

Streszczenie rozprawy doktorskiej stanowiącej spójnie tematycznie zbiór czterech artykułów opublikowanych lub przyjętych do druku w czasopismach naukowych

- 1. Wilgan K, Rohm W, Bosy J (2015) Multi-observation meteorological and GNSS data comparison with Numerical Weather Prediction model, Atmospheric Research, Vol. 156, s. 29-42, IF=3.377, lista A MNiSW 30 pkt., udział 75%**

Pierwszym krokiem budowy zintegrowanego modelu troposfery jest wzajemna walidacja danych pochodzących z różnych źródeł. W artykule porównano dane pochodzące z modelu NWP COAMPS względem danych referencyjnych: opóźnienia troposferycznego w kierunku zenitu (ZTD, ang. zenith total delay) obliczonego dla 121 stacji GNSS sieci ASG-EUPOS, parametrów meteorologicznych z 15 naziemnych stacji sieci EPN (EUREF Permanent Network), które wyposażone są również w czujniki meteorologiczne oraz parametrów meteorologicznych w pionowych profilach atmosfery mierzonych za pomocą radiosondaży (RS) dla 3 stacji aerologicznych. Kluczowym elementem tej pracy jest znalezienie optymalnej metody obliczania wartości ZTD na podstawie danych meteorologicznych, metody interpolacji danych oraz metody obliczenia dokładności danych z modelu NWP.

Porównano wartości parametrów meteorologicznych z modelu COAMPS z dwoma referencyjnymi źródłami danych: EPN i RS. Dla temperatury i częściowego ciśnienia pary wodnej statystyki dla rezyduów (średnie przesunięcie \pm odchylenie standardowe) są zbliżone względem obu źródeł i wynoszą na powierzchni Ziemi: dla temperatury 1.2 ± 2.1 K dla EPN oraz 0.6 ± 2.3 K dla RS; dla ciśnienia pary wodnej -0.4 ± 0.9 hPa dla EPN -0.6 ± 0.7 hPa dla RS. Zaobserwowano, że dla ciśnienia atmosferycznego porównania względem dwóch źródeł danych nie są zgodne. Wynika to z faktu, że dane RS dostarczane są z rozdzielczością 12- godzinną o godzinie 0:00 i 12:00 UTC, co pokrywa się z czasem analiz COAMPS, natomiast rezydual dla ciśnienia wykazują dużą zależność od długości prognozy. Średnie przesunięcie

waha się od -0.3 hPa do 2 hPa. Dla pozostałych parametrów taka zależność czasowa nie jest zauważalna.

Znalezienie optymalnej metody interpolacji parametrów meteorologicznych oraz metody obliczania wartości ZTD z danych z modelu COAMPS to kolejne elementy tej pracy. Obliczono wartości ZTD z modelu NWP za pomocą kilku metod: 1) deterministycznego wzoru Saastamoinena, biorąc parametry meteorologiczne interpolowane jako średnia ważona z 4 najbliższych punktów oraz, dla interpolacji ciśnienia atmosferycznego, z najbliższego punktu siatki, a także 2) przedstawienia ZTD jako sumy ZWD (części mokrej opóźnienia) oraz ZHD (części suchej), gdzie ZHD obliczane jest deterministycznie za pomocą wzoru Saastamoinena, natomiast ZWD liczone jest jako całka z mokrej refrakcyjności na poszczególnych warstwach pionowych modelu. Odchylenie standardowe z rezyduów dla metody 2) jest najmniejsze, jednakże wynosi ok. 20 mm, natomiast metoda ta powoduje przesunięcia rzędu kilkunastu milimetrów względem referencyjnych danych GNSS. Założona docelowa dokładność dla ZTD z NWP została określona na podstawie wytycznych programu EIG EUMETNET GNSS Water Vapour Programme (E-GVAP), gdzie minimalna dokładność wynosi 15 mm, docelowa 10 mm, a optymalna 5 mm. Założenia dokładności z E-GVAP dotyczą ZTD dla asymilacji do modeli NWP, zostały jednak przyjęte jako wskaźnik docelowej dokładności modelu. Niestety, ZTD obliczone z modelu NWP nie spełnia nawet minimalnego założenia dokładności E-GVAP, mimo że zgodność modelu COAMPS z danymi referencyjnymi na poziomie parametrów meteorologicznych była duża. Nasuwa się wniosek, iż **modele troposfery dla pozycjonowania oparte tylko na NWP mają niewystarczającą dokładność**, lecz dobrą rozdzielczość czasowo-przestrzenną, dlatego **najlepszym rozwiązaniem dla pozycjonowania jest integracja modeli NWP z danymi o wyższej jakości, na przykład danymi GNSS**.

