

UNIWERSYTET Przyrodniczy we Wrocławiu

Seminarium "Współczesne problemy podstawowych osnów geodezyjnych w Polsce" Grybów, 14-16 września 2016 r.

Estymacja opóźnienia troposferycznego z obserwacji GNSS na potrzeby meteorologii i pozycjonowania GNSS

> **Jan Kapłon** Instytut Geodezji i Geoinformatyki ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław jan.kaplon@igig.up.wroc.pl

Spis treści

- 1. Metodyka wyznaczania opóźnienia troposferycznego w kierunku zenitu i ukośnym oraz wyznaczanie zawartości pary wodnej w atmosferze,
- 2. Motywacja,
- 3. System NRT,
- 4. Ocena dokładności danych meteorologicznych z obserwacji GNSS,
- 5. Wpływ wyznaczania nieoznaczoności w czasie prawie-rzeczywistym na parametry troposferyczne,
- 6. Zastosowanie w meteorologii,
- 7. Zastosowanie w pozycjonowaniu,
- 8. Podsumowanie.

Atmosferyczne źródła zakłóceń sygnału GNSS



Opóźnienie troposferyczne sygnału GNSS

Troposfera jest ośrodkiem niedyspersyjnym dla sygnałów elektromagnetycznych do 15GHz. Zatem sygnał GNSS dla wszystkich częstotliwości (1,176 – 1,602 GHz) ulega w niej jednakowej refrakcji. Zatem, odległość satelita odbiornik (P_o^s, ρ_o^s) można wyrazić jako:

$$P_o^s = N * \lambda + \phi * \lambda + STD + \epsilon$$
 - dla obserwacji fazowych

$$ho_o^s = c * dt_o^s + STD + \epsilon$$
 - dla obserwacji kodowych

Opóźnienie sygnału (*STD* – Slant Total Delay) wywołane w neutralnej atmosferze przez refrakcję można wyrazić zgodnie z podziałem na części: hydrostatyczną (dry) i niehydrostatyczną (wet). W efekcie otrzymujemy opóźnienie hydrostatyczne (*SHD*) i niehydrostatyczne (*SWD*):

$$STD = \int (n-1)ds = 10^{-6} \int N_{dry}ds + 10^{-6} \int N_{wet}ds = SHD + SWD$$

Gdzie *n* to indeks refrakcyjności, a *N* to refrakcyjność (np. Essen and Froome 1951)

STD, ZTD oraz funkcje mapujące

Ponieważ opóźnienie zależy wprost od drogi pokonanej w troposferze, jest również zależne od kąta elewacji satelity e, którą to zależność można wyrazić za pomocą tzw. funkcji mapującej mf(e), a dowolne opóźnienie wyrazić w kierunku zenitu (ZTD - Zenith Total Delay, ZHD - Zenith Hydrostatic Delay, ZWD - Zenith Wet Delay):

$$mf(e)_{dry} = \frac{SHD}{STD}$$
, $mf(e)_{wet} = \frac{SWD}{STD}$

$$ZTD = SHD * mf_{dry}(e) + SWD * mf_{wet}(e)$$

$$STD = ZHD_{model(dry)} * mf_{dry}(e) + \dots \\ \dots + ZWD * mf_{wet}(e) + mf_{Grad} * (G_N * cos(A) + G_E * sin(A))$$

Dodatkowo, by usunąć korelację *ZTD* z wyznaczaną w syst. GNSS wysokością, estymuje się gradienty poziome opóźnienia (G_N, G_E) zależne od azymutu i kąta elewacji satelity. Ostatecznie w rozwiązaniu GNSS do równania odległości skośnej satelita – odbiornik wprowadza się hydrostatyczne opóźnienie skośne *ZHD* a priori (z modelu) i estymuje do niego poprawki będące częścią niehydrostatyczną (*ZWD*), otrzymując w efekcie opóźnienie skośne *STD*.

STD, ZTD oraz funkcje mapujące c.d.

