Prof. dr hab. Iwona Stanisławska
Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk
Bartycka 18a
00-716 Warszawa
stanis@cbk.waw.pl

Warszawa, 31 marzec 2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Fliseka

na temat:

„Monitoring nieregularności jonosferycznych w oparciu o obserwacje astrofizyczne systemem LOFAR”

Tematyka rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy wykorzystania astrofizycznego systemu radioteleskopów w badaniu zjawisk ziemskiej jonosfery. Wybór tematyki pracy uważam za celowy i szczególnie cenny zarówno w aspekcie naukowym jak i aplikacyjnym. Nieregularności jonosferyczne są zjawiskiem krytycznego wpływu na propagację jonosferyczną i trans jonosferyczną czyli np. sygnały GNSS, czy HF. Rozprawa wpisuje się więc w aktualne trendy badań i wnosi wymierne korzyści poznawcze i utylitarne.

Charakterystyka i ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa mgr inż. Pawła Fliska zawiera 101 stron (łącznie z Załącznikiem przedstawiającym oprogramowanie przetwarzającym obserwacje słoneczne i scyntylacji na stacji PL612, streszczenia w j. polskim i j. angielskim, bibliografię i listę akronimów), 73 rysunki oraz 7 tabel. Bibliografia zawiera 46 pozycji, w tym 2 publikacje z udziałem Autora, które zostały poprawnie dobrane do proponowanej tematyki rozprawy. 8 cytowanych pozycji literaturowych jest opublikowane po 2020 roku, co stanowi bardzo dobry wskaźnik udziału najnowszych publikacji do ogólnej liczby pozycji przedstawionej w bibliografii.

Praca ma 5 rozdziałów poprzedzonych Wstępem.

We **Wstępie** przedstawiono fizyczne i techniczne aspekty postawionego problemu z naciskiem na wykorzystywany system LOFAR w relacjach głównie z jonosferą. Opisano także skrótowo zawartość poszczególnych rozdziałów manuskryptu.

Rozdział 1 to szczegółowy opis fal elektromagnetycznych. Jest to teoria będąca podstawą do późniejszej analizy pracy narzędzia LOFAR. Dokładna znajomość zagadnień dotyczących fal radiowych w jonosferze i trans jonosferycznych jest kluczowa w tym przypadku.

LOFAR, jego budowę, obserwacje wykonywane przy pomocy tego narzędzia, dalekie radioźródła, oraz zaburzenia rejestracji przez środowisko tzn. w tym wypadku jonosfery zawarte są w **Rozdziale 2**.

Jonosferze, właśnie jako środowisku propagacji fal z obserwowanych przez LOFAR radioźródeł poświęcony jest **Rozdział 3**. Prezentuje on jonosferę; budowę, powstanie, jej geograficzny i wysokościowy rozkład przestrzenny. Przedstawiono także niejednorodności jonosfery na średnich szerokościach geograficznych. Bardzo szczegółowo opisano klasyczne metody obserwacji zachodzących w jonosferze zmian przy pomocy systemów GNSS. Pomiary sprowadzone zostały do metod otrzymania parametru TEC czyli Total Electron Content z obserwacji kodowych i fazowych, oraz pochodnej ROT czyli Rate of TEC lub ROTI Rate of TEC Index. Nie zauważono istnienia globalnych map TEC i ROTI w czasie niemal rzeczywistym np. w DLR, Australijskim Biurze Meteorologicznym, czy NOAA.

Kolejny **Rozdział 4** to już część astrofizyczna, gdzie dalekie radioźródła takie jak Cassiopea A i Cygnus A obserwowane radioteleskopem LOFAR dostarczają informacji o scyntylacjach sygnału propagującego przez jonosferę z miarą dyspersji S_4. To najważniejszy z rozdziałów przedstawionej mi do recenzji rozprawy, pragnę podkreślić wagę i nowatorstwo opisanych i

przedstawionych w nim wyników. Tu przedstawiona jest jego metodyka postępowania oraz przetwarzania danych celem wyznaczenia indeksu S4 z danych obserwacyjnych LOFAR. Przeprowadzana jest analiza przestrzenna i czasowa.

