

Załącznik 2. Autoreferat

1 Imię i nazwisko

Witold Rohm

2 Posiadane stopnie dyplomy i tytuły naukowe - z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

Stopień naukowy doktora uzyskałem 9 marca 2011 roku na podstawie uchwały Rady Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, na podstawie rozprawy pt. „Lokalny przestrzenno-czasowy model tomograficzny troposfery oparty o obserwacje satelitarne GPS i parametry meteorologiczne”. Praca została wykonana w Instytucie Geodezji i Geoinformatyki pod opieką prof. dr hab. inż. Jarosława Bosego, recenzentami byli: prof. dr hab. inż. Andrzej Borkowski (Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu) oraz prof. dr hab. inż. Jerzy B. Rogowski (Politechnika Warszawska).

3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

2011 - obecnie adiunkt w Instytucie Geodezji i Geoinformatyki, Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu,

2012 - 2014 post-doc w SPACE Research Centre, RMIT Uniwersytet, Melbourne, Australia,

2011 - 2012 naukowiec wizytujący w SPACE Research Centre, RMIT Uniwersytet, Melbourne, Australia,

2008 - 2011 asystent w Instytucie Geodezji i Geoinformatyki, Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.

4 Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust.2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zm.)

Osiągnięcie naukowe potwierdzone jednotematycznym cyklem publikacji to: „Model tomografii troposfery z obserwacji GNSS”.

4.1 Lista publikacji tworzących jednotematyczny cykl

[1] W. Rohm. The precision of humidity in GNSS tomography. W: *Atmospheric Research* 107 (2012), s. 69–75. ISSN: 0169-8095. DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.12.008,

[2] W. Rohm. The ground GNSS tomography – unconstrained approach. W: *Advances in Space Research* 51.3 (2013), s. 501–513,

[3] J. Bosy, J. Kaplon, W. Rohm, J. Sierny i T. Hadas. Near real-time estimation of water vapour in the troposphere using ground GNSS and the meteorological data. W: *Annales Geophysicae* 30.9 (2012), s. 1379–1391,

- [4] W. Rohm, K. Zhang i J. Bosy. Limited constraint, robust Kalman filtering for GNSS troposphere tomography. W: *Atmospheric Measurement Techniques* 7.5 (2014), s. 1475–1486.

4.2 Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Wstęp

Pomiary oparte na Globalnych Systemach Nawigacji Satelitarnej w geodezji i nawigacji są obecnie podstawowym narzędziem w realizacji badań naukowych, prac rozwojowych czy standardowych prac geodezyjnych. Rozwój systemów nawigacji satelitarnej GNSS, z jednej strony zmierzający w stronę rozwiązań wielosystemowych (GPS + GLONASS + Galileo + Baidou + QZSS) [5], a z drugiej precyzyjnego pozycjonowania autonomicznego (Precise Point Positioning - PPP) [6], wymaga stosowania precyzyjnych modeli opisujących zmienność układu obserwacyjnego (np. anteny satelitów i odbiorników, zegarów, potencjału grawitacyjnego Ziemi), jak również samego środowiska propagacji sygnału (jonosfery, troposfery).

Badania naukowe prowadzone w wiodących ośrodkach w Polsce i na świecie [7, 8, 9], wskazują zasadność stosowania precyzyjnych modeli do eliminacji wpływu troposfery, przyspieszenia czasu konwergencji rozwiązania i podniesienia niezawodności wyznaczenia współrzędnych, szczególnie w przypadku wystąpienia silnych poziomych gradientów troposfery. Systemy pozycjonowania autonomicznego wymagają modelowania atmosfery, które zapewni wysoką jakość parametrów przebiegu sygnału w atmosferze, to jest wartości refrakcji na drodze satelita odbiornik. Ponieważ zadanie to nie może zostać zrealizowane w pełni przez empiryczne modele klimatologiczne jak GPT [10], GPT2 [11], UNB3m [12], meteorologiczne obserwacje naziemne [9], czy numeryczne modele prognozy pogody [8], zasadne jest użycie obserwacji GNSS w połączeniu z innymi obserwacjami troposfery, w celu zbudowania modelu refrakcji (stanu atmosfery).