- 2. Wilgan K (2015) Zenith total delay short-term statistical forecasts for GNSS Precise Point Positioning, Acta Geodynamica et Geomaterialia, Vol. 12, No. 4 (180), s. 345-354, IF=0.561, lista A MNiSW 20 pkt.**

Jednym z wyzwań, przed którymi staje społeczność GNSS, jest pozycjonowanie w czasie rzeczywistym. Model troposfery również musi być dostarczony w czasie rzeczywistym, dlatego tak dużą popularnością cieszą się modele troposfery oparte na modelach NWP, które podają prognozy parametrów meteorologicznych, na podstawie których można obliczyć prognozy wartości ZTD. Jednakże, jak pokazano w artykule [1], parametry troposferyczne obliczone na podstawie danych tylko z modelu NWP nie mają wystarczającej dokładności, dlatego najlepszym rozwiązaniem jest zintegrowanie modelu NWP z danymi GNSS. Wartości ZTD z danych GNSS obliczane są jednak w czasie prawie-rzeczywistym (NRT, ang. near real-time), czyli z opóźnieniem godzinnym. Aby dostarczać wartości opóźnienia troposferycznego w czasie rzeczywistym, zostały stworzone algorytmy obliczające krótkoterminowe prognozy opóźnienia troposferycznego. Przy opracowaniu prognoz wykorzystano modele statystyczne: autoregresji (AR) oraz autoregresji i ruchomej średniej (ARMA). Modele te są szeroko stosowane w innych naukach przyrodniczych (geofizyka, hydrologia, meteorologia), natomiast rzadko w geodezji.

Prognozy zostały ujęte w dwa modele: globalny i lokalny. W modelu lokalnym każda badana stacja rozpatrywana była oddzielnie i miała osobny statystyczny model prognostyczny. W modelu globalnym jeden model statystyczny obowiązywał dla każdej stacji. Otrzymane predykcje porównano z innymi prognostycznymi źródłami danych: deterministycznym modelem GPT2 oraz modelem NWP COAMPS. Na podstawie prognoz parametrów meteorologicznych z tych modeli obliczono prognozy ZTD. Prognozy statystyczne wykazują się znacznie lepszą dokładnością dopasowania do szeregów czasowych ZTD niż modele deterministyczne czy NWP COAMPS. Dla 5-godzinnych lokalnych prognoz z modeli statystycznych średnie przesunięcie jest bliskie 0 z odchyleniem standardowym na poziomie 5-10 mm, dla modelu COAMPS przesunięcie waha się od -20 do 20 mm z odchyleniem standardowym 8-10 mm, natomiast dla modelu deterministycznego GPT2 przesunięcie wynosi od -40 do 40 mm z odchyleniem standardowym ok. 10 mm. Analizy dokładnościowe wykazały, że model globalny jest praktycznie tak samo dokładny jak modele lokalne. Średnie przesunięcie dla modelu globalnego wynosiło od -2 do 2 mm ze średnim odchyleniem standardowym na poziomie 6-8 mm. Można wnioskować, że **nie ma potrzeby używania modeli lokalnych, a jedynie modelu globalnego, co znacznie ułatwia automatyzację obliczania wartości ZTD na wszystkich stacjach jednocześnie.**

3. Wilgan K, Hurter F, Geiger A, Rohm W, Bosy J (2017) Tropospheric refractivity and zenith path delays from least-squares collocation of meteorological and GNSS data, Journal of Geodesy, Vol. 91, No. 2, s. 117-134, IF = 2.486, lista A MNiSW 40 pkt., udział 60%