Zus et al., 2014 Dousa et al., 2016

 $STD = ZHD_{model(dry)} * mf_{dry}(e) + ...$

 $\dots + ZWD * mf_{wet}(e) + \dots$

 $\dots + mf_{grad}(e) * \begin{bmatrix} G_N cos(A) + G_E sin(A) + \\ + G_{NN} cos^2(A) + G_{NE} cos(A) sin(A) + G_{EE} sin^2(A) \end{bmatrix}$

$$mf(e) = \frac{SD}{ZD} = \frac{1 + \frac{u}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{sin(e) + \frac{a}{sin(e) + \frac{b}{sin(e) + c}}}$$

 $mf_{grad}(e) = \frac{1}{sin(e) * tg(e) + 0.0032}$

Marini, 1972 Herring, 1992

Chen and Herring, 1997

Metodyka wyznaczania obserwacji skośnych

$$P_o^s = N * \lambda + \phi * \lambda + c(T^s - T_o) + ION + STD + E$$

 $E = MP + APC + \epsilon$

 $STD_{Red} = STD - (MP + APC) + \epsilon$

$$MP + APC = \frac{\sum_{i=1}^{n} E(5x5^{o})}{n}$$

 $STD_{RES} = STD_{GNSS} + E - (MP + APC)$

Metodyka wyznaczania obserwacji skośnych



Wyznaczenie kolumnowej zawartości pary wodnej

Wyznaczanie kolumnowej zawartości pary wodnej ponad stacją GNSS (*IWV* Integrated Water Vapour) odbywa się bezpośrednio z *ZWD* (Zenith Wet Delay) (Bevis et al., 1992, 1994; Kleijer, 2004);

$$IWV = \frac{ZWD}{Q}$$
, $Q = 10^{-6}R_w \left(k_2' + \frac{k_3}{T_M}\right)$

to stała gazowa pary wodnej,

 $\begin{array}{l} R_w &= 461.525 \pm 0.003 \ [\mathrm{J \ kg^{-1} \ K^{-1}}]; \\ k'_2 &= 24 \pm 11 \ [\mathrm{K \ hPa^{-1}}], \\ k_3 &= 3.75 \pm 0.03 \ [10^5 \ \mathrm{K}^2 \ \mathrm{hPa^{-1}}]; \\ T_M &\approx 70.2 \pm 0.72 \ * \ T0 \ [\mathrm{K}]; \\ T0; \end{array}$

to stałe refrakcji (np. Boudouris, 1963); to ważona średnia temp. pary wodnej w atmosferze to temperatura na powierzchni Ziemi.

Warto zauważyć, że do określenia zawartości pary wodnej nie wykorzystuje się tu pomiarów wilgotności. *ZHD* potrzebne do określenia *ZWD* (*ZWD* = *ZTD* – *ZHD*) może być określene z modelu Saastamoinena (1971) z użyciem obserwacji meteorologicznych:

$$ZHD = \frac{P}{1 - 0.00266 * \cos(2\phi) - 0.0000028R}$$

 $\begin{array}{l} P - \text{ciśn. powietrza na pow.,} \\ \hline \pmb{h} & \phi - \text{to szerokość elips.,} \\ h - \text{wysokość elipsoidalna} \end{array}$

Motywacja



Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Motywacja

Ref: GWV-01	Name: Hourly ZTD Product		Abbrev: HZTD
Туре	NRT Zenith Total Delay Product – standard hourly data		
Applications and users	Global and Regional NWP		
Characteristics and Methods	Standard GNSS processing		
Comments	Primary product for E-GVAP-II		
Generation frequency	Hourly		
Input data	Raw GNSS receiver data, external orbit/clock data		
Verification method	NWP, Radiosonde, WVR, WV Lidar		
Performance			
	Threshold	Target	Optimal
Accuracy	15 mm	10 mm	5 mm
Timeliness	2 h	1.5 h	1 h
Spatial coverage	Europe	Europe + N.America	Global
Horizontal Sampling	200 km	100 km	30 km
Dissemination			
Format	Means	Туре	
BUFR, netCDF	GTS, FTP	NRT	

(Source: Met Office, 2010, EIG EUMETNET GNSS Water Vapour Programme (E-GVAP-II), Product Requirements Document Version 1.0)

System wyznaczania parametrów troposferycznych z obserwacjiGNSS w trybie NRTParametersBernese GNSS Software v. 5.2

System wyznaczania parametrów troposfery z obserwacji GNSS bazuje na uruchamianym w trybie wsadowym scenariuszu obliczeniowym oprogramowania Bernese GNSS Software v. 5.2.