Techniką umożliwiającą otrzymanie trójwymiarowego rozkładu dowolnego parametru na podstawie zintegrowanych jednowymiarowych obserwacji jest tomografia [13]. Używając odwrotnej transformaty Radona, z zintegrowanego parametru opisującego stan troposfery na drodze satelita odbiornik (Slant Troposphere/Total Delay - STD), dodatkowych danych apriori, oraz równań ograniczających zmienność parametrów modelu, można uzyskać trójwymiarowy rozkład refrakcyjności w troposferze powyżej sieci odbiorników. Dane te mogą posłużyć jako element modelu troposfery wspomagający pozycjonowanie, jak również może zostać wykorzystany w aplikacjach meteorologicznych. Prace rozwojowe związane z tomografią prowadzą obecnie wiodące uniwersytety i instytuty badawcze Europejskie [14, 15, 16, 17, 18] i Azjatyckie [19, 20].

W ramach cyklu publikacji przedstawiłem rozwój metodologii budowy modelu tomograficznego, wraz z kontrolą jakości wyznaczanych parametrów oraz przykładem jej zastosowania:

- Przeprowadzenie analizy jakości rozwiązania tomograficznego w zależności od ilości

obserwacji, kształtu sieci oraz nałożonych warunków ograniczających zmienność parametrów [1],

- Konstrukcja i testowanie metodologii budowy modelu tomograficznego bez równań ograniczających zmienność modelu (w sensie explicit) [2],
- Aplikacja filtru Kalmana do rozwiązania zadania tomograficznego, odpowiedniego do realizacji zadań w czasie prawie rzeczywistym, analiza wpływu szumu pomiarów na otrzymane wartości refrakcyjności [3],
- Rozszerzenie funkcjonalności modelu przez zastosowanie odpornego filtru Kalmana i jednoczesne usunięcie równań ograniczających, wieloaspektowe testowanie rozwiązanie z weryfikacją przy pomocy numerycznych modeli prognozy pogody [4].

W kolejnej części autoreferatu przedstawię krótką charakterystykę poszczególnych zagadnień związanych z rozwojem modelu tomograficznego.

Analiza jakości rozwiązania tomograficznego

Model tomograficzny, zaproponowany w ramach mojej pracy doktorskiej i opublikowany we wcześniejszych pracach ma postać (model funkcjonalny):

$$SWD = A \cdot N_w, \quad (1)$$

gdzie SWD to wektor obserwacji czyli skośnych opóźnień w kierunku satelitów obserwowanych przez n stacji, A macierz planu zawierająca odległości jaką sygnał GNSS pokonuje w każdym elemencie modelu (liczba wierszy jest równa sumie liczby obserwacji i równań ograniczających a liczba kolumn odpowiada liczbie niewiadomych), N_w to wektor niewiadomych w tym wypadku refrakcyjność części mokrej troposfery. W tej wersji modelu do macierzy planu dodano równania ograniczające zmienność refrakcyjności w kierunku horyzontalnym - pozwala to na wyznaczenie refrakcyjności w obrębie całego modelu, nawet w komórkach które nie zostały przecięte przez sygnał.

Wyznaczenie precyzji działania modelu tomograficznego a w konsekwencji zawartości pary wodnej w atmosferze zostało oparte na prawie propagacji wariancji: $C_y = J \cdot C_x \cdot J^T$. To znaczy, że wartości błędów obserwacji pośrednich (takich jak: opóźnienie w kierunku zenitalnym, ciśnienia, wysokości anteny, kąta elewacji satelity, wartości funkcja mapującej) zostały uwzględnione w procesie uzyskania miary błędów przypadkowych obserwacji skośnych.

W kolejnym kroku przy pomocy wyrażenia $C_{N_w} = (A^T \cdot C_{SWD}^{-1} \cdot A)^+$ przeanalizowano wpływ błędów obserwacji na estymację refrakcyjności. Otrzymane wyniki zdecydowanie wskazywały na różnorodność rozwiązania ze względu na topologię macierzy planu A . Stąd, wybrano dwa przypadki graniczne (na podstawie wskaźnika uwarunkowania) o maksymalnej i minimalnej wartości - co odpowiada najslabszej i najbardziej odpowiedniej geometrii problemu tomograficznego w badanym przedziale czasowym.

W ostatnim kroku wyznaczono błędy względne i bezwzględne zawartości pary wodnej uzyskanej przy pomocy tomografii i dodatkowych informacji na temat rozkładu temperatury T , zgodnie ze wzorem: $e = N_w \cdot \frac{T^2}{k_2 \cdot T + k_3}$. Analiza rozwiązania pozwoliła stwierdzić że: 1) model tomograficzny jest bardzo czuły na topologię macierzy A , 2) graniczna czułość modelu tomograficznego wyrażona jako parcjalne ciśnienie pary wodnej wynosi około 0.5 hPa. Stąd wniosek, że model w warunkach troposfery szerokości umiarkowanych będzie działał poprawnie w pierwszych 6 km od powierzchni Ziemi, ponieważ powyżej tej wysokości zazwyczaj zawartość pary wodnej jest niższa niż 0.5 hPa. Ważny jest więc dobór macierzy planu pod kątem wskaźnika uwarunkowania (stosunku największej do najmniejszej wartości osobliwej), tak by rozwiązanie tomograficzne było stabilne.

