

Modelowanie stanu troposfery z wykorzystaniem obserwacji GNSS i meteorologicznych

Meteorologia GNSS

Powstały na Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu operacyjny serwis czasu rzeczywistego udostępnia wiarygodne informacje o ciśnieniu, temperaturze i zawartości pary wodnej dla dowolnego miejsca w kraju. Są one przydatne m.in. do redukcji opóźnienia troposferycznego w pozycjonowaniu GNSS.

Tomasz Hadaś, Jarosław Bosy, Jan Kapłon,
Witold Rohm, Jan Sierny, Karina Wilgan

Operowanie obserwacji z systemów nawigacji satelitarnej umożliwia określenie stanu atmosfery, ponieważ sygnał z satelitów jest opóźniony w wyniku przejścia przez jej warstwy: troposferę i jonosferę. Zdalną detekcję stanu troposfery z wykorzystaniem obserwacji z systemów GNSS nazywa się meteorologią GNSS. W połączeniu z informacjami o wartości podstawowych parametrów atmosfery: temperatury i ciśnienia atmosferycznego na powierzchni terenu, służy ona do określenia zawartości pary wodnej w troposferze. Parametr ten znajduje zastosowanie w numerycznych modelach prognozy pogody oraz w pozycjonowaniu satelitarnym. Znajomość przestrzennego rozkładu temperatury, ciśnienia atmosferycznego i wilgotności pozwala obliczyć na podstawie empirycznych wzorów opóźnienie troposferyczne w kierunku zenitu (ZTD, Zenith Total Delay). Następnie poprzez wykorzystanie funkcji mapujących można przeliczyć ZTD na opóźnienie skośne (STD, Slant Total Delay) i zredukować wpływ troposfery na obserwacje kodowe i fazowe, bez konieczności stosowania kombinacji liniowych obserwacji lub technik różnicowych.

W ramach realizacji grantu rozwojowego „Budowa modułów wspomagania serwisów czasu rzeczywistego systemu ASG-EUPOS” (ASG+) powstały moduły monitorowania i predykcji stanu troposfery z wysoką rozdzielczością czasowo-przestrzenną dla terytorium Polski [patrz też GEODETA 7/2013 – red.]. W wyniku badań prowadzonych w projekcie Narodowego Centrum Nauki pt. „NRT model stanu atmosfery dla obszaru Polski z pomiarów GNSS i meteorologicznych realizowanych na stacjach referencyjnych systemu ASG-EUPOS” i wyżej wymienionego grantu rozwojowego w Instytucie Geodezji i Geoinformatyki Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu opracowano dwa niezależne modele troposfery, które w połączeniu z systemem wzajemnej walidacji tworzą operacyjny serwis czasu rzeczywistego. Poprawa w pozycjonowaniu z wykorzystaniem tych serwisów polega na wyznaczeniu wpływu opóźnienia troposferycznego na podstawie faktycznych obserwacji zamiast z modeli deterministycznych. Jest to szczególnie korzystne w nietypowych warunkach pogodowych, przy krótkich sesjach obserwacyjnych oraz w pomiarach kinematycznych w czasie rzeczywistym.

• Fizyka troposfery

Troposfera jest najniższą (zaczyna się przy powierzchni Ziemi) i najcieńszą (grubość ok. 7-18 km) warstwą atmosfery, stanowiącą jednocześnie 80% jej całkowitej masy. Jest ośrodkiem niedyspersyjnym dla fal elektromagnetycznych o częstotliwości do 15 GHz, a więc także dla sygnałów GNSS. Opóźnienie troposferyczne nie zależy od częstotliwości sygnału GNSS, dlatego obserwacje kodowe i fazowe na różnych częstotliwościach obciążone są tym samym błędem. Uniemożliwia to utworzenie kombinacji liniowej obserwacji wolnej od wpływu troposfery, jak to ma miejsce w przypadku jonosfery. W związku z tym jedyną możliwością eliminacji wpływu troposfery jest wykorzystanie zewnętrznego modelu i/lub estymacja poprawek na podstawie danych obserwacyjnych.

