzji

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie prof. dr. hab. inż. Konrada Lewczuka, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport na Politechnice Warszawskiej (pismo nr RNDILiT/37/2021 z dnia 22.03.2021 r.), realizującego uchwałę Rady Naukowej Dyscypliny ILiT PW z dnia 02.03.2021 r.

Celem recenzji jest ustalenie czy rozprawa spełnia wymogi określone w art. 13 ust. 1. Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. nr 65. poz. 595 z późn. zm.) w związku z art. 179 ustawy z dnia 3 lipca 2018 roku przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669).

2. Ogólna charakterystyka tematyki i rozprawy

Przedłożona rozprawa dotyczy ważnego i ciągle aktualnego w geodezji i geodynamice problemu, jakim jest wyznaczenie parametrów wektora orientacji Ziemi. Znajomość tych parametrów to niezbędny element transformacji współrzędnych z niebieskiego układu odniesienia do ziemskiego układu odniesienia i odwrotnie. Transformacja ta jest kluczowa dla precyzyjnego pozycjonowania i nawigacji obiektów znajdujących się zarówno na powierzchni Ziemi, jak i w przestrzeni kosmicznej. Zmiany rozkładu mas ziemskich ośrodków ciekłych i gazowych, to jest atmosfery, oceanów, hydrosfery lądowej i kriosfery, powodują zaburzenia wektora orientacji Ziemi. Zagadnienie jest skomplikowane na tyle, że do dziś nie opracowano analitycznego modelu tych zmian. Prowadzone od kilkadziesiąt lat międzynarodowe badania skupiające się na oszacowaniu i modelowaniu wpływu ośrodków ciekłych na ruch nie doprowadziły do całkowitego wyjaśnienia problemu. Wyznaczanie wektora orientacji naszej planety, a także interpretacja geofizyczna jego zaburzeń, jest niezwykle ważnym, ale i trudnym zadaniem.

Doktorantka w rozprawie podejmuje nowatorskie, wręcz pionierskie, zagadnienie możliwości wykorzystania unikatowych instrumentów - pierścieniowych żyroskopów laserowych (ang. Ring Laser-Gyroscope RLG) do wyznaczania elementów wektora rotacji Ziemi, w szczególności zmian tego wektora o dobowym i subdobowym zakresie.

RLG to wykorzystujące relatywistyczny efekt Sagnaca, wrażliwe na zmiany chwilowego wektora rotacji urządzenia. Co jest szczególnie istotne, instrumenty te pozwalają na pomiar wektora rotacji Ziemi w czasie rzeczywistym bez konieczności stosowania żadnego zewnętrznego systemu odniesienia, dlatego mogłyby stanowić dobre uzupełnienie stosowanych we współczesnej geodezji technik obserwacyjnych. Potencjalne zastosowanie tych urządzeń do determinacji parametrów ruchu obrotowego Ziemi było dyskutowane przez środowisko międzynarodowe od ponad 20-tu lat. Dla celów geodynamicznych potrzebna jest dokładność względna na poziomie co najmniej 10^{-8} , co wymaga specjalnej konstrukcji instrumentu, a także odpowiedniej procedury analizy obserwacji. Doktorantka w rozprawie wykorzystuje obserwacje pochodzące z dwóch żyroskopów laserowych (ang. Ring Laser Gyroscope, RLG) znajdujących się w Niemczech: G-ring w Obserwatorium Geodezyjnym w Wettzel oraz ROMY w Obserwatorium Geomagnetycznym we Furstenfeldbruck w regionie Monachium. Żyroskop z Wettzel to urządzenie o kształcie kwadratu z 4-metrowymi ramionami i płytą bazową typu Zerodur, która jest uważana za najbardziej stabilną wśród obecnie używanych. Drugi instrument, ROMY (ROtational Motions in SejsmoligY), ma kształt czworościanu i składa się z czterech niezależnych trójkątnych sensorów, z czego trzy o długości ramienia 12 metrów są nachylone.

Problem weryfikacji użyteczności obserwacji żyroskopowych w wyznaczeniu ruchu obrotowego, którego rozwiązania podejmuje się Doktorantka, jest istotny zarówno z naukowego interpretacji i modelowania tego ruchu jak i praktycznego punktu widzenia, włączenia pierścieniowych laserów żyroskopowych do współczesnych technik obserwacyjnych i opracowania bilansu błędów tej nowej techniki.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa ma formę cyklu czterech publikacji wraz z przewodnikiem przygotowanych w języku angielskim:

[A] Tercjak, M., J Böhm, A. Brzeziński, A. Gebauer, T. Klügel, U. Schreiber and M. Schindelegger (2015), **Estimation of nutation rates from combination of ring laser and VLBI data**. *Proceedings of the Journées 2014, Systèmes de Référence Spatio-Temporels*, Ed. Z. Malkin and N. Capitaine, pp. 167-170. [google scholar (gs): 3cyt.].