Meritum rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Fliska to przygotowanie autorskiego, nowatorskiego i kompletnego narzędzia informatycznego dla systemu LOFAR, które jest już stosowane przez europejskie konsorcjum LOFAR ERIC. Jest to bardzo znaczace osoagnięcie Doktoranta. Warte podkreślenia ze opracowana metodologia została już oplikowana w prestiżowym wydawnictwie Journal of Space Weather and Space Climate (Flisek i inni, JSWSC, 2023). Autorskie oprogramowanie w postaci automatycznego „pipeline" po raz pierwszy w historii przygotowuje w czasie rzeczywistym dynamiczne widma indexu scyntylacyjnego - S4 z intererometru LOFAR. Jest to o tyle ważne, że indeks S4 pozwala na zilustrowanie występowania i skali scyntylacji sygnału radiowego nad wszystkimi 52 europejskimi stacjami LOFAR. Przy zaprezentowanej w doktoracie czułości systemu LOFAR na rejestrowane zmiany strumienia radiowego, co uwidacznia niezwykle szczegółowa struktura występujących scyntylacji widoczna w widmach dynamicznych obserwowanych astrofizycznych źródeł, Autor wykazuje jak ważną rolę w badaniach dynamiki jonosfery odgrywa odpowiednio przygotowany pipeline S4, ułatwiający dalszą analizę.

Doktorant w przejrzysty sposób opisuje kompletny proces akwizycji danych radioteleskopem LOFAR i całą ścieżkę przygotowania ich do analizy, także wagę redukcji danych polegającą na usuwaniu zakłóceń i normalizacji. Co bardzo istotne Autor nie ogranicza się do danych z lokalnej stacji LOFAR w Bałdach, ale pokazuje analizę danych z innych stacji systemu LOFAR. Następnie w podrozdziale 4.2 omawia sam proces otrzymywania widm S4, których przykłady pokazuje na rysunku 4.7.

Zdaniem Recenzenta bardzo ważnym procesem jest proces walidacji otrzymanych wyników z systemu LOFAR poprzez dane GNSS. Z uwagi na dostępność danych LOFAR wspólne obserwacje przeprowadzono w dniach 10 kwietnia 2022r, 14 stycznia 2022r, 21 marca 2021r, 3 sierpnia 2020r, 6 sierpnia 2024r z dostępnych w tym czasie stacji LOFAR. Porównywano stan jonosfery z informacji wartości ROTI z map globalnych w konkretnych punktach i S4 z punktu przebicia sygnału LOFAR. Badania i wszelkie obliczenia przeprowadzono z nienaganną i wymagającą uznania starannością. Choć można by było pokusić się na sformułowanie kilku uogólnień czy generalizacji.

Podrozdział 4.3 przedstawia w bardzo skrótowej formie metodykę badania nieregularności obserwowanych w jonosferze, wychodząc od danych obserwacyjnych GNSS i tworzonych na ich podstawie mam ROTI, aż do i ich kombinacji z wartościami indeksu S4 uzyskiwanymi z kilku stacji systemu LOFAR. Ta część jest na tyle ważną, że moim zdaniem powinna być potraktowana nieco bardziej dogłębnie. Dużym plusem jest zaimplementowanie do analizy dynamicznych widm drugiego rzędu. Niestety, w tej części Autor nie pokusił się o bardziej szczegółowe wyjaśnienie znaczenia tych widm i widocznych na nich łuków ponad bardzo lakoniczne stwierdzenie, że pozwalają na wyznaczenie prędkości nieregularności, nie odwołując się do opracowań na ten temat. Rozumiem, że jest to dla doktoranta oczywiste, bo w analizie konkretnych przypadków takie pomiary krzywizn i wyliczenia prędkości przedstawia, ale czuje się pewien dysonans, gdy w rozdziałach 2 i 3 opisane są szeroko pewne oczywiste zjawiska fizyczne, a brakuje opisu znaczenia łuków w widmach dopplerowskich.