Troposfera składa się z cząsteczek suchych gazów (głównie z azotu – 78%, i tlenu – 21%) oraz pary wodnej. Analogicznie w refrakcji troposferycznej możemy wyróżnić:

- składową suchą, której wpływ zależy od lokalnej temperatury i ciśnienia powietrza,
- składową mokrą, zależną od zawartości pary wodnej wzdłuż trasy sygnału GNSS.

Wartość składowej mokrej opóźnienia troposferycznego dla średnich szerokości geograficznych jest o rząd mniejsza od wartości składowej suchej, lecz zawartość pary wodnej, w przeciwieństwie do pozostałych cząsteczek, jest bardzo zmienna w czasie i przestrzeni, przez co trudno przewidzieć jej rozkład (Kleijer, 2004).

Całkowitą wartość opóźnienia troposferycznego w kierunku zenitu wyraża empiryczny wzór Saastamoinena (1972):

$$ZTD = 0,002277 \left[P_0 \left(\frac{1255}{T_0} + 0,05 \right) e_0 \right],$$

gdzie:

P_0 – ciśnienie atmosferyczne [mbar],

T_0 – temperatura [K],

e_0 – ciśnienie pary wodnej [mbar].

Opóźnienie suche w kierunku zenitu (ZHD, Zenith Hydrostatic Delay) dla dowolnego miejsca można modelować za pomocą praw dotyczących gazów idealnych i wyrazić funkcją empiryczną:

$$ZHD = 0,0022768 \frac{P_0}{f(\phi, h)}$$

$f(\phi, h) = 1 - 0,00266 \cos 2\phi - 0,00000028h,$

gdzie:

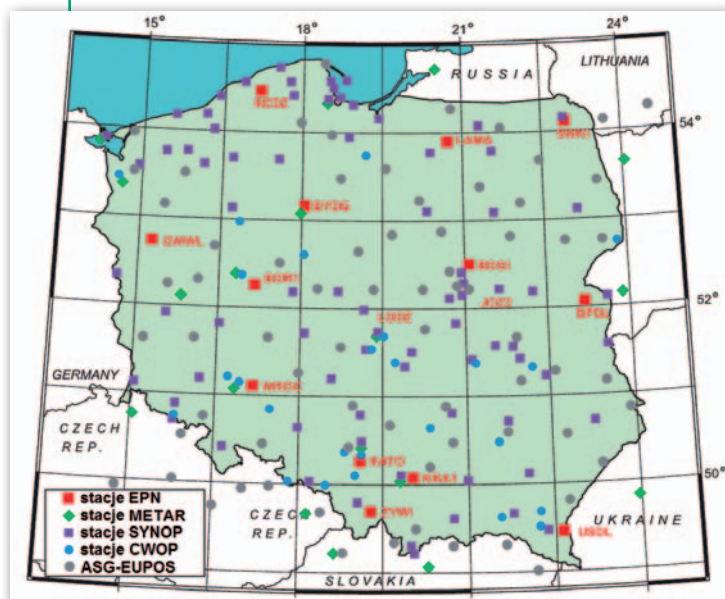
dla stacji sieci EPN, zapewnia jednak najwyższą jakość produktu referencyjnego. Analizy różnic w uzyskanych wartościach ZTD pokazały dużą zgodność wyznaczeń. Odchylenie standardowe różnic kształtuje się na poziomie 4,8 mm w porównaniu z rozwiązaniem IGS oraz 6,3 mm w porównaniu z wynikami z WAT. Aktualnie wyniki na stacjach EPN porównywane są z wynikami czasu prawie rzeczywistego innych centrów obliczeniowych włączonych do projektu E-GVAP (<http://egvap.dmi.dk>) oraz numerycznym modelem prognozy pogody HIRLAM publikowanym przez brytyjski serwis meteorologiczny MetOffice.