Model tomograficzny bez równań ograniczających

Kolejnym krokiem w stronę modelu rozwiązującego profil pionowy refrakcyjności z dużą dokładnością, w tym w takich sytuacjach pogodowych gdy występuje duży gradient poziomy i pionowy tego parametru, jest implementacja modelu bez równań ograniczających. W tym wypadku zrezygnowano z części macierzy planu związanej z równaniami ograniczającymi, natomiast dokonano zamiany modelu funkcjonalnego absolutnego na model różnicowy, w postaci:

$$\delta SWD = A \cdot \delta N_w, \quad (2)$$

gdzie δSWD to różnica pomiędzy pomierzoną wartością opóźnienia, skośnego a opóźnieniem skośnym z dowolnego modelu rozkładu, δN_w to poprawki do dowolnego modelu refrakcyjności. Rozwiązanie uzyskano przez pseudoodwrotność: $\delta N_w = V_I \cdot \Sigma_I^{-1} \cdot U_I^T \cdot \delta SWD$, przy czym ilość elementów na przekątnej macierzy wartości osobliwych Σ_I została zmodyfikowana w stosunku do rozwiązania standardowego. Jest to kluczowy element stanowiący o propagacji błędów pomiarowych do estymowanych parametrów.

Zostały wobec tego przetestowane trzy różne podejścia ograniczające liczbę wartości osobliwych: 1) analiza logarytmu funkcji wartości osobliwych i poszukiwanie punktów przegięcia, 2) testowanie istotności wpływu na rozwiązanie kolejnych wartości osobliwej, 3) metoda Hansena polegająca na testowanie normy residuów w stosunku do normy rozwiązania. Ponieważ usunięto znaczną część wierszy z macierzy A przez co liczba obserwacji (wierszy macierzy A) drastycznie zmalała w stosunku do liczby niewiadomych, należało przeprowadzić proces łączenia obserwacji z kolejnych epok obserwacyjnych zakładając, że stan troposfery się nie zmienia. Model funkcjonalny tomografii dla łączonych epok obserwacyjnych może zostać wyrażony następującym wzorem:

$$\begin{bmatrix} \delta SWD_1 \\ \delta SWD_2 \\ \dots \\ \delta SWD_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_p \end{bmatrix} \cdot \delta N_w. \quad (3)$$

Otrzymane wyniki eksperymentów numerycznych pozwoliły na udowodnienie tezy: jakość rozwiązania bez warunków nakładanych na niewiadome jest podobna do tej z nałożonymi warunkami. Umożliwia jednocześnie precyzyjne odtworzenie gradientów pionowych i poziomych w troposferze. Natomiast, do poprawnego rozwiązania wszystkich elementów modelu, należy połączyć przynajmniej 10 epok obserwacyjnych (w eksperymencie są to epoki 1 godzinne). Najefektywniejszą metodą doboru liczby wartości

osobliwych okazała się być analiza funkcjonalna wartości osobliwych.

Implementacja filtru Kalmana oraz testowanie odporności na szum obserwacji

Ponieważ model został przetestowany i rozwijany głównie używając obserwacji syntetycznych, logicznym rozwinięciem prac związanych z modelem tomograficznym była aplikacja działania modelu dla obserwacji rzeczywistych. Ponieważ całe zadanie badawcze obejmowało także estymację opóźnienia troposferycznego z sieci stacji referencyjnych ASG-EUPOS, wzbogacenie obserwacji przy pomocy danych z obserwacji in-situ oraz wyznaczanie trójwymiarowego rozkładu pary wodnej zostało umieszczone w jednej zespołowej publikacji. Rozdział pracy poświęcony tomografii z obserwacji GNSS w czasie prawie rzeczywistym zostanie omówiony poniżej.

Model funkcjonalny tomografii składający się z obserwacji w kierunku do satelity SWD , równań ograniczających zmienność w kierunku horyzontalnym W , został wzbogacony o elementy związane z danymi apriori $N_{apriori}$:

$$\begin{bmatrix} SWD \\ N_{apriori} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A_{apriori} \\ W \end{bmatrix} \cdot N_w. \quad (4)$$

Dodatkowo model w nowej implementacji dzieli się na część wewnętrzną, obszar zainteresowania i część zewnętrzną, obszar nie istotny obserwacyjnie, jednak penetrowany przez sygnał GNSS, szczególnie od satelitów znajdujących się nisko nad horyzontem. Celem takiego zróżnicowania przestrzeni modelu jest parametryzacja wszystkich obserwacji przez zmienną modelu. Pozwoliło to na redukcję błędów systematycznych rozwiązania.

