



WROCŁAW UNIVERSITY  
OF ENVIRONMENTAL  
AND LIFE SCIENCES

# GNSS troposphere tomography as a part of weather forecasting systems

**Estera Trzcina**

Supervised by Prof. Witold Rohm

Institute of Geodesy and Geoinformatics

The Faculty of Environmental Engineering and Geodesy

Wrocław University of Environmental and Life Sciences

**April 28, 2023**

*A thesis submitted in fulfillment of the requirements  
for the degree of Doctor of Philosophy.*

## Abstract

Global Navigation Satellite System (GNSS) tomography aims to provide three-dimensional (3-D) fields of humidity-related parameters in the troposphere. The technique is based on observations of GNSS signal delay along the paths between satellites and ground-based receivers. The GNSS tomography has been systematically developed in recent years, showing positive results in monitoring severe weather events. Given the spatial and temporal resolution of the tomographic outputs, they could benefit numerical weather prediction (NWP) models by providing information on the humidity structure in the troposphere, which is crucial for accurate weather forecasting. However, as this technique is currently at the research stage, it requires further investigation and development in order to be utilised by meteorological institutions. In particular, the required quality and availability of near real-time (NRT) tomographic estimates must be ensured. Also, the assimilation modules of the NWP models should be adjusted to take advantage of the new type of observation. Moreover, current shortcomings in model space parameterisation should be examined and remedied.

Within the presented dissertation, a set of investigations have been carried out to assess the applicability of the GNSS troposphere tomography technique to serve as an observation source for weather forecasting systems. First, NRT tomographic solution has been established for the GNSS network in Poland. The tomographic outputs have been validated based on radiosonde (RS) observations in order to evaluate the quality of the NRT-derived tomographic products. Also, the provision latency has been investigated. As a next step, the tropospheric estimates from the established solution have been assimilated into Weather Research and Forecasting (WRF) model to examine the impact of the tomographic data on the forecasted fields of meteorological variables. The assimilation procedure was at first conducted based on the existing observation operator GPSREF dedicated to total refractivity profiles. Further, the TOMOREF operator for the assimilation of tomography-derived wet refractivity fields was developed in WRF Data Assimilation (WRF DA) system to ensure a more reliable assessment of the tomographic data influence on the weather forecasts. The operator's performance has been evaluated during severe weather events (heavy precipitation) by validation of the assimilation outputs with several external data sources, revealing the importance of the quality control process as well as proper error assignment procedures. Apart from the refinements in the assimilation scheme, the tomographic technique itself was also further investigated and developed. The main focus was on the parameterisation of the model domain. A cross-comparison of the currently applied methods was performed; also, a new dynamic approach based on the optimisation of tomographic nodes' distribution was proposed to better exploit the tropospheric information provided by the GNSS signal.

It was shown that the NRT tomographic products can be provided with accuracy close to that of NWP models; the superiority of the tomographic approach was evident in the case of low-quality forecasts as well as in detecting wet refractivity inversions in the vertical profiles. The impact of the tomographic data on the NWP model was proved to be positive for the 12-hour forecasts of relative humidity, temperature, and surface pressure. The application of the TOMOREF operator resulted in better-quality precipitation forecasting. Implementation of the proposed approach for dynamic distribution of the tomographic nodes results in improvements in wet refractivity profile reconstruction by 0.5 - 2.0 ppm root mean square error when compared to the conventional regular approaches (both voxel-based and node-based).

The research conducted in the frame of this dissertation allowed for the evaluation of the GNSS troposphere tomography technique in the context of the application in weather forecasting systems. Both the tomographic technique and the assimilation procedures were studied to better understand the impact of the tomographic data on the NWP model, as well as to assess the potential and reveal the still-existing limitations of the tomographic technique. The main conclusion from this work is that GNSS tomography can serve as an additional source of humidity data for the NWP models when the proper assimilation procedures and tomographic model settings are applied.

**Keywords:** GNSS troposphere tomography, numerical weather prediction, data assimilation, tomographic parameterisation

## Streszczenie

Tomografia troposfery z wykorzystaniem obserwacji pochodzących z globalnych systemów nawigacji satelitarnej (ang. Global Navigation Satellite Systems, GNSS) ma na celu dostarczenie trójwymiarowego rozkładu parametrów wilgotności w troposferze. Technika ta oparta jest o obserwacje opóźnień sygnału GNSS na drodze propagacji pomiędzy satelitą a naziemnym odbiornikiem. Systematyczny rozwój tomografii GNSS w ostatnich latach wskazuje na potencjał techniki w monitorowaniu ekstremalnych zjawisk pogodowych. Biorąc pod uwagę przestrzenną i czasową rozdzielczość produktów tomografii GNSS, stanowią one potencjalnie wartościowe źródło danych dla numerycznych modeli prognozy pogody (ang. numerical weather prediction, NWP) o trójwymiarowej strukturze wilgotności w troposferze. Obecnie technika tomografii GNSS jest na etapie badań, zatem wykorzystanie jej wyników przez instytucje meteorologiczne wymaga dalszej weryfikacji w warunkach zbliżonych do operacyjnych. W szczególności należy zapewnić wymaganą jakość i dostępność obserwacji tomograficznych w czasie prawie rzeczywistym (ang. near real-time, NRT). Ponadto, moduły asymilacyjne modeli NWP powinny zostać dostosowane do wykorzystania nowego typu obserwacji. Dodatkowo, dotychczas prowadzone prace wskazują na możliwość dalszych udoskonaleń metodologii tomografii GNSS pod względem parametryzacji domeny modelu, zapewniając dokładniejsze oszacowanie stanu troposfery.