Kolejnym krokiem jest zbudowanie modelu troposfery zintegrowanego z różnych źródeł danych. Przeprowadzono testy i kalibrację modelu dla dwóch obszarów badawczych zróżnicowanych pod kątem orografii: Szwajcarii (górzystej) i Polski (nizinnej). Model troposfery został oparty na technice kolokacji metodą najmniejszych kwadratów, w której każdą obserwację dzieli się na część deterministyczną, część regularną stochastyczną (sygnał) oraz część nieregularną stochastyczną (szum). Wybrane parametry modelu estymowane są metodą najmniejszych kwadratów z uwzględnieniem dwóch składników błędu na podstawie danych z różnych źródeł równocześnie. Zaletą tej metody jest łatwość łączenia ze sobą obserwacji pochodzących z różnych źródeł danych. Za pomocą obliczonych współczynników modelu możliwe jest zrekonstruowanie wartości zadanego parametru w dowolnym miejscu i czasie. Obliczenia zostały wykonane za pomocą oprogramowania COMEDIE (Collocation of Meteorological Data for Interpretation and Estimation of Tropospheric Pathdelays), opracowanego na Politechnice Federalnej w Zurychu.

W artykule przedstawiono modele troposfery dla dwóch krajów opracowane na podstawie różnych źródeł i typów danych. Dla Szwajcarii obliczono profile całkowitej refrakcyjności z trzech zbiorów wejściowych: 1) obserwacji tylko z naziemnych stacji meteorologicznych, 2) obserwacji ze stacji meteorologicznych zintegrowanych z ZTD GNSS oraz 3) obserwacji ze stacji meteorologicznych

zintegrowanych z ZTD GNSS z uwzględnieniem horyzontalnych gradientów ZTD GNSS. Model o najwyższej zgodności z referencyjnymi danymi RS opiera się na ZTD GNSS zintegrowanego z naziemnymi danymi meteorologicznymi. Stacje meteorologiczne położone na różnych wysokościach dają dobrą informację o stanie troposfery, nawet w przekrojach pionowych. Jednakże, powyżej wysokości najwyższej stacji meteorologicznej, konieczne jest skorzystanie z dodatkowego źródła danych, takiego jak ZTD GNSS, które dostarcza informacji o stanie troposfery w całym profilu pionowym. Niestety, dodanie horyzontalnych gradientów ZTD nie poprawiło zgodności z referencyjnymi pomiarami aerologicznymi.

W krajach położonych głównie na terenach nizinnych, takich jak Polska, niełatwo jest uzyskać dokładne pomiary parametrów meteorologicznych na zróżnicowanych wysokościach, dlatego model troposfery zbudowany jest przede wszystkim w oparciu o dane NWP o rozdzielczości przestrzennej 10 km x 10 km z 34 poziomami wysokości i rozdzielczości czasowej godzinnej. Profile całkowitej refrakcyjności oraz wartości ZTD zostały obliczone na podstawie czterech zbiorów danych: 1) modelu NWP WRF, 2) modelu WRF