Obecnie system pobiera dane obserwacyjne w postaci plików RINEX, docelowo, dla estymacji w interwale 15 minutowym, konieczne jest uzyskanie dostępu do danych w czasie rzeczywistym.

Parameters	Bernese GNSS Software v. 5.2	
Period of use	Starting from September 2015	
Number of stations	310	
Elevation cutoff angle	5°	
Orbit/Clock/ERP	IGS Ultra-Rapid	
Processed window length	6 h	
GPS phase ambiguity handling	Baseline length dependent estimation:(L6/L3, L1/L2, L5/L3 with SIGMA strategy, L1/L2 with QIF strategy) (Dach et al., 2015)	
Interval of troposphere parameter estimation	30 min	
Troposphere a-priori model / mapping function (MF)	Saastamoinen (1972) Dry part only/ Dry Global MF (Boehm et al., 2006)	
Site-specific troposphere parameters	Estimated using Wet Global MF	
ZTD horizontal gradient model	Chen & Herring (1997)	
Troposphere parameters constraining	ZTD: 2mm, Gradients: 0.2 mm	
	UNIWERSYTET PRZYRODNICZY WE WROCŁAWIU	

Sieć "WUEL" oraz "WLIT" do wyznaczania ZTD w trybie NRT



Sieć "VICNET" do wyznaczania ZTD w trybie NRT



Ocena dokładności wyznaczania opóźnienia troposferycznego w kierunku zenitu



Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Ocena dokładności wyznaczania opóźnienia troposferycznego w kierunku zenitu



USNO US Naval Observatory: ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/tr oposphere/zpd (Hackman et al., 2015)



The Network of European Meteorological Services

Ocena dokładności wyznaczania opóźnienia troposferycznego w kierunku zenitu – wpływ wyznaczania nieoznaczoności



Statistics calculated for period 091 – 168 day of 2015

Ocena dokładności skośnego troposferycznego opóźnienia sygnału GNSS



Ocena dokładności skośnego troposferycznego opóźnienia sygnału GNSS



Ocena dokładności skośnego troposferycznego opóźnienia sygnału GNSS – GNSS4SWEC WG1



Ocena dokładności skośnego troposferycznego opóźnienia sygnału GNSS – porównanie z WVR



Kačmařík, et al., (2016)

Korelacja przestrzenna szeregów ZTD dla rozwiązań NRT sieci ASG-EUPOS (125 stacji, 120 kolejnych dni 2013 roku)



Korelacja przestrzenna szeregów ZTD – interpolacja ZTD

$$W1(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-2}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W2(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-2}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W3(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-3}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZTD} * \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZT} + \Delta H} \\ 0, if L > r \end{cases} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZT} + \Delta H} \\ 0, if L > r \end{array} \\ W4(L, m_{ZTD}, \Delta H)_{i} = \begin{cases} \frac{L^{-4}}{m_{ZT} + \Delta H} \\ 0, i$$

Mapa stacji użytych do interpolacji

Korelacja przestrzenna szeregów ZTD – interpolacja ZTD



Zastosowanie w meteorologii – asymilacja do NMP





TEST

- 7 radiosond,
- 4 pomiary na każdą 54 godzinną prognozę (12, 24,36, 48 h),
- 4 warianty:
 - Bazowy brak asymilacji,
 - WRFDA asymilacja ZTD ze 120 stacji ASG-EUPOS,
 - WRFDA 20 asymilacja z 20 stacji (EPN),
 - WRFDA 20 NoSE asymilacja z 20 stacji z usunięciem błędu systematycznego (ZTD_GNSS – ZTD_WRF)

WRF

- Siatka WRF 12x12km dla Europy oraz 4x4 km dla Polski,
- 47 poziomów pionowych,
- Warunki początkowe i brzegowe: GFS 0.5x0.5°

Karina Wilgan, Witold Rohm, Jakub Guzikowski, Jan Kaplon, Maciej Kryza, Pawel Hordyniec. (2016). 4DVAR assimilation of GNSS zenith path delays into a numerical weather prediction model in Poland. 16th EMS Annual Meeting & 11th European Conference on Applied Climatology, Trieste, 14.09.2016