Uzyskane rezultaty świadczą o pełnej operacyjności modułu wyznaczania ZTD w czasie prawie rzeczywistym. Porównanie z zewnętrznymi źródłami danych pokazuje, że aktualnie osiągnięta dokładność wyznaczanego ZTD kształtuje się na poziomie poniżej 10 mm (Bosy i in., 2012). Model troposfery bazujący na obserwacjach GNSS nazywa się IGGHZ-G (IGG pochodzi od nazwy instytutu, H oznacza rozdzielczość godzinną (*hour*), Z – kierunek do zenitu, G – dane GNSS).

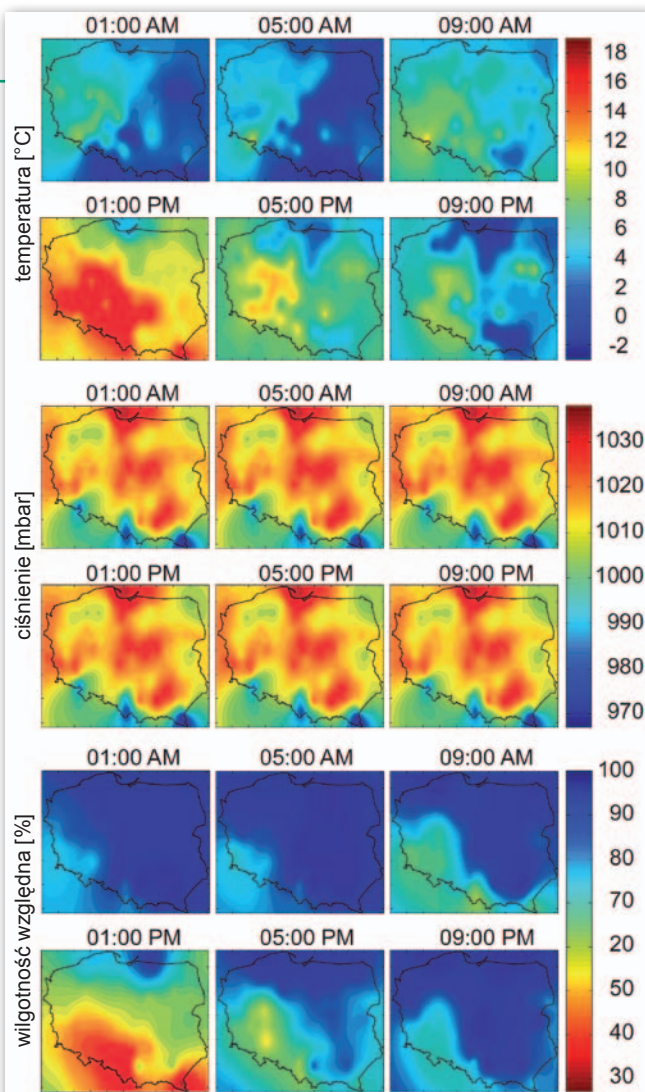
• Model meteorologiczny (IGGHZ-M)

Znajomość trzech parametrów atmosfery w punkcie pomiarowym pozwala wyznaczyć wartość ZTD za pomocą wzoru Saastamoinena. Wartości tych parametrów mogą pochodzić z empirycznych modeli rozkładu parametrów meteorologicznych, np. GPT (Boehm i in., 2007) czy UNB3 (Leandro i in., 2006), zawierających wartości uśrednione z minionych lat. Różnica pomiędzy wartościami z modelu a stanem rzeczywistym skutkuje koniecznością estymacji poprawek do obliczonego ZTD. Dla pomiarów w czasie rzeczywistym lub przy krótkich sesjach pomiarowych zaaplikowany model troposfery musi być dokładny i wiarygodny, najlepiej, gdy pochodzi z faktycznych pomiarów meteorologicznych. Ponieważ nie ma możliwości wyposażenia każdego odbiornika GNSS w dokładne i skalibrowane czujniki meteorologiczne, potrzebny jest zewnętrzny model parametrów meteorologicznych: temperatury, ciśnienia i wilgotności.