zintegrowanego z ZTD GNSS, 3) tylko ZTD GNSS, 4) modelu WRF, ZTD GNSS i naziemnych pomiarów meteorologicznych. Obliczone parametry zostały porównane z danymi referencyjnymi - profilami refrakcyjności z radiosondaży oraz bezpośrednimi pomiarami ZTD na stacjach GNSS. Dla całkowitej refrakcyjności wyniki z kolokacji z modelu WRF zintegrowanego z danymi GNSS (podzbiór 2) wykazywały się najwyższą zgodnością z referencyjnymi danymi z radiosondaży. Dodanie obserwacji z naziemnych stacji meteorologicznych (podzbiór 4) nie miało widocznego wpływu na kolokację całkowitej refrakcyjności. Podzbiór 1) również wykazywał podobną zgodność z danymi z radiosondaży, jedynie w górnych warstwach modelu występowało przesunięcie rzędu 2 ppm. Podzbiór 3) wykazywał znacznie większą rozbieżność z danymi referencyjnymi, różnice wynosiły nawet 30 ppm dla najniższych poziomów wysokościowych modelu WRF. Wynikiem tak dużych rozbieżności była próba rekonstrukcji całego profilu troposfery na podstawie pojedynczych wartości ZTD. Następnie porównano wartości ZTD z kolokacji z referencyjnymi danymi GNSS. Porównania wykonano dla 9 dni w maju 2014, w okresie, w którym występowały intensywne opady deszczu. Podzbiory o największej zgodności ZTD z danymi referencyjnymi to 2) i 3) ze średnimi przesunięciami wynoszącymi 3.7 mm i 3.8 mm oraz odchyleniem standardowym na poziomie 16.7 mm i 17.2 mm, odpowiednio. Stanowi to poprawę w stosunku do danych NWP COAMPS o około 2-3 mm dla odchylenia standardowego i około 15 mm dla przesunięcia względem metody o największej dokładności przedstawionej w artykule [1]. Kolokacja tylko na podstawie danych z modelu WRF (podzbiór 1) wykazywała się zbyt wysokimi wartościami ZTD. Prawdopodobną przyczyną są zbyt wysokie wartości wilgotności powietrza w modelu WRF w okresie po opadach. Wyższa wilgotność w modelu przekłada się bezpośrednio na wyższe wartości ZTD. Podsumowując, **integracja danych NWP z danymi GNSS jest konieczna przy równoczesnym obliczaniu wartości całkowitej refrakcyjności oraz opóźnienia troposferycznego.**

4. Wilgan K, Hadaś T, Hordyniec P, Bosy J (2017) Real-time precise point Positioning augmented with high-resolution numerical weather prediction model, GPS Solutions (przyjęty do druku), IF = 2.991, lista A MNiSW 35 pkt., udział 45%

Ostatnim krokiem jest zastosowanie otrzymanego modelu troposfery w praktyce. W artykule zaaplikowano model troposfery przedstawiony w pracy [3] do oprogramowania GNSS-WARP (Wrocław Algorithms for Real-time Positioning), tworzono w Instytucie Geodezji i Geoinformatyki Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu i służącego do pozycjonowania PPP w czasie rzeczywistym. Zastosowanie wysokorozdzielczego modelu troposfery pozwoliło na dokładniejsze wyznaczenie składowych wysokościowych i poziomych współrzędnych oraz skrócenie czasu konwergencji.

Model troposfery, użyty jako model a priori w pozycjonowaniu PPP, opiera się na danych GNSS i

parametrach meteorologicznych z modelu NWP, gdyż jest to model o najwyższej dokładności, jak pokazano w artykule [3]. Zmieniona została jednak konfiguracja rozdzielczości użytego modelu WRF na gęstsza siatkę horyzontalną: 4 km x 4 km i 47 poziomów wysokości. Zaproponowany model jest wysokorozdzielczą alternatywą dla standardowych modeli globalnych, które najczęściej są stosowane w tego typu pozycjonowaniu, takich jak model UNB3m czy VMF1-FC (Forecast Gridded Vienna Mapping Function 1). W artykule zastosowano zaproponowany model dla 14 polskich stacji EPN oraz trzech tygodniowych okresów charakteryzujących się różnymi porami roku i różną zmiennością troposfery.

Kolejnym czynnikiem, oprócz modelu a priori, który ma wpływ na dokładność pozycjonowania i czas konwergencji jest wybór funkcji mapujących. Najczęściej używane w pozycjonowaniu funkcje mapujące - Vienna Mapping Functions (VMF, np. w modelu VMF1-FC) obliczane są na podstawie modelu NWP ECMWF, o średniej rozdzielczości przestrzennej ok. 40 km i 6-godzinnej rozdzielczości czasowej. W artykule zaproponowano użycie funkcji mapujących opartych o model WRF, o znacznie wyższej rozdzielczości czasowo-przestrzennej.