Implementacja modelu została oparta na filtrze Kalmana: 1) oddzielono obserwacje od procesu, 2) dodano macierz kowariancji (szumu) procesu, 3) dodano macierz kowariancji (szumu) obserwacji, 4) w każdej epoce wyznaczono wzmocnienie Kalmana, element filtru decydujący o poziomie zaufania do obserwacji (SWD) i stanu procesu z poprzedniej epoki.

W celu kontroli danych wprowadzanych do modelu porównano obserwacje GNSS z danymi uzyskanymi przez śledzenie sygnału przez numeryczny model prognozy pogody, uzyskując statystykę $N(\mu_{SWD} = -0.002m, \sigma_{SWD} = 0.049m)$. Zdecydowano, że przed uruchomieniem modelu w postaci operacyjnej należy przeprowadzić analizę czułość na szum pomiarowy. Wykonano szereg eksperymentów polegających na rozwiązaniu modelu tomograficznego z różnym poziomem szumu obserwacyjnego: 1) obserwacje bezbłędne $N(\mu_{SWD} = 0m, \sigma_{SWD} = 1 \cdot 10^{-6}m)$ uzyskując rozwiązanie w zakresie refrakcyjności na poziomie $N(\mu_{N_w} = -0.5mmkm^{-1}, \sigma_{N_w} = 4.3mmkm^{-1})$, 2) średni poziom szumu $N(\mu_{SWD} = -0.000m, \sigma_{SWD} = 0.005m)$ uzyskując rozwiązanie w zakresie refrakcyjności na poziomie $N(\mu_{N_w} = -0.2mmkm^{-1}, \sigma_{N_w} = 5.2mmkm^{-1})$, 3) poziom szumu wynikający z weryfikacji przy pomocy modelu Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS) $N(\mu_{SWD} = -0.002m, \sigma_{SWD} = 0.050m)$ uzyskując rozwiązanie w zakresie refrakcyjności na poziomie $N(\mu_{N_w} = 1.6mmkm^{-1}, \sigma_{N_w} = 27.0mmkm^{-1})$. W

konsekwencji, implementacja modelu tomograficznego dedykowana dla obserwacji rzeczywistych GNSS powinna obejmować kompleksową ocenę jakości obserwacji. Na poziomie zaprezentowanym w tym artykule zastosowano: podniesienie kąta odcięcia horyzontu do 10° , sztywnej redukcji wartości osobliwych tak by wskaźnik uwarunkowania nie przekraczał 100. Pozwoliło to zredukować odchylenie standardowe rozwiązania z 27.0mmkm^{-1} do 8.9mmkm^{-1} . Metodologia prowadząca do redukcji szumu została rozwinięta w kolejnej pracy.

Odporny filtr Kalmana i uwolnienie tomografii z równań ograniczających

W poprzednich pracach zaprezentowano elementy nowoczesnego rozwiązania tomograficznego które wzbogacone o dodatkowe funkcje redukcji obserwacji odstających zostało zaprezentowane w tej pracy. Model funkcjonalny tomografii został zmodyfikowany tak by zawierał same obserwacje GNSS oraz dane apriori ($A_{apriori}$ - dla modelu wewnętrznego, $A_{apriori_{outer}}$ - dla modelu zewnętrznego) o wartości refrakcyjności, wobec tego model ma postać:

$$\begin{bmatrix} SWD \\ N_{apriori} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{inner} & A_{outer} \\ A_{apriori} & A_{apriori_{outer}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_w \\ N_{O_w} \end{bmatrix} \quad (5)$$

i nie zawiera żadnych równań ograniczających zmienność parametrów (w sensie explicit). Ponieważ zastosowano odporny filtr Kalmana więc proces (zmienność refrakcyjności N_{w_k} w czasie) ma postać:

$$\hat{N}_{w_k}(-) = \Phi_k \cdot \hat{N}_{w_{k-1}}(-), \quad (6)$$

gdzie Φ_k to macierz systemowa (w omawianej implementacja I), macierz kowariancji P_k estymowanego stanu:

$$P_k(-) = \Phi_k \cdot P_{k-1}(+) \cdot \Phi_k^T + Q_k, \quad (7)$$

gdzie Q_k to szum procesu. W odróżnieniu od standardowego filtra Kalmana, w filtrze odpornym macierz wzmocnienia Kalmana:

$$\bar{K} = P_k(-) \cdot A_k^T (A_k \cdot P_k(-) \cdot A_k^T + R_k^R)^{-1} \quad (8)$$

jest wyznaczana iteracyjnie tzn. wartości kowariancji obserwacji R_k są modyfikowane w zależności od testu wartości residuów aposteriori. Dodatkowo, aby wspomóc działanie filtra Kalmana, macierz A jest sprawdzana w poszukiwaniu obserwacji powodujących podniesienie wskaźnika uwarunkowania macierzy (liniowo zależnych). Metodologia wypracowana w [2] została tu użyta do wykrycia wierszy macierzy A odpowiedzialnych za wysoki wskaźnik uwarunkowania, a następnie zaaplikowana do usunięcia odpowiednich obserwacji z macierzy SWD oraz R .

Przeprowadzono szereg eksperymentów numerycznych z użyciem danych syntetycznych (o zerowym i rzeczywistym poziomie szumu) oraz rzeczywistych (z gradientem i bez gradientu), obejmujących różne elementy odporności filtra Kalmana, danych apriori (modele empiryczne UNB3m, GPT oraz numeryczny model prognozy pogody). Ogólnie przetestowano 13 różnych kombinacji, z których wynika, że najważniejszym elementem w tego typu filtracyjnym podejściu wpływającym na jakość rekonstrukcji, jest dobrej

jakości pole refrakcyjności apriori, nawet przy założeniu dużej wartości odchylenia standardowego dla tego typu pseudo-observacji (30mmkm^{-1}). Drugim najbardziej istotnym parametrem wpływającym na jakość rozwiązania jest iteracyjne wyznaczenie wartości kowariancji obserwacji oraz (w mniejszym stopniu) redukcja korelacji w macierzy planu. Trzecim istotnym rezultatem badań, jest potwierdzenie jakości rozwiązania przy pomocy obserwacji rzeczywistych i obserwacji syntetycznych o średnim poziomie szumu, które użyte w modelu tomograficznym dają odchyłki od modelu referencyjnego na poziomie 6.2mmkm^{-1} i 6.4mmkm^{-1} odpowiednio.

Trzeba zaznaczyć przy tym że badając jakość rozwiązania w profilu pionowym widać wyraźnie że pierwsze 2 km rozwiązania tomograficznego znacznie odbiega od danych referencyjnych, jest to wprost konsekwencja niewielkiej ilości przecięć promieni skanujących w dolnej troposferze i braku wprowadzonych korelacji pomiędzy komórkami modelu (równań ograniczających).

Podsumowanie

Za najważniejsze osiągnięcia przedłożonego cyklu uważam:

- Rozwinięcie koncepcji modelu tomograficznego od poziomu prac laboratoryjnych i obserwacji lokalnych do skali krajowej i pełne wsparcie rzeczywistych danych obserwacyjnych,
- Przeprowadzenie rygorystycznej analizy wpływu błędów pomiarowych na wyniki działania modelu tomograficznego,
- Zaaplikowanie działania modelu do obserwacji w czasie prawie-rzeczywistym,
- Odrzucenie równań wprowadzających korelacje pomiędzy elementami modelu co przyczynia się do redukcji błędów systematycznych,
- Wprowadzenie schematu redukcji błędów odstających pojawiających się w obserwacjach, przez rozwiązanie odporne oraz redukcje korelacji w macierzy planu,
- Wyznaczenie granicznych przedziałów dokładnościowych dla rozwiązania tomograficznego i obszarów w których model może zostać zaaplikowany.

5 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Równoległe z badaniami nad rozwojem tomografii troposfery, po obronie pracy doktorskiej, zajmowałem się także tematyką związaną z opracowaniem sygnału GNSS w badaniach geodynamicznych i meteorologicznych.

5.1 Lista publikacji - pozostałe osiągnięcia

- [1] P. Grzempowski, J. Badura, S. Cacoń, J. Kapłon, W. Rohm i B. Przybylski. Geodynamics of South-Eastern part of the Central European subsidence zone. W: *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 9.3 (2012), s. 359–369