Na terenie Polski funkcjonują liczne sieci stacji meteorologicznych, w tym stacje SYNOP (należące do Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej), METAR (umieszczone na lotniskach) i CWOP (prywatne i publiczne stacje meteorologiczne działające w ramach Citizen Weather Observer Program). Ponadto na 15 polskich stacjach sieci EPN zainstalowana jest wysokiej klasy infrastruktura meteorologiczna: 14 sensorów Pa-



Rys. 3. Nazienne stacje meteorologiczne sieci EPN, METAR, SYNOP, CWOP oraz ASG-EUPOS



Rys. 4. Interpolacja parametrów meteorologicznych dla obszaru Polski 7 listopada 2011 r. (interwał 4 godz.)

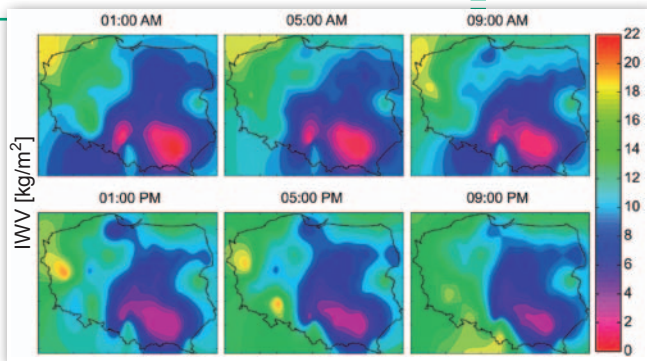
roscentific, Inc. MET4A oraz czujnik NAVI Ltd HPTL.3A na stacji w Borowcu (BOR1). Jednorodna, skalibrowana aparatura umieszczona w pobliżu anten GNSS stanowi referencję dla pozostałych sieci czujników. Rozkład stacji meteorologicznych przedstawiony jest na rysunku 3.

Wszystkie czujniki meteorologiczne dostarczają informacje o:

- ciśnieniu atmosferycznym (w zakresie 500-1100 hPa, dokładność $\pm 0,08$ hPa),
- temperaturze powietrza (od -50 do +60°C, dokładność $\pm 0,2$ °C),
- wilgotności względnej (od 0 do 100%, dokładność ± 2 %).

Dane dostępne są z różną rozdzielczością czasową (SYNOP: 1-6 h, METAR: 0,5 h, EPN: 30 s, CWOP: 5-30 min), w różnym standardzie. Integracja sieci i weryfikacja poszczególnych czujników danych wymaga wykorzystania zewnętrznych źródeł i metodologii opisanej w pracy (Bosy i in., 2010). Zastosowano numeryczny model terenu SRTM o rozdzielczości poziomej 90 m, aby zweryfikować podawaną przez czujniki wysokość (ma ona bezpośredni wpływ na wskazywaną wartość ciśnienia atmosferycznego). Przeanalizowano także długie szeregi czasowe obserwacji w porównaniu z danymi z numerycznego modelu prognozy pogody COAMPS (Hodur, 2002), aby znaleźć systematyczne błędy czujników.

Zintegrowane dane gromadzone są w bazie danych i poddawane procesowi interpolacji zgodnie z procedurą opisaną przez Borkowskiego i in. (2002). Wartości parametrów (temperatury T , ciśnienia P , wilgotności względnej H) obliczane są jako średnia ważona z danych pomiarowych na 4 najbliższych stacjach meteorologicznych według formuły:



Rys. 5. Rozkład 2D skumulowanej zawartości pary wodnej (IWV) w atmosferze nad obszarem Polski 7 listopada 2011 r. (interwał 4 h)

$$\bar{s} = \frac{\sum_{i=1}^4 s_i w_i}{\sum_{i=1}^4 w_i}$$

gdzie

\bar{s} – interpolowana wartość parametru,

i – indeks stacji meteorologicznej,

s_i – wartość parametru pomierzona na i -tej stacji,

w_i – waga dla i -tej stacji.