[B] Tercjak, M., A. Brzeziński (2017). **On the Influence of Known Diurnal and Subdiurnal Signals in Polar Motion and UT1 on Ring Laser Gyroscope Observations.**

Pure and Applied Geophysics, 174, pp. 2719-2731, ISSN: 1420-9136, DOI: 10.1007/s00024-017-1552, (Lista A, 25 pkt.) [Web of Science (WOS):7cyt., gs:10cyt.].

[C] Tercjak, M., A. Gebauer, M. Rajner, A. Brzeziński and K.U. Schreiber (2020), **On the influence of Diurnal and Subdiurnal Signals in the Normal Vector on Large Ring Laser Gyroscope Observations.** *Pure and Applied Geophysics*, 177, pp. 4217-4228, ISSN: 1420-9136, DOI:10.1007/s00024-020-02484-2, [Lista A, 70 pkt), [(WOS):1cyt., gs): 1cyt.].

[D] Gebauer, A., M. Tercjak, K.U. Schreiber, H. Igel, J. Kodet, U. Hugentobler, J. Wassermann, F. Bernauer, C.-J. Lin, S. Donner, S. Egdorf, A. Simonelli, and J.-P. R. Wells (2020), **Reconstruction of the Instantaneous Earth Rotation Vector with Sub-Arcsecond Resolution Using a Large-Scale Ring Laser Array.** *Phys. Rev. Lett.* 125(3), pp 033605. DOI:10.1103/PhysRevLett.125.033605, (Lista Ministerstwa, 200 pkt.) [WOS:10 cyt., gs:12 cyt.].

Do wszystkich prac dołączono oświadczenia opisujące wkład Doktorantki i współautorów.

Przewodnik zawiera dokładny opis najważniejszych elementów publikacji wchodzących w skład cyklu. Przedstawiony materiał jasno pokazuje, że publikacje cyklu są powiązane tematycznie. Pozycje [A], [B] i [C] zawierają wyniki otrzymane z wykorzystaniem żyroskopu G-Ring a [D] opisuje analizę możliwości wykorzystania do badań żyroskopu Romy.

W trzech pracach [A, B, C] współautorem jest promotor rozprawy prof. dr hab. Aleksander Brzeziński. W tych trzech pracach Doktorantka jest pierwszym autorem, a w czwartej drugim. Prace [B, C, D] zostały opublikowane w czasopismach z listy Ministerstwa.

Pierwsza praca ukazała się w materiałach konferencji Journées Systèmes de Référence Spatio-Temporels, niemających sygnatury doi. Należy jednak podkreślić, że wspomniana konferencja od kilkudziesięciu lat jest forum wymiany wiedzy w międzynarodowym środowisku astronomów i geodetów o olbrzymim znaczeniu opiniotwórczym.

Ostatnia praca, której doktorantka jest drugim autorem, została opublikowana w prestiżowym czasopiśmie Physical Review Letters i dodatkowo wyróżniona oznaczeniami Editors Suggestion oraz Featured in Physics.

4. Ocena merytoryczna i uwagi krytyczne

W streszczeniu osiągnięć badawczych, będącym pierwszą częścią rozprawy, Doktorantka w sposób jasny przedstawia tematykę, strukturę pracy i chronologię badań.

W przewodniku skrupulatnie opisuje metody badawcze i publikacje składające się na cykl. W rozdziale „Introduction” Doktorantka przedstawia krótkie wprowadzenie do zagadnienia obserwacji i interpretacji Ruchu obrotowego Ziemi.

W rozdziale „Main thesis and importance of the work” przewodnika przedstawione są naukowe powody podjęcia tematyki wykorzystania instrumentów RLG w geodezji oraz teza pracy. Doktorantka wyjaśnia między innymi, że główną zaletą zastosowania instrumentów RLG, jako źródła obserwacji wektora orientacji Ziemi, jest możliwość wyznaczenia bezwzględnych parametrów tego wektora. Inne współczesne, geodezyjne techniki obserwacyjne pozwalają na obserwacje względnego ruchu Niebieskiego i Ziemijskiego Układów współrzędnych. Ograniczeniem techniki RLG jest jednak utrzymanie długoterminowej stabilizacji przyrządu. Doktorantka, między innymi z tego powodu, formułuje hipotezę, że obserwacje RLG można między innymi wykorzystać do zwiększenia rozdzielczości czasowej z jednego dnia do kilku godzin w rutynowych wyznaczeniach parametrów orientacji Ziemi. Wspomniane ograniczenie techniki RLG jest przyczyną skupienia, podjętych w rozprawie prac na analizie zmian wektora orientacji Ziemi o okresach poniżej dwóch dni. W końcu rozdziału “Main thesis and importance of the work” zostaje postawiona hipoteza niniejszej rozprawy, a mianowicie “regular Ring Laser Gyroscope observations can be used to increase the time resolution, from one day to a couple of hours, of routine determination of the Earth orientation parameters”.