- [2] W. Rohm, Y. Yuan, B. Biadeglne, K. Zhang i J. L. Marshall. Ground-based GNSS ZTD/IWV estimation system for numerical weather prediction in challenging weather conditions. W: *Atmospheric Research* 138 (2014), s. 414–426
- [3] Y. Yuan, K. Zhang, W. Rohm, S. Choy, R. Norman i C.-S. Wang. Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS precise point positioning. W: *Journal of Geophysical Research - Atmospheres* (2014), n/a–n/a. ISSN: 2169-8996. DOI: 10.1002/2014JD021486
- [4] R. Norman, J. Le Marshall, W. Rohm, B. Carter, G. Kirchengast, S. Alexander, C. Liu i K. Zhang. Simulating the Impact of Refractive Transverse Gradients Resulting From a Severe Troposphere Weather Event on GPS Signal Propagation. W: *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE journaltitle of PP.99* (2014), s. 1–7. ISSN: 1939-1404. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2344091
- [5] T. Manning, W. Rohm, K. Zhang, F. Hurter i C.-S. Wang. Determining the 4D Dynamics of Wet Refractivity Using GPS Tomography in the Australian Region. W: *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet*. Springer Verlag, 2014
- [6] T. Manning, K. Zhang, W. Rohm, S. Choy i F. Hurter. Detecting Severe Weather using GPS Tomography: An Australian Case Study. W: *Journal of Global Positioning Systems* 11.1 (2012), s. 58–70. DOI: 10.5081/jgps.11.1.58

Doskonalenie warsztatu opracowania sygnału GNSS

W ramach prac nad analizą danych geologicznych wraz z wynikami obserwacji satelitarnych, przeprowadzono szereg obliczeń dla pomiarów okresowych z lat 2008, 2009, 2010 w oprogramowaniu Bernese 5.0, estymując prędkości wewnątrzpłytkowe punktów osnowy geodynamicznej [1], pozwoliło to na sformułowanie hipotezy o aktywnych tektonicznie obszarach południo-zachodniej Polski. Estymacja wektorów prędkości wymaga precyzyjnego modelowania wpływu innych czynników takich jak: tektonika płyt kontynentalnych, zegary satelitów, zegary odbiorników, orbity satelitów, jonosfera i troposfera.

W kolejnej pracy związanej wyłącznie z estymacją opóźnienia troposferycznego na potrzeby Australijskiego Biura Meteorologicznego, przeprowadzono eksperymenty numeryczne weryfikujące opóźnienie troposferyczne w kierunku zenitu (ZTD) oraz zintegrowaną zawartość pary wodnej (IWV) z obserwacji naziemnych stacji GNSS z danymi z numerycznych modeli prognozy pogody, obserwacji z automatycznych stacji meteorologicznych oraz radiosondaży.

Poddano testom rozwiązania oparte na obserwacjach różnicowych (DD) dla długich i krótkich wektorów (jako sieć i jako pojedyncze wektory) oraz precyzyjnych obserwacji autonomicznych (PPP). Oceniono także wpływ predykowanych orbit i poprawek zegarów na jakość estymowanych parametrów troposfery. Badania zostały przeprowadzone w warunkach występowania niebezpiecznych zjawisk pogodowych, tak by ocenić czy system GNSS jest w stanie dostarczać obserwacje do systemów prognoz pogody bez względu na warunki meteorologiczne.

W wyniku analiz numerycznych wykazano, że tak w technice PPP jak i DD, jakość estymacji przy wykorzystaniu precyzyjnych orbit i poprawek zegarów satelitów daje zbliżone rezultaty pozbawione w większości błędów systematycznych względem rozwiązania referencyjnego, a odchylenie standardowe jest zgodne z rozwiązaniami innych autorów [7, 8, 9] i jest na poziomie 10mm odchylenia standardowego. Natomiast zastosowanie produktów czasu rzeczywistego nie spowodowało żadnych negatywnych efektów w rozwiązaniu różnicowym sieciowym a miało negatywny wpływ na rozwiązanie PPP i pogorszenie parametrów dokładnościowych do poziomu 15mm.

Istotne, z punktu widzenia przyszłych zastosowań obserwacji GNSS w numerycznym prognozowaniu pogody, jest także poziom zmienności obserwacji w czasie, ponieważ często w przypadku estymacji opóźnienia z dużą częstotliwością nałożone są równania ograniczające zmienność tego parametru (absolutne) lub zmianę w kolejnych epokach (względne). Badania wykazały, że w przypadku obserwacji prowadzonych w sytuacji silnych gradientów poziomych, zmienność ZTD się podwaja w stosunku do sytuacji standardowej.