Wagi dla poszczególnych parametrów obliczane są według różnych formuł:

• dla temperatury:

$$w_i = (h - h_i)^4,$$

gdzie

h – wysokość punktu interpolowanego,

h_i – wysokość i -tej stacji;

• dla wilgotności względnej:

$$w_i = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (h - h_i)^2]^{-2},$$

gdzie

(x, y, h) – współrzędne płaskie i wysokość punktu interpolowanego,

(x_i, y_i, h_i) – współrzędne płaskie i wysokość i -tej stacji;

• dla ciśnienia atmosferycznego:

jak dla wilgotności względnej, przy czym ciśnienie pomierzone P_i^0 na stacjach jest najpierw przeliczane na ciśnienie P_i na wysokości interpolowanej stacji zgodnie ze znaną formułą barometryczną:

$$\log P_i = \log P_i^0 + \frac{h_i - h}{18400 \left(1 + \frac{T - T_i}{546}\right)}$$

Przykład interpolacji parametrów meteorologicznych przedstawia rys. 4. Model troposfery bazujący na obserwacjach meteorologicznych nazywa się IGGHZ-M (M – meteorologiczny).

• Modelowanie pary wodnej

Znajomość opóźnienia troposferycznego wyznaczonego z obserwacji GNSS oraz składowej hydrostatycznej obliczonej na podstawie znajomości ciśnienia pozwala w sposób wiarygodny i dokładny obliczyć wartość opóźnienia mokrego (ZWD, Zenith Wet Delay):

$$ZWD = ZTD - ZHD.$$

Bezpośrednio z ZWD można uzyskać informację o skumulowanej zawartości pary wodnej (IWV, Integrated Water Vapor) nad stacją GNSS na podstawie równania (Bevis i in. 1992):

$$IWV = \frac{ZWD}{10^{-6} \cdot R_w} \left(k_2' + \frac{k_3}{T_M} \right)^{-1},$$

gdzie

$R_w = 461,525 \pm 0,003$ [J·kg⁻¹·K⁻¹] – stała gazowa dla pary wodnej,

$k_2' = 24 \pm 11$ [K·hPa⁻¹], $k_3 = 3,75 \pm 0,03$ [10⁵·K²·hPa⁻¹] – stałe refrakcji,

$T_M \approx 70,2 + 0,72 \cdot T_0$ [K] – średnia ważona temperatura pary wodnej w atmosferze,

T_0 [K] – temperatura na powierzchni (Mendes, 1999).

Znając rozkład ciśnienia oraz temperatury powietrza na obszarze sieci GBAS (w tym przypadku ASG-EUPOS), można za pomocą powyższej formuły opracować dwuwymiarowy model zawartości pary wodnej (rys. 5). W modelu tym nie ma żadnych założeń dotyczących wartości ciśnienia i temperatury w poszczególnych profilach troposfery. Wystarczająca jest znajomość tych parametrów na powierzchni terenu. Informacja o wilgotności względnej, która zazwyczaj jest parametrem najslabiej wyznaczonym, także nie ma w tym przypadku zastosowania.

Wyznaczenie przestrzennego rozkładu pary wodnej w atmosferze wymaga zastosowania techniki zwanej tomografią GNSS. Wykorzystuje ona informacje o opóźnieniu skośnym do satelitów STD oraz wartości parametrów meteorologicznych pochodzących z pomiaru i numerycznych modeli prognozy pogody (NWP, *numerical weather prediction*). Dane z modelu NWP stosowane są do weryfikacji i kalibracji modelu tomograficznego.