Rozdział „Method and data” Doktorantka rozpoczyna od charakterystyki wykorzystywanych dwu instrumentów żyroskopowych RLG, podaje definicję częstości Sagnaca oraz omawia równanie ruchu Chwilowego Bieguna Rotacji (ang. Instantaneous Rotation Pole – IRP).

Podrozdziały „Data and solutions” i „Results” zawierają szczegółowy przegląd badań, metod, danych i rezultatów w poszczególnych pracach cyklu.

W pracy [A] Doktorantka rozpoczyna badania od weryfikacji użyteczności obserwacji żyroskopowych do wyznaczenia prędkości zmian nutacji. Praca zawiera zarówno wyniki wykorzystujące obserwacje z jednego instrumentu jak i symulacje wyniku na podstawie obserwacji pochodzących z kilku instrumentów oraz kombinacje symulowanych obserwacji żyroskopowych z obserwacjami pochodzącymi z techniki interferometrii długi baz (ang. Very Long Baseline Interferometry). Wykazuje w niej, że oszacowanie szybkości nutacji na podstawie obserwacji lasera pierścieniowego jest generalnie możliwe. Jednak porównanie symulacji z danymi z prawdziwego lasera pierścieniowego pokazuje, że dokładność obserwacji RLG nie jest jeszcze wystarczająca. Doktorantka sugeruje rozwiązanie problemu - potrzeba co najmniej trzech instrumentów RLG i dokładności na poziomie trzech rzędów wielkości większej niż obecna. Doktorantka jednocześnie sugeruje, że przyczyną negatywnego wyniku mogło być zastosowanie w przeprowadzonych symulacjach bardzo prostego modelu względnej częstotliwości Sagnaca, uwzględnienie tylko aspektu geometrycznego lokalizacji przyrządu bez uwzględnienia efektów lokalnych. Ze względu na

wyniki pracy [A], w następnych Doktorantka koncentruje się na analizie efektów zmian ruchu bieguna i dUT1.

Doktorantka w pracy [B] podejmuje kolejny, niezbędny do wyjaśnienia postawionej hipotezy temat. Przedstawia wstępną analizę możliwości wykorzystania obserwacji RLG do monitorowania dobowych i subdobowych sygnałów w parametrach ruchu obrotowego Ziemi. Praca nie zawiera analizy rzeczywistego sygnału. Przedstawia natomiast modelowe analizy wpływu znanych współcześnie dobowych i półdobowych zjawisk w ruchu bieguna i UT1 na obserwacje RLG (takich jak: dobowy ruch bieguna, dobowe i półdobowe pływy oceaniczne w ruchu bieguna i UT1, libracje). Dodatkowo, ponieważ obserwacje RLG zależą od orientacji normalnego wektora instrumentu względem chwilowego wektora rotacji Ziemi, praca zawiera symulacje wpływu zmiany położenia instrumentu. Istotnym rezultatem jest stwierdzenie, że dobowy ruch bieguna powodowany przez grawitacyjne oddziaływanie Księżyca i Słońca jest zjawiskiem dominującym w obserwacjach RLG. W dalszych, pogłębionych analizach częstotliwości Sagnaca należałoby uwzględnić dobowe i półdobowe oceaniczne pływowe sygnały w ruchu bieguna i UT1. Efekty libracji mogą być trudne do wykrycia na obecnym poziomie dokładności RLG.

Kolejnym ważnym wnioskiem płynącym z przedstawionych w pracy [B] symulacji jest stwierdzenie, że lokalizacja instrumentu RLG również ma wpływ na częstotliwość Sagnaca. Rozwiązaniem tego problemu mogłoby być umieszczenie w tej samej lokalizacji kilku instrumentów o różnej orientacji. Takie rozwiązanie dodatkowo ułatwiłoby identyfikację i modelowanie lokalnych efektów zaburzających obserwacje.