Rozwinięciem badań nad estymacją opóźnienia troposferycznego i monitorowaniem zawartości pary wodnej w atmosferze w czasie rzeczywistym, z użyciem techniki PPP i produktów czasu rzeczywistego tzn orbit i zegarów z serwisu IGS, jest praca [3]. Wspólnie z zespołem SPACE Research Centre z Uniwersytetu RMIT, przebudowaliśmy moduł, programu BNC odpowiedzialny za estymację opóźnienia troposferycznego, tak by uwzględniał: modele centrów fazowych anten odbiorników, modele pływów odceniczych na stacjach GNSS oraz podział opóźnienia na część mokrą i suchą. Przy pomocy danych z modelu GPT2 [10] uzyskano wartość opóźnienia dla części suchej na kierunku zenitalnym oraz funkcje mapujące dla części suchej i mokrej opóźnienia zgodnie ze wzorem:

$$STD = m_{dry} \cdot ZHD + m_{wet} \cdot ZWD \quad (9)$$

Estymowana poprawka, jako jeden z parametrów w filtrze Kalmana, stanowi zmianę opóźnienia w kierunku zenitalnym, z powodu niskiej jakości modelowania ZHD, zakładamy że jest to poprawka do opóźnienia całkowitego.

Konwersję na opóźnienie dla części mokrej wykonano przy pomocy parametrów z modelu VMF1-FC [11], bazujących na danych z numerycznych modeli prognoz pogody, oraz wyznaczonych przy pomocy temperatury z modelu GPT2 paramtertu II, według wzoru [12]:

$$PWV = ZWD \cdot \Pi \quad (10)$$

Przeprowadzono eksperymenty obliczeniowe dla 20 stacji IGS położonych w różnych strefach klimatycznych, od arktycznej do tropikalnej, i położonych na różnych wysokościach, od wysp na Pacyfiku po szczyty wulkaniczne Hawajów. Uzyskane wartości ZTD oraz Precipitable Water Vapour (PWV) zostały zweryfikowane przez obserwacje pochodzące z oficjalnego rozwiązania IGS (USNO) oraz z dostępnymi radiosondażami. Jakość estymacji ZTD w czasie rzeczywistym dla 17 z 20 stacji jest lepsza niż 13 mm, natomiast PWV jest estymowane z dokładnością lepszą niż 3 mm, co pozwala stwierdzić że może stanowić źródło danych dla numerycznych modeli prognozy pogody i nowcastingu.

Sygnal GNSS i jego pochodne jako narzędzie monitorowania troposfery

Wspólnie z naukowcami ze SPACE Research Centre prowadziliśmy badania teoretyczne, które pozwoliłyby stwierdzić jaki jest wpływ czynników atmosferycznych na propagację sygnału GNSS. Przy pomocy zaawansowanych metod śledzenia sygnału GNSS na drodze satelita - odbiornik [13], przeprowadzono eksperymenty polegające na propagacji sygnału odpowiadającego częstotliwości sygnału L1 GPS z lokalizacji satelity do odbiornika zlokalizowanego w miejscu stacji IGS MOBS, oraz na niskiej orbicie okołoziemskiej (LEO). W symulacjach uwzględniono wpływ jonosfery, oraz troposfery w różnym stanie pogodowym. Na podstawie wcześniejszych badań [5] znany był modelowy przykład trójwymiarowego rozkładu refrakcji dla aktywnej i spokojnej troposfery. Okazało się że zakrzywienie toru ze względu na występowania silnej refrakcji w przypadku obserwacji naziemnych jest zanedbywalnie małe (na poziomie 5 mm dla kąta elewacji 1°), natomiast w przypadku obserwacji na satelitach LEO (np. konstelacja COSMIC) wartość ta wynosi około 2 metrów, co jest wielkością istotną i może być jednym z powodów dla którego profilowanie dolnej części troposfery w obserwacjach z satelitów okultacyjnych jest ciągle niemożliwe.

Rozwinięcie monitorowania troposfery przy pomocy obserwacji GNSS jest także techniką tomografii. We współpracy grupą naukowców z RMIT oraz ETH Zürich zaimplementowano model tomograficzny autorstwa [14] w stanie Wiktoria (południowo-wschodnia Australia) używając do tego stacji GNSS należących do sieci GPSNet [5]. Opracowanie wymagało analiz numerycznych rozkładu poziomego i pionowego komórek modelu, czasu odpowiedzi modelu na zmianę warunków atmosferycznych i przeprowadzeniu pomiarów kontrolnych. Osatecznie przyjęto rozmiar komórki modelu 55 km w poziomie oraz 15 poziomów pionowych ustalonych według jednostajnego spadku refrakcyjności. Jakość rozwiązania tomograficznego dla krótkiego interwału obserwacji (24 godziny) oscylowała wokół 6mmkm^{-1} .