Przebieg sygnału nad obszarem sieci stacji permanentnych dzieli się na prostopadłościennie fragmenty ułożone w 7 warstwach o grubości 1 km każda (rys. 6). Taka koncepcja podziału dyskretnego pokrywa się z organizacją struktur w numerycznych modelach prognozy pogody. Ograniczenie modelu do wysokości 7 km wynika z niskiej zdolności modelu tomograficznego do wykrywania zmian rozkładu pary wodnej. Przestrzeń na zewnątrz obszaru zainteresowań uzupełniana jest danymi z numerycznego modelu prognozy pogody, aby wykorzystać informację o sygnałach przecinających model przez ściany boczne.

W aktualnie opracowanym modelu (TOMO2) nakłada się

warunek minimalnych ograniczeń na niewiadome, obserwacje a priori albo na wszystkie parametry wspólnie. Uzyskuje się układ równań łączących opóźnienia skośne SWD z refrakcyjnością mokrą N_w :

$$\begin{bmatrix} SWD \\ N_{apriori} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A_{apriori} \\ W \end{bmatrix} \cdot N_w,$$

gdzie

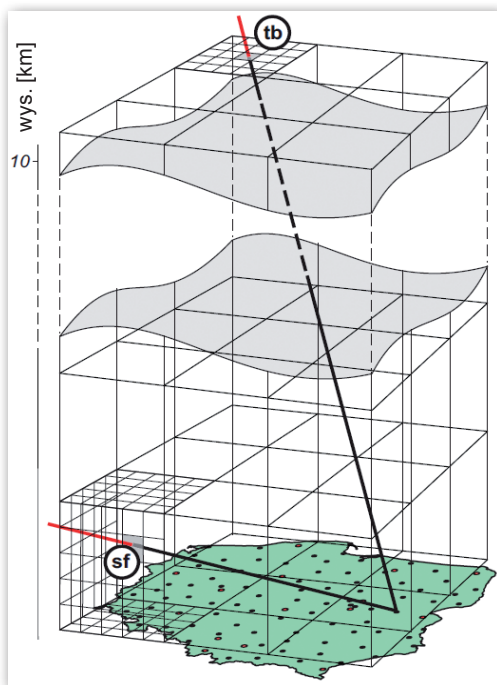
$N_{apriori}$ – początkowy współczynnik dla refrakcji mokrej,

A – macierz planu,

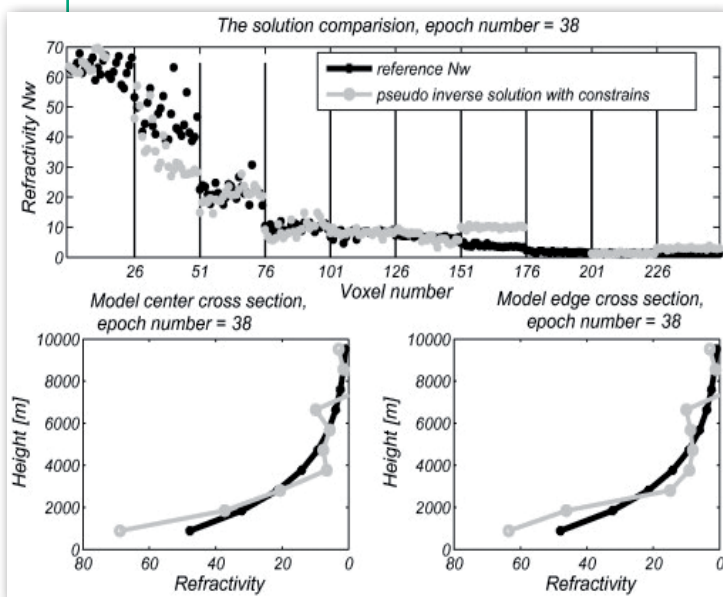
W – warunki nałożone na niewiadome (Rohm, 2013).

Niewiadome N_w wyznacza się za pomocą algorytmu dekompozycji pojedynczej wartości (SVD, *singular value decomposition*).