Podrozdział 4.4 to już analiza konkretnych przypadków obserwacyjnych pokazujących nie tylko skuteczność działania samego narzędzia, ale też uwypuklających wielkie możliwości. 5 przedstawionych przypadków, gdzie Autor rozprawy wykorzystał możliwości przedstawionego przez siebie narzędzia. W kolejnych epokach pokazane zostały wyniki obserwacyjne uzyskane stacjami systemu LOFAR uzupełnione o dane GNSS. Autor bardzo rzetelnie opisuje wyniki porównania wartości ROTI oraz indeksów S4 i w niektórych sytuacjach dokonuje także interpretacji uzyskanych rezultatów. Szkoda, że nie zostały one bardziej uwypuklone.

Podrozdział 4.5 jest technicznym opisem stworzonego przez doktoranta zintegrowanego oprogramowania, które zostało skutecznie wdrożone i przetestowane w konsorcjum LOFAR ERIC w programie IDOLS (Incremental Development of LOFAR Space Weather). Doktorant przedstawił obok opisu schemat całego pipeline'u oraz wygenerowane dzięki niemu wyniki. Co ważne, z punktu widzenia użytkowania tego narzędzia, całość dostępna jest do obsługi poprzez stronę www, jak przystało na nowoczesne narzędzia informatyczne.

Rozdział 5 rozprawy jest rozwinięciem tezy, że LOFAR jest znakomitym narzędziem nie tylko dla badań radio-astrofizycznych, ale też dla badań nieregularności jonosferycznych, gdzie obiekty astrofizyczne są źródłami sygnału radiowego do próbkowania stanu jonosfery. Autor postanowił wykazać, że także pulsary, mimo swej nieciągłej charakterystyki sygnału, mogą być wykorzystane do sondowania jonosfery, podobnie jak od dawna wykorzystuje się ich sygnał do sondowania zjonizowanej materii międzygwiazdowej. W tym wypadku Autor poprawnie przedstawił sposób rejestracji danych i ich przetwarzania do końcowej postaci jaką są widma

dynamiczne. Najważniejszym faktem w omawianym rozdziale jest występowanie scyntylacji przypominających te z widm Cas A i Cyg A, a obecnych w widmach dynamicznych jasnych pulsarów. Nie budzi raczej wątpliwości natura zaobserwowanych zmian w widmach dynamicznych, jedynie interpretacja wyników z obserwacji symultanicznych wymaga znacznie bogatszego materiału obserwacyjnego, co może nastąpić w najbliższy latach .

W moim przekonaniu cały rozdział 5 jest pewnym dodatkiem do rozdziału 4, uzupełniającym rozprawę, pokazującym jednak niestandardowe i wcześniej niestosowane podejście. Przedstawiona metodologia i wstępne wyniki są na tyle obiecujące, że mogą skutkować stworzeniem kolejnego, niezależnego sposobu sondowania jonosfery i powstaniem prestiżowych publikacji.

Wniosek końcowy

Przedłożona mi do recenzji dysertacja doktorska spełnia wymagania określone w art.187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz. U. 2024.1571 ze zm.) stawiane rozprawom doktorskim.

Reasumując, niezależnie od moich kilku uwag w treści recenzji, ale z podkreśloną rzetelnością i sumiennością, nie mam najmniejszych wątpliwości, że w przedstawionej postaci rozprawa doktorska pana mgr inż. Pawła Fliska spełnia wszelkie wymogi stawiane tego rodzaju opracowaniom. Bez zastrzeżeń, z pełnym przekonaniem, przyjmuję pracę jako podstawę dopuszczenia doktoranta do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Signed by /
Podpisano przez:

Iwona Małgorzata Stanisławska

Date / Data: 2025-04-01 13:52