Model tomograficzny używając ustawień zoptymalizowanych poprzednio został następnie użyty do badania zmienności troposfery w trakcie silnych zjawisk burzowych (tzw. superkomórka burzowa) [6]. Przy użyciu teoretycznego modelu mezoskalowego systemu konwekcyjnego [15] i spodziewanych ruchów pionowych powietrza wyznaczono obszary troposfery podlegające konwekcji o dużej zawartości pary wodnej i odpowiadające silnym opadom a przez to niższą zawartością wilgotności. Na tej podstawie, oraz używając do weryfikacji położenia intensywnych opadów obserwacji radarowych, stwierdzono wysoki poziom zgodności obserwacji tomograficznej z dynamiką troposfery, co pozwala myśleć o aplikacji tej techniki w nowcastingu.

Bibliografia

- [1] P. Grzempowski, J. Badura, S. Cacoń, J. Kapłon, W. Rohm i B. Przybylski. Geodynamics of South-Eastern part of the Central European subsidence zone. W: *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 9.3 (2012), s. 359–369.

- [2] W. Rohm, Y. Yuan, B. Biadeglne, K. Zhang i J. L. Marshall. Ground-based GNSS ZTD/IWV estimation system for numerical weather prediction in challenging weather conditions. W: *Atmospheric Research* 138 (2014), s. 414–426.
- [3] Y. Yuan, K. Zhang, W. Rohm, S. Choy, R. Norman i C.-S. Wang. Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS precise point positioning. W: *Journal of Geophysical Research - Atmospheres* (2014), n/a–n/a. ISSN: 2169-8996. DOI: 10.1002/2014JD021486.
- [4] R. Norman, J. Le Marshall, W. Rohm, B. Carter, G. Kirchengast, S. Alexander, C. Liu i K. Zhang. Simulating the Impact of Refractive Transverse Gradients Resulting From a Severe Troposphere Weather Event on GPS Signal Propagation. W: *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE journaltitle of PP.99* (2014), s. 1–7. ISSN: 1939-1404. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2344091.
- [5] T. Manning, W. Rohm, K. Zhang, F. Hurter i C.-S. Wang. Determining the 4D Dynamics of Wet Refractivity Using GPS Tomography in the Australian Region. W: *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet*. Springer Verlag, 2014.
- [6] T. Manning, K. Zhang, W. Rohm, S. Choy i F. Hurter. Detecting Severe Weather using GPS Tomography: An Australian Case Study. W: *Journal of Global Positioning Systems* 11.1 (2012), s. 58–70. DOI: 10.5081/jgps.11.1.58.
- [7] A. Karabatić, R. Weber i T. Haiden. Near real-time estimation of tropospheric water vapour content from ground based GNSS data and its potential contribution to weather now-casting in Austria. W: *Advances in Space Research* 47.10 (2011), s. 1691–1703. ISSN: 0273-1177.
- [8] S. Jade, M. Vijayan, V. Gaur, T. P. Prabhu i S. Sahu. Estimates of precipitable water vapour from GPS data over the Indian subcontinent. W: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67.6 (2005), s. 623–635. ISSN: 1364-6826. DOI: 10.1016/j.jastp.2004.12.010.
- [9] S. I. Gutman i S. G. Benjamin. The Role of Ground-Based GPS Meteorological Observations in Numerical Weather Prediction. English. W: *GPS Solutions* 4 (4 2001), s. 16–24. ISSN: 1080-5370. DOI: 10.1007/PL00012860.
- [10] K. Lagler, M. Schindelegger, J. Böhm, H. Krásná i T. Nilsson. GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. W: *Geophysical Research Letters* 40.6 (2013), s. 1069–1073.
- [11] J. Boehm, J. Kouba i H. Schuh. Forecast Vienna Mapping Functions 1 for real-time analysis of space geodetic observations. W: *Journal of Geodesy* 83.5 (2009), s. 397–401.
- [12] J. Duan, M. Bevis, P. Fang, Y. Bock, S. Chiswell, S. Businger, C. Rocken, F. Solheim i in. GPS meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water. W: *Journal of Applied Meteorology* 35.6 (1996), s. 830–838.
- [13] R. Norman, J. Bennett, P. Dyson, J. Le Marshall i K. Zhang. A ray-tracing technique for determining ray tubes in anisotropic media. W: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 61.5 (2013), s. 2664–2675.

- [14] D. Perler, A. Geiger i F. Hurter. 4D GPS water vapor tomography: new parameterized approaches. W: *Journal of Geodesy* 85 (8 2011). 10.1007/s00190-011-0454-2, s. 539–550. ISSN: 0949-7714.
- [15] R. A. Houze. Mesoscale convective systems. W: *Reviews of Geophysics* 42.4 (2004).

W. Todd R. Houze