Jakość rozwiązania zależy od liczby i jakości obserwacji GNSS, te z kolei – od konstelacji satelitów oraz odległości między odbiornikami naziemnymi. Na podstawie przeprowadzonej analizy opartej na prawie przenoszenia się błędów stwierdzono, że dokładność rozwiązania powinna być lepsza niż 2,0 mm/km, zakłada-



Rys. 6. Przebieg sygnału przez kolejne fragmenty przestrzeni. Rozpatruje się dwa przypadki: kiedy sygnał opuszcza model z boku (sf) lub przez jego górną powierzchnię (tb)



Rys. 7. Rozwiązanie tomograficzne dla SWD z obserwacji GNSS (szary) w stosunku do referencyjnych wartości refrakcyjności uzyskanej z modelu COAMPS (czarny)

jąc, że standardowe gradienty temperatury w troposferze wyrażone przez ciśnienie pary wodnej będą nie gorsze niż 1 hPa (Rohm, 2012).

Weryfikacja modelu tomograficznego została przeprowadzona dla obszarów górskich (Rohm i Bosy, 2011), charakteryzujących się dużą zmiennością parametrów meteorologicznych. Wartości refrakcyjności uzyskane z modelu tomograficznego porównano z wartościami podawanymi przez numeryczny model prognozy pogody COAMPS (rys. 7). Świadczy to o poprawności działania modelu szczególnie w przypadku występowania anomalii w poszczególnych warstwach atmosfery. Zaletą stosowania modelu tomograficznego jest jego ściśle powiązanie z obserwacjami i mniejszy stopień komplikacji modelu niż w NWP.

• Model zintegrowany

Rozwój przedstawionych modeli stanu troposfery zmierza w kierunku utworzenia zintegrowanego modelu atmosfery (rys. 8). Modele IGGHZ-G oraz IGGHZ-M – bazujące na niezależnych

zbiorach danych – mogą podlegać wzajemnej weryfikacji, która może zostać dodatkowo rozbudowana o porównania z zewnętrznym numerycznym modelem pogody. Wykorzystanie informacji z trzech źródeł pozwala budować dwu- i trójwymiarowe modele rozkładu pary wodnej w atmosferze.

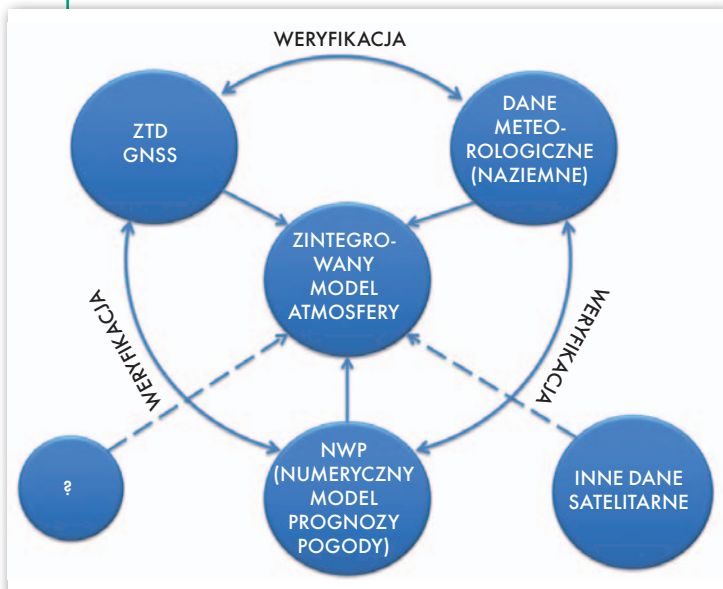
Informacje o ZTD wystymowane z obserwacji GNSS mogą być asymilowane do numerycznych modeli prognozy pogody, zwiększając wiarygodność i dokładność prognoz. Powierzchniowy rozkład ciśnienia i temperatury powietrza na terenie całego kraju w połączeniu z informacją o przestrzennej zawartości pary wodnej wzdłuż trasy sygnału GNSS pozwoli z dużą dokładnością wyznaczyć wartość opóźnienia troposferycznego w kierunku do satelity. Informacje te znajdą zastosowanie w przypadku pomiarów w krótkich sesjach pomiarowych (Paziewski i in., 2012) lub w pomiarach w czasie rzeczywistym, szczególnie technikami autonomicznymi, np. Precise Point Positioning (Hadaś i in., 2013). Aktualny stan działania modeli troposfery można śledzić poprzez stronę internetową www.igig.up.wroc.pl/igig/.

Tomasz Hadaś, Jarosław Bosy, Jan Kapłon,
Witold Rohm, Jan Sierny, Karina Wilgan

Instytut Geodezji i Geoinformatyki,
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Literatura

- Bevis M., Businger S., Herring T., Rocken C., Anthes R., Ware R., 1992: GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research (D)*, 15787-15801;
- Boehm J., Heinkelmann R., Schuh H., 2007: Short note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, Vol. 81, 679-683;
- Borkowski A., Bosy J., Kontny B., 2002: Meteorological data and determination of heights in local GPS networks – preliminary results. *Electronical Journal of Polish Agricultural Universities, Geodesy and Cartography* 5;
- Bosy J., Rohm W., Borkowski A., Kroszczyński K., Figurski M., 2010: Integration and verification of meteorological observations and NWP model data for the local GNSS tomography. *Atmospheric Research* 96, 522-530;
- Bosy J., Kapłon J., Rohm W., Sierny J., Hadaś T., 2012: Near real-time estimation of water vapour in the troposphere using ground GNSS and the meteorological data. *Annales Geophysicae*, Vol. 30 No., Göttingen, Germany 2012, pp. 1379-1391;
- Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M., 2007: Bernese GPS Software Version 5.0. Astronomical Institute, University of Bern, Bern;
- Hadaś T., Kapłon J., Bosy J., Sierny J., Wilgan K., 2012: Near-real-time regional troposphere models for the GNSS precise point positioning technique. *Measurement Science and Technology*, Vol. 24 No. 5;
- Hodur R.M., 2002: The Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS). *Oceanography: The Oceanography Society*, 200, 89-98;
- Kleijer F., 2004: Troposphere Modeling and Filtering for Precise GPS Leveling. Ph.D. thesis, Department of Mathematical Geodesy and Positioning, Delft University of Technology;
- Leandro R.F., Santos M.C., Langley R.B., 2006: UNB neutral atmosphere models: development and performance. *Proceedings of ION 2006 National Technical Meeting of The Institute of Navigation (Monterey, CA, 18-20 January 2006)*, 564-573;
- Mendes V.B., 1999: Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques. Ph.D. thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada;
- Paziewski J., Wielgosz P., Krypiak-Gregorczyk A., Stępnik K., Krukowska M., Kapłon J., Sierny J., Hadaś T., Bosy J., 2012: Fast-static GPS positioning with external tropospheric corrections derived in near real-time. *IGS Workshop*, 23-27 lipca 2012, UWM Olsztyn;
- Rohm W., 2012: The precision of humidity in GNSS tomography, *Atmospheric Research* 107, 69-75;
- Rohm W., 2013: The ground GNSS tomography – unconstrained approach. *Advances in Space Research*, Vol. 51 No. 3, 2013, pp. 501-513;
- Rohm W., Bosy J., 2011: The verification of GNSS tropospheric tomography model in a mountain area. *Advanced in Space Research* 47, 1721-1730;
- Saastamoinen J., 1972: Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. *The Use of Artificial Satellites for Geodesy. Geophysics Monograph Series*, Vol. 15, 247-251.



Rys. 8. Schemat zintegrowanego modelu troposfery z zasadami weryfikacji danych