Następnym krokiem podjętym przez Doktorantkę jest uzupełnienie przeprowadzonych symulacji analizami sygnału rzeczywistego. Doktorantka na tym etapie analiz stawia kolejne zadanie - separacji w obserwacjach RLG wpływu dobowych zmian ruchu bieguna i UT1 od efektów zmian lokalnych. Badania opisane w artykule [C] pokazują, w jaki sposób lokalne zaburzenia, takie jak pływy ziemi stałej, pływy oceaniczne, niepływowe efekty obciążeniowe ze strony atmosfery i wód lądowych, wpływają na zmiany orientacji wektora normalnego RLG, a tym samym na obserwowaną przez urządzenie częstotliwość Sagnaca. Na uwagę zasługuje zawarta w pracy [C] skrupulatna analiza porównawcza modeli pływów stałej Ziemi przy wykorzystaniu software ETERNA oraz *s o l i d*, ocena znaczenia wyboru liczb Love w modelach pływów ziemi stałej, porównanie modeli oceanicznych pływowych i niepływowych efektów obciążeniowych. Praca zawiera zarówno model wpływu tych zjawisk na obserwacje wykonane przez RLG jak i porównanie rzeczywistych obserwacji zaburzeń wektora normalnego instrumentu, zarejestrowanych przez znajdujący się w Wettzel pochyłomierz. Uzyskane w pracy [C] wyniki pokazują, że na obecnym poziomie dokładności pływy ziemi stałej i pływy oceaniczne mają znaczący wpływ na obserwacje RLG, wpływ obciążenia wodą lądowa jest mały. Wybór liczb Love'a na obecnym poziomie dokładności nie ma istotnego

znaczenia w modelowaniu wpływu pływów Ziemi stałej w obserwowanym sygnale. Wkład oceanicznych pływowych efektów obciążeniowych do modelu pływów Ziemi stałej, oceniony przez Doktorantkę na 9%, nie zależy istotnie od przyjętego modelu (takiego jak: FES04, DTU10, EOT11A, GOT4p7, HAMTIDE11a, TPZ072, TPX072ATLAS, NOA99b). Wpływ niepływowych zmian ciśnienia atmosferycznego stanowi 6% sygnału pływowego. Dodatkowo Doktorantka wskazuje na znaczące różnice wyniku efektów obciążeniowych w częstotliwości Sagnaca, oszacowanych z modeli atmosferycznych (serwis EOST, ATMACS). Wkład wód lądowych, choć obecnie nie jest istotny w obserwacjach żyroskopowych, lecz jak słusznie zaznacza Doktorantka, może być widoczny w obserwacjach RLG o dłuższych okresach.

Ważne dla dalszych badań jest stwierdzenie, że redukcja sygnałów RLG za pomocą modeli zjawisk lokalnych jest bardziej skuteczna, niż przy użyciu obserwacji z pochylomierzy.

Inny ciekawy wniosek to stwierdzenie, że zarówno orientacja, jak też położenie geograficzne instrumentu mają istotne znaczenie w przypadku omawianych w artykule zjawisk. Dodatkowo, ponieważ lasery pierścieniowe nie są wrażliwe na odchylenia linii pionu, niezbędnym w korekcji obserwacji z tych urządzeń jest rozróżnienie części pochodzącej od geometrycznych deformacji podłoża i grawitacyjnych zmian nachylenia urządzenia. Zagadnienie to jest mało znane w literaturze tematu.

Ostatnia praca [D] opisuje budowę i działanie czteropierścieniowego, czworosiennego lasera żyroskopowego ROMY, który umożliwia wyznaczenie wektora obrotu Ziemi z niezwykłą rozdzielczością poniżej sekundy łuku. Wkład Doktorantki w te nowatorskie badania stanowi część analityczna pracy i realizacja dwóch głównych celów: określenie rzeczywistej orientacji całego systemu ROMY na systemie lokalnym Noth-East-Up (NEU) oraz rekonstrukcja wektora obrotu Ziemi. Doktorantka wykorzystuje procedury opracowane w poprzednich pracach składających się na rozprawę, uzupełnione o obserwacje prędkości obrotowej czterech pierścieni z okresu 6 tygodni.

Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani Moniki Tercjak wypełnia lukę badawczą, jaką jest wykorzystanie urządzeń RLG do analizy zmian orientacji wektora Ziemi. Cykl publikacji przygotowany na potrzeby rozprawy jest ściśle powiązany tematycznie i każdy z artykułów daje przemyślany wkład do postawionej tezy. Badania rozpoczynają się od analizy modelowych sygnałów ruchu obrotowego Ziemi, następną fazą są analizy wektora normalnego urządzenia i na końcu obejmują analizy rzeczywistego sygnału. Wyniki i wnioski z wcześniejszych prac są wykorzystane w pracach późniejszych. Rezultaty przedstawione w cyklu potwierdzają hipotezę rozprawy „that regular Ring Laser Gyroscope observations can be used to increase the time resolution, from one day to a couple of hours, of routine determination of the Earth orientation parameters”.