Zastosowanie w meteorologii – asymilacja do NMP

 $\label{eq:precipitation} \begin{array}{l} \mbox{Precipitation Tendency from 2013-05-11_12:00:00 to 2013-05-11_13:00:00} (mm) \\ \mbox{Sea Level Pressure} \quad (hPa) \end{array}$



Precipitation Tendency from 2013-05-11_12:00:00 to 2013-05-11_13:00:00 (mm) Sea Level Pressure (hPa)



Efekt asymilacji ZTD na zgodności temperatur



Karina Wilgan, Witold Rohm, Jakub Guzikowski, Jan Kaplon, Maciej Kryza, Pawel Hordyniec. (2016). 4DVAR assimilation of GNSS zenith path delays into a numerical weather prediction model in Poland. 16th EMS Annual Meeting & 11th European Conference on Applied Climatology, Trieste, 14.09.2016

Efekt asymilacji ZTD na zgodności temperatur punktu rosy



Karina Wilgan, Witold Rohm, Jakub Guzikowski, Jan Kaplon, Maciej Kryza, Pawel Hordyniec. (2016). 4DVAR assimilation of GNSS zenith path delays into a numerical weather prediction model in Poland. 16th EMS Annual Meeting & 11th European Conference on Applied Climatology, Trieste, 14.09.2016

Efekt asymilacji ZTD na zgodności wilgotności względnej



Karina Wilgan, Witold Rohm, Jakub Guzikowski, Jan Kaplon, Maciej Kryza, Pawel Hordyniec. (2016). 4DVAR assimilation of GNSS zenith path delays into a numerical weather prediction model in Poland. 16th EMS Annual Meeting & 11th European Conference on Applied Climatology, Trieste, 14.09.2016

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Zastosowanie w meteorologii – monitoring zjawisk



Oddzielenie dwóch różnych mas powietrza

Estera Trzcina, Piotr Toma, Natalia Dymarska, Witold Rohm, Jan Kapłon, Jan Sierny, Marek Błaś, Maciej Kryza. (2016). NRT GNSS services for monitoring severe weather. IAG Comission 4 Symposium. (Prezentacja) Wrocław, 5-7.09.2016.

Zastosowanie w meteorologii – monitoring zjawisk



Uwalnianie ciepła utajonego

> Witold Kryza. e weathei Wrocław, Macie Dymarska, Błaś, ezentacj onitorin Natalia Marek Тота, Siern mposium Piotr rzcina, 0 20 201 Rohm, Estera (2016) 09. AG

Monitoring zjawisk - korelacja IWV z intensywnością opadów



Zastosowanie w pozycjonowaniu – informacja a priori dla PPP



Hadaś, T., Kaplon, J., Bosy, J., Sierny, J., & Wilgan, K. (2013). Near-real-time regional troposphere models for the GNSS precise point positioning technique. Measurement Science and Technology, 24(5), 055003.

Podsumowanie

Opóźnienie sygnału GNSS może być wyznaczane w czasie prawie rzeczywistym z dokładnością 5-10 mm, co przekłada się na błąd określenia zawartości pary wodnej o wartości 1kg/m².

Uczestnictwo w programie E-GVAP II i III oraz akcji COST ES1206 GNSS4SWEC zapewnia możliwość konfrontacji uzyskiwanych rezultatów troposferycznych z zewnętrznymi , niezależnymi źródłami danych, które potwierdzają wysoką zgodność wyników generowanych na UPWr z wynikami innych ośrodków badawczych.

Współpraca rozpoczęta ze środowiskiem meteorologicznym (UWr oraz IMGW) daje nadzieję, na włączenie do prognoz pogody dodatkowych 310 punktów podających aktualne dane o kolumnowej zawartości pary wodnej.

Pierwsze rezultaty zastosowania opóźnienia troposferycznego do wyznaczania pozycji, są zachęcające – w przypadku rozwiązań kinematycznych.

Podsumowanie

Ukończenie zadań postawionych przed WG1 projektu GNSS4SWEC wymaga zmiany interpretacji przepisów ustawy PGiK, tak aby dostęp do strumieni RT ze stacji ASG-EUPOS został uznany za "dostęp do danych", a nie jak dotychczas za płatny "dostęp do systemu teleinformatycznego".

Dziękuję za uwagę jan.kaplon@igig.up.wroc.pl