

Modelowanie stanu atmosfery z obserwacji GNSS i meteorologicznych

**Jarosław BOSY (1) Witold ROHM (1,2) Jan KAPŁON (1)
Jan SIERNY(1) Tomasz HADAŚ (1) Karina WILGAN (1)**

(1) Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

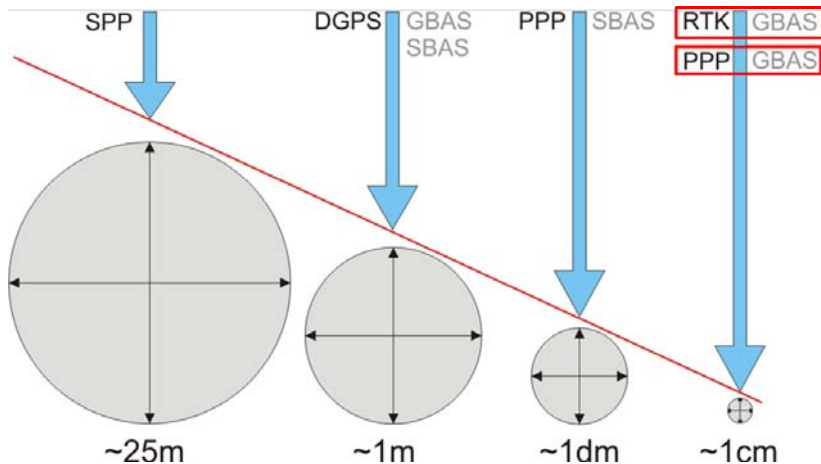
(2) Royal Melbourne Institute of Technology, Australia



Skład osobowy



Motywacja geodezyjna



Motywacja meteorologiczna

Meteorologia GNSS jest to zdalne sondowanie atmosfery w wykorzystaniem sygnałów GNSS. Ciągłe obserwacje z odbiorników GNSS stanowią doskonałe narzędzie do badania atmosfery ziemskiej.

Istnieje wiele zastosowań meteorologii GNSS :

Motywacja meteorologiczna

Meteorologia GNSS jest to zdalne sondowanie atmosfery w wykorzystaniu sygnałów GNSS. Ciągłe obserwacje z odbiorników GNSS stanowią doskonałe narzędzie do badania atmosfery ziemskiej.

Istnieje wiele zastosowań meteorologii GNSS :

- Klimatologia - duża ilość jednolitych stacji, równomiernie rozłożonych, 15 letnie ciągłe obserwacyjne.

Motywacja meteorologiczna

Meteorologia GNSS jest to zdalne sondowanie atmosfery w wykorzystaniu sygnałów GNSS. Ciągłe obserwacje z odbiorników GNSS stanowią doskonałe narzędzie do badania atmosfery ziemskiej.

Istnieje wiele zastosowań meteorologii GNSS :

- Klimatologia - duża ilość jednolitych stacji, równomiernie rozłożonych, 15 letnie ciągi obserwacyjne.
- Meteorologia synoptyczna - Opóźnienia troposferyczne jako dodatkowe dane dla modeli NWP.

Motywacja meteorologiczna

Meteorologia GNSS jest to zdalne sondowanie atmosfery w wykorzystaniem sygnałów GNSS. Ciągłe obserwacje z odbiorników GNSS stanowią doskonałe narzędzie do badania atmosfery ziemskiej.

Istnieje wiele zastosowań meteorologii GNSS :

- Klimatologia - duża ilość jednolitych stacji, równomiernie rozłożonych, 15 letnie ciągi obserwacyjne.
- Meteorologia synoptyczna - Opóźnienia troposferyczne jako dodatkowe dane dla modeli NWP.
- Nowcasting - Opóźnienia troposferyczne jest standardowym produktem czasu rzeczywistego używanym jako syntetyczny miernik stanu atmosfery.

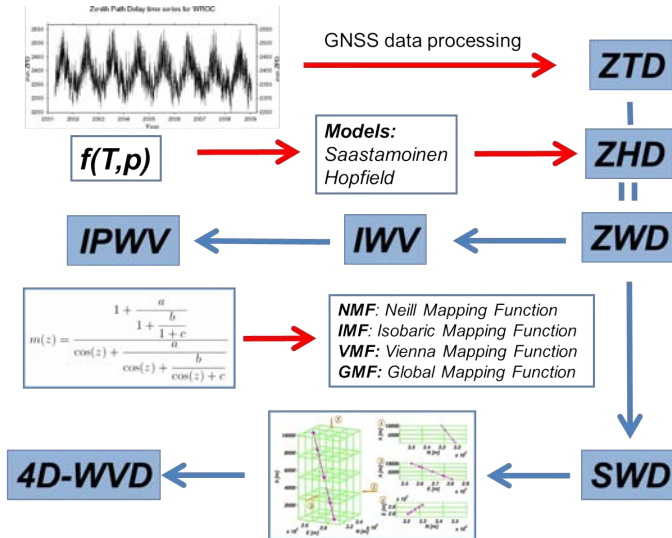
Motywacja meteorologiczna

Meteorologia GNSS jest to zdalne sondowanie atmosfery w wykorzystaniem sygnałów GNSS. Ciągłe obserwacje z odbiorników GNSS stanowią doskonałe narzędzie do badania atmosfery ziemskiej.

