

dr hab. inż. Jacek Kudrys
AGH w Krakowie

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adama Fronia na temat:
"Serwisy czasu rzeczywistego monitorowania TEC
dla International Reference Ionosphere – IRI"**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Adama Fronia dotyczy opracowania metodologii i praktycznego włączenia jonosferycznych produktów GNSS TEC (Total Electron Content) dostarczanych przez IGS Ionosphere Working Group, do modelu IRI (International Reference Ionosphere). W pracy Autor stawia hipotezę badawczą sformułowaną jako: „asymilacja produktów GNSS VTEC do modelu IRI pozwala na istotną poprawę reprezentacji parametrów klimatologicznych i obserwacyjnych i stwarza nowe możliwości badawcze”.

W ramach przeprowadzonych prac badawczych Doktorant omawia problematykę wyznaczenia profilu wysokościowego gęstości elektronowej w modelu IRI, przedstawia techniczne aspekty wykorzystania wyznaczeń TEC z obserwacji GNSS jako uzupełnienia modelu IRI w kontekście tworzenia modelu w czasie rzeczywistym, a także analizuje jakość map jonosfery utworzonych z uwzględnieniem TEC.

Praca zawarta jest na 116 stronach i zawiera Spis treści, Wprowadzenie, 6 numerowanych rozdziałów, Podsumowanie, Spis rysunków, Spis tabel oraz Bibliografię - 73 pozycje literaturowe i 4 źródła internetowe związane z tematyką pracy, a także Streszczenie w języku polskim i angielskim.

We Wprowadzeniu Autor przedstawia motywację dla podjętych działań badawczych, podaje cel pracy oraz formułuje hipotezę badawczą, a także skrótowo omawia treść całej rozprawy.

W Rozdziale 1 Doktorant, na podstawie literatury podaje bardzo szczegółowy opis globalnego modelu jonosfery IRI. Podaje źródła danych wykorzystane do opracowania modelu, wymagane parametry wejściowe oraz szczegółowo opisuje zależności pozwalające obliczyć gęstość elektronów w poszczególnych warstwach jonosfery.

Rozdział 2 porusza problematykę asymilacji danych obserwacyjnych do modelu IRI. Ponieważ model IRI jest modelem empirycznym, a jego parametry są wynikiem wieloletnich obserwacji, nie uwzględnia on chwilowych zmian stanu jonosfery. Do roku 2020 opracowany został model IRI Real-Time Assimilative Mapping (IRTAM), który adaptuje parametry modelu IRI do danych obserwacyjnych takich jak: częstotliwość krytyczna foF2, wysokość szczytu warstwy F2 hmF2 oraz parametry B0 i B1, określające grubość i kształt dolnej warstwy jonosfery. Autor stwierdza, że z punktu widzenia społeczności wykorzystującej model IRI potrzebne jest także

uwzględnienie danych dotyczących parametru VTEC (vertical TEC) uzyskanego z pomiarów GNSS i adaptacja modelu również do tego parametru. Zwraca tutaj także uwagę na sposób dopasowania modelu z wykorzystaniem danych historycznych w określonym przedziale czasu metodą asymilacji wariacyjnej 4D, co pozwala na wykrywanie wartości odstających, a także w pewnym stopniu umożliwia przewidywanie zachowań jonosfery także poza zasięgiem instrumentów z których pochodzą dane do asymilacji.

Kolejny rozdział zawiera opis działań Jonosferycznej Grupy Roboczej IGS, której głównym celem jest dostarczanie globalnych map VTEC. Autor przedstawia tutaj przegląd produktów wytwarzanych przez IGS Iono WG, w tym serwis czasu rzeczywistego RT-GIM (Real Time Global Ionosphere Map) obejmujący testowe globalne mapy jonosfery. Doktorant podkreśla, że w ramach IGS Iono WG odpowiada za generowanie łącznych map jonosfery.

Swoje doświadczenie w łącznym opracowaniu map jonosfery Autor wykorzystał do opracowania nowej metodologii monitorowania jonosfery w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem obserwacji pochodzących ze wszystkich czterech systemów GNSS co opisuje w rozdziale 4 poświęconym projektowi ARTEMIS. Opracowanie map TEC w tym podejściu opiera się na modelowaniu wartości STEC (Slant TEC) uzyskanych z obserwacji GNSS. Wykorzystanie STEC pozwala na uniknięcie błędów wynikających z mapowania wartości STEC do VTEC. Wartości STEC są estymowane razem z poprawkami zegarów odbiorników, początkową nieoznaczonością fazy i opóźnieniami troposferycznymi. Dodatkowo, na podstawie strumieni danych w czasie rzeczywistym opracowywana jest prognoza stanu jonosfery na najbliższe dwa dni. Należy zaznaczyć, że obliczenia te wykonywane są w oparciu o autorskie oprogramowanie Doktoranta.