Testy numeryczne zostały przeprowadzone w 6 wariantach z różnymi modelami a priori i funkcjami mapującymi. Dwa warianty wykorzystywały ZTD i funkcje mapujące z najczęściej używanych modeli: UNB3m i VMF1-FC. Trzeci wariant opierał się na modelu WRF, z wartościami ZTD obliczonymi bezpośrednio jako całka z całkowitej refrakcyjności i funkcjami mapującymi policzonymi na podstawie metod śledzenia sygnału przez model WRF. W kolejnych trzech wariantach, zostały użyte wyżej wymienione funkcje mapujące, jednakże jako model a priori ZTD i jako parametr ograniczający zmienność troposfery wykorzystano wysokorozdzielczy model oparty na danych WRF oraz GNSS obliczony za pomocą oprogramowania COMEDIE. Obliczone współrzędne zostały porównane do oficjalnych współrzędnych sieci EPN. **Użycie wariantów opartych na COMEDIE zmniejszyło średnie przesunięcie współrzędnych o 20 mm w trybie statycznym i 10 mm w trybie kinematycznym,** jednakże zwiększyło średnie odchylenie standardowe o 1.5 mm w trybie statycznym i 4 mm w trybie kinematycznym. **Dodatkowo, użycie tych wariantów skróciło czas zbieżności rozwiązania o 13% dla współrzędnych płaskich i o 20% dla składowej wysokościowej.**

Podsumowanie, wnioski i dalsze prace

W rozprawie przedstawiono budowę modelu troposfery zaczynając od wyboru źródeł danych i metody interpolacji, poprzez testy konfiguracji modelu, aż po zastosowanie modelu w PPP. Na podstawie szczegółowej analizy danych z modelu NWP w artykule [1] pokazano, że wartości opóźnienia troposferycznego obliczone tylko na podstawie danych NWP wykazują się niewystarczającą zgodnością z danymi referencyjnymi, niezależnie od metody interpolacji. Jednakże, modele NWP charakteryzują się wysoką rozdzielczością przestrzenną oraz są jednym z nielicznych źródeł danych w Polsce, na podstawie których można uzyskać rozkład parametrów meteorologicznych w pionowych przekrojach atmosfery. Dlatego, zamiast rezygnować z modeli NWP, zwiększono ich dokładność przez integrację z innymi źródłami danych. W artykule [3] zaproponowano zintegrowany model troposfery oparty na technice kolokacji dla dwóch obszarów badawczych - Polski i Szwajcarii. Testowano różne podzbiory danych wejściowych. Dla górzystej Szwajcarii najlepszy model całkowitej refrakcyjności opiera się na parametrach meteorologicznych z sieci naziemnych stacji, zintegrowanych z danymi GNSS. Dla Polski, położonej głównie na terenach nizinnych, najlepszy model, zarówno całkowitej refrakcyjności, jak i opóźnienia troposferycznego opiera się na danych NWP zintegrowanych z produktami GNSS. Zaproponowany model ZTD został wykorzystany w artykule [4] jako model a priori troposfery dla precyzyjnego pozycjonowania. Dodatkowo, zostały przedstawione funkcje mapujące obliczone na podstawie modelu WRF o znacznie wyższej rozdzielczości czasowo-przestrzennej niż standardowo używane funkcje np. z modelu VMF1-FC czy UNB3. Zastosowanie wysokorozdzielczego modelu a priori i funkcji mapujących w oprogramowaniu PPP GNSS-WARP poskutkowało poprawą wyznaczania współrzędnych oraz skróceniem czasu konwergencji. Jednym z wyzwań współczesnego pozycjonowania jest PPP w czasie rzeczywistym. Opóźnienie troposferyczne użyte w zaproponowanym

modelu obliczane jest w czasie prawie-rzeczywistym. Jedną z możliwości na przejście do czasu rzeczywistego jest obliczenie krótkoterminowych prognoz ZTD w czasie prawie-rzeczywistym. W artykule [2] zostały przedstawione algorytmy krótkoterminowo prognozujące wartości ZTD za pomocą modeli statystycznych AR i ARMA. Testy w artykule [4] zostały przeprowadzone dla symulowanego czasu rzeczywistego, bez korzystania z prognoz.