Uwagi:

Uwaga 1. Doktorantka nie sprecyzowała w streszczeniu załączonym do przewodnika tezy rozprawy, którą zamierza udowodnić. Teza jest co prawda zdefiniowana w Rozdziale 1 przewodnika, ale powinna się znaleźć również w streszczeniu.

Uwaga 2. Doktorantka prawdopodobnie ze względu na ograniczenia objętości przewodnika przedstawiła w rozdziale „Introduction” wprowadzenie do zagadnienia dość skrótowo. Wymienione są kamienie milowe trwającego ponad dwa tysiące lat procesu poznawania ruchu obrotowego Ziemi (odkrycia Hipparchus, Newton Euler, Chandler, intensywne badania w końcu 20. wieku, techniki obserwacyjne). Uważam, że we wprowadzeniu powinna się jednak znaleźć szersza informacja na temat zmian ruchu obrotowego, w szczególności wykrycia i dotychczasowej interpretacji zmian dobowych i subdowych wektora orientacji Ziemi, które są przecież głównym przedmiotem zainteresowania Doktorantki. Ułatwiłoby to ocenę zarówno znaczenia zagadnienia wyznaczania i interpretacji tych zmian jak i skali trudności.

Uwaga 3. We wprowadzeniu nie ma odniesień do podstawowych pozycji literatury z dziedziny, dotyczących tematyki szerszej niż podejmowana w cyklu publikacji składających się na rozprawę. Wykaz publikacji dołączony do przewodnika po rozprawie liczy 16 pozycji i zawiera prace publikowane po roku 1997. Zwyczajowo w rozprawach doktorskich opracowywanych w formie manuskryptu bibliografia powinna zawierać więcej pozycji. Należy jednak uczciwie dodać, że referencje w pracach cyklu liczą 61 niezależnych pozycji i znajdują się tam takie prace jak McClure (1973), Wahr (1981a, 1982b), Brzeziński (1986).

Uwaga 4. W rozdziale „Methods and data” nie ma odniesienia do publikacji nt. krótkookresowych zmian wektora orientacji Earth Orientation Parameters (EOP). Takich pozycji trzeba szukać w poszczególnych pracach cyklu.

Uwaga 5. Analizy sygnałów przeprowadzone zostały tylko dla żyroskopu G-Ring. Czwarta publikacja dotycząca żyroskopu ROMY nie zawiera analiz z tego urządzenia. W rozprawie nie ma wspólnego opracowania obserwacji pochodzących zarówno z ROMY jak i z G-Ring.

Uwaga 6. Trzecia praca [C] przedstawia analizy sygnału rzeczywistego jednak pod kątem rzeczywistych efektów lokalnych - brakuje analizy rzeczywistych sygnałów ruchu obrotowego Ziemi.

5. Rekomendacja

Niezależnie od zamieszczonych uwag stwierdzam, że przedstawione w rozprawie badania stanowią ważne osiągnięcie naukowe Doktorantki i pokazują, że jest ona w stanie samodzielnie podejmować i rozwiązywać nowatorskie zagadnienia badawcze, zarówno w obszarze teoretycznym jak i praktycznym. Cykl publikacji jest spójny tematycznie a kolejność publikacji, tym samym sposób analizy hipotezy badawczej, zasadny. Rozprawa podejmuje ważny temat współczesnej geodezji jakim jest wykorzystanie laserowych żyroskopów pierścieniowych do analizy wektora orientacji Ziemi.

Stwierdzam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska Pani mgr inż. Moniki Tercjak „Short period variations of Earth Rotation from measurements made by Ring Laser Gyroscopes” spełnia warunki określone w art. 13 ust. 1. Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. nr 65. poz. 595 z późn. zm.) w związku z art. 179 ustawy z dnia 3 lipca 2018 roku przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669).

Jednocześnie ze względu na nowatorski charakter, duże znaczenie otrzymanych rezultatów, wysoki poziom publikacji wchodzących w skład cyklu i skrupulatne przedstawienie wyników w załączonym przewodniku wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Warszawskiej o przyznanie wyróżnienia rozprawie doktorskiej Pani mgr inż. Moniki Tercjak.

prof. dr hab. Jolanta Nastula
Centrum Badań Kosmicznych PAN