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono szereg badań mających na celu ocenę możliwości zastosowania techniki tomografii troposfery GNSS jako źródła obserwacji dla systemów prognozowania pogody. W pierwszej kolejności ustanowiono rozwiązanie tomograficzne NRT dla sieci stacji GNSS w Polsce. Wyniki tomograficzne zostały zweryfikowane na podstawie obserwacji radiosondażowych (RS) w celu oceny jakości produktów tomograficznych uzyskanych z NRT. Oszacowano również możliwości dotyczące opóźnienia czasowego w dostarczaniu danych. W kolejnym kroku obserwacje troposferyczne z zaproponowanego rozwiązania zostały zasymilowane do modelu Weather Research and Forecasting (WRF) w celu zbadania wpływu danych tomograficznych na prognozowane parametry meteorologiczne. Procedura asymilacji została początkowo przeprowadzona w oparciu o dostępny operator obserwacyjny GPSREF dedykowany profilom refrakcyjności całkowitej. Następnie, w celu zapewnienia bardziej wiarygodnej oceny wpływu danych tomograficznych na prognozy pogody, w systemie WRF Data Assimilation (WRF DA) opracowano operator TOMOREF do asymilacji pól refrakcyjności mokrej pochodzących z tomografii. Działanie operatora zostało przetestowane w przypadku występowania intensywnych opadów atmosferycznych. Walidację asymilacji wykonano poprzez porównanie wyników modelu z rzeczywistymi obserwacjami meteorologicznymi. Przeprowadzone analizy wskazują na wysokie znaczenie procedur kontroli jakości danych oraz określania błędów obserwacji w procesie asymilacji.

Poza badaniami dotyczącymi asymilacji, w niniejszej pracy podjęty został również temat parametryzacji domeny modelu tomograficznego. Metody parametryzacji stosowane aktualnie w modelach tomograficznych zostały zaimplementowane do modelu TOMO2, a następnie zweryfikowane pod względem dokładności rekonstrukcji stanu troposfery. Ponadto, zaproponowany został dynamiczny algorytm optymalizacji rozkładu węzłów w domenie modelu tomograficznego, w celu efektywniejszego wykorzystania informacji GNSS o stanie troposfery.

Wykazano, że produkty tomograficzne NRT mogą być dostarczane z dokładnością zbliżoną do modeli NWP; przewaga podejścia tomograficznego jest widoczna w przypadku prognoz niskiej jakości, jak również w wykrywaniu inwersji mokrej refrakcyjności w profilach pionowych. Wpływ danych tomograficznych na model NWP jest pozytywny dla 12-godzinnych prognoz wilgotności względnej, temperatury i ciśnienia. Zastosowanie operatora TOMOREF wpływa na podniesienie jakości prognoz opadów atmosferycznych. Implementacja algorytmu dynamicznego rozkładu węzłów tomograficznych zaskutkowała poprawą rekonstrukcji profilu refrakcyjności mokrej o 0.5 - 2.0 ppm błędu średniego w porównaniu do konwencjonalnych podejść regularnych (zarówno opartych o wyznaczanie parametrów dla wokseli jak i w węzłach modelu).

Badania przeprowadzone w ramach niniejszej rozprawy pozwoliły na weryfikację możliwości techniki tomografii troposfery GNSS w kontekście zastosowania w systemach prognozowania pogody. Analizie poddano zarówno technikę tomograficzną, jak i procedury asymilacyjne, aby lepiej zrozumieć wpływ danych tomograficznych na modele NWP, a także ocenić potencjał i ujawnić ograniczenia stosowanych metod. Wyniki pracy wskazują, że tomografia troposfery z wykorzystaniem obserwacji GNSS może służyć jako dodatkowe źródło danych wilgotnościowych dla modeli NWP, jeśli procedury asymilacji dopasowane są do charakterystyki obserwacji tomograficznych; ponadto, metoda parametryzacji domeny wyraźnie wpływa na jakość osiągniętych wyników.

**Słowa kluczowe:** tomografia GNSS troposfery, numeryczne prognozowanie pogody, asymilacja danych, parametryzacja tomografii