W dalszym etapie badań, Autor ocenił jakość globalnych map jonosfery tworzonych w czasie rzeczywistym na podstawie porównania wartości różnicowego STEC obliczonego z map, a wartościami z obserwacji GNSS. Z porównania wyciąga wniosek, że dokładność rozwiązań finalnych i szybkich jest większa niż map czasu rzeczywistego. Zauważa także wpływ zastosowania obserwacji multi-GNSS i większej rozdzielczości czasowej na poprawę jakości produktów jonosferycznych. W ramach projektu ARTEMIS Autor stworzył serwis monitorowania VTEC w czasie rzeczywistym, z którego można korzystać na serwerach Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego. Oprogramowanie zbiera dane, przetwarza je oraz prezentuje wyniki. Do tworzenia produktów wykorzystywane są dane GNSS, a do ich walidacji dane z systemu DORIS, satelity JASON-3 i obserwacji okultacyjnych z satelitów na niskiej orbicie. Na etapie przetwarzania sprawdzana jest kompletność danych, odrzucane z opracowania są obserwacje od satelitów na niskich wysokościach nad horyzontem, wykrywane są "cycle-slips", a następnie obliczane wartości VTEC. Oprócz wizualizacji obliczonych danych na mapie, dane zapisywane są także do plików w formacie IONEX.

Produkty powstałe w ramach projektu ARTEMIS, Autor wykorzystał do asymilacji danych GNSS do międzynarodowej jonosfery odniesienia IRI. Metodologię asymilacji opisuje w rozdziale 5 rozprawy. Dzięki mapom jonosferycznym czasu rzeczywistego opracowanym z udziałem Doktoranta możliwe jest m. in. obliczenie ekwiwalentnej grubości warstwy jonosfery, do tej

pory niemożliwe do monitorowania. Z porównania map klimatologicznych z mapami czasu rzeczywistego przeprowadzonych przez Doktoranta wynika, że możliwe jest wykrywanie nawet niewielkich zaburzeń jonosferycznych, praktycznie w momencie ich wystąpienia.

W rozdziale 6 Doktorant dokonuje oceny "jakości" opracowanych produktów jonosferycznych. Porównuje produkty GNSS VTEC klimatologiczny i czasu rzeczywistego z wartościami TEC uzyskanymi z modelu IRI. Porównanie obejmuje warunki zarówno spokojnej jonosfery jak i burzy jonosferycznej w czterech punktach leżących na południku 20°E. Uzyskane wyniki z porównania map klimatologicznych wskazują na lepszą jakość tego produktu w odniesieniu do IRI. Autor zwraca uwagę na prawidłowo odwzorowane drobne struktury jonosferyczne uwidocznione na mapie klimatologicznej.

Przedstawiona do oceny dysertacja ma charakter opisowy, a zastosowana forma bezosobowa opisu prac badawczych utrudnia nieco ocenę dokonań Doktoranta. Jako, że prace wykonywał w zespołach badawczych (projekt ARTEMIS, Iono WG) z niektórych opisów trudno wywnioskować jaki jest wkład Autor w przeprowadzone badania. W pracy Autor wykorzystuje dużą ilość akronimów dotyczących modeli, parametrów, sieci obserwacyjnych, rodzajów map jonosfery, co prawda w znacznej większości wyjaśnionych w treści pracy, jednak ich nadmiar wprowadza pewien chaos i utrudnia przekaz. W całej pracy pojawia się znaczna liczba formuł matematycznych, zwłaszcza w rozdziale pierwszym. Są one zapisywane niekonsekwentnie - raz z wykorzystaniem znaku mnożenia, a innym razem bez. Znak mnożenia, tam gdzie występuje, zapisywany jest w postaci gwiazdki "*" a nie kropki, co jest błędem edytorskim. Kilka wzorów zostało podanych bez powołania na źródło literaturowe (wzory 1.7, 1.22, 1.27 - 1.33). Także znaczenie niektórych zmiennych nie zostało wyjaśnione (Eps1 - wzór 1.1, Eps0 - wzór 1.26), a inne są objaśnione, chociaż nie występują we wzorach (Ψ na str. 22). Sporadycznie, ale jednak widoczne są tzw. "kalki językowe" np. kilkakrotnie - "słoneczny kąt zenitu" - str. 22, 23, 24.

W ramach dodatkowych wyjaśnień, recenzent chciałby dowiedzieć się w jaki sposób w modelu IRI oblicza się kąt zenitalny Słońca?

Praca stanowi oryginalne opracowanie problemu asymilacji w czasie rzeczywistym parametru TEC do Międzynarodowej Jonosfery Odniesienia. Doktorant zaimplementował algorytmy asymilacji w autorskim oprogramowaniu oraz przeprowadził szereg analiz potwierdzających założoną tezę. Wyniki pracy, jak podaje Autor, mają lub będą miały zastosowanie w działaniach Jonosferycznej Grupy Roboczej IGS.

Podsumowując, należy stwierdzić, że w przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej, Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a praca zawiera oryginalne aspekty poznawcze i użytkowe w zakresie wykorzystania multi-GNSS w badaniach jonosfery. Wyszczególnione w recenzji uwagi nie mają wpływu na ogólną ocenę

pracy. Wątpliwości nie budzi także wykazana w rozprawie ogólna wiedza teoretyczna Autora w dyscyplinie Geodezja i Kartografia.

Tym samym stwierdzam, że recenzowana przez mnie rozprawa doktorska mgr. inż. Adama Fronia, przygotowana pod opieką promotora prof. dr. hab. inż. Andrzeja Krankowskiego, spełnia warunki stawiane rozprawie doktorskiej i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.