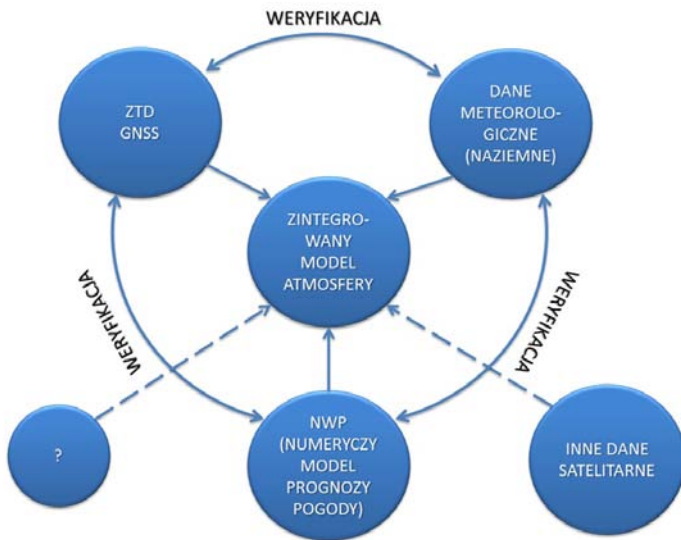
Istnieje wiele zastosowań meteorologii GNSS :

- Klimatologia - duża ilość jednolitych stacji, równomiernie rozłożonych, 15 letnie ciągi obserwacyjne.
- Meteorologia synoptyczna - Opóźnienia troposferyczne jako dodatkowe dane dla modeli NWP.
- Nowcasting - Opóźnienia troposferyczne jest standardowym produktem czasu rzeczywistego używanym jako syntetyczny miernik stanu atmosfery.
- 4D Monitorowanie - Opóźnienie troposferyczne jest wykorzystywane do budowy modelu tomografii celem opisu przestrzennych i czasowych właściwości troposfery nad siecią odbiorników GNSS.

Metodyka



Schemat modelu stanu troposfery



GBAS - Active Geodetic Network ASG-EUPOS



ASG-EUPOS - 2012:

GBAS - Active Geodetic Network ASG-EUPOS



ASG-EUPOS - 2012:

78 Polskie stacje
referencyjne GPS;

GBAS - Active Geodetic Network ASG-EUPOS



ASG-EUPOS - 2012:

- 78 Polskie stacje referencyjne GPS;
- 22 Polskie stacje referencyjne GPS/GLONASS;

GBAS - Active Geodetic Network ASG-EUPOS



ASG-EUPOS - 2012:

- 78 Polskie stacje referencyjne GPS;
- 22 Polskie stacje referencyjne GPS/GLONASS;
- 22 Zagraniczne stacje referencyjne EUPOS;

GBAS - Active Geodetic Network ASG-EUPOS

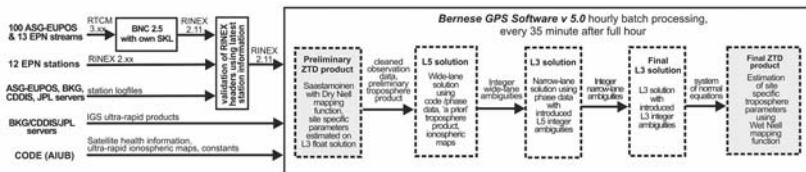


ASG-EUPOS - 2012:

- 78 Polskie stacje referencyjne GPS;
- 22 Polskie stacje referencyjne GPS/GLONASS;
- 22 Zagraniczne stacje referencyjne EUPOS;
- 15 Polskie stacje referencyjne włączone do sieci EUREF Permanent Network.

Model ZTD z obserwacji GNSS - IGGHZ-G

Schemat procesu obliczeniowego podwójnych różnic



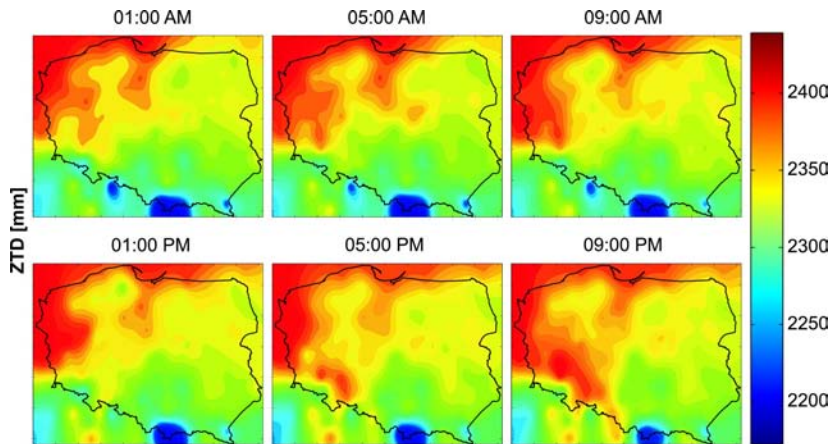
Tab. 1. Charakterystyka strategii L5/L3

Układ współrzędnych	ITRF 2008 (na epokę pomiaru)
Średnia liczba przetworzonych stacji	114
Długość okna obserwacyjnego	12 godz.
model ZTD a'priori/funkcja mapująca	Saastamoinen/Dry Niell
Estymowany model ZTD	Wet Niell
Model jonosfery	CODE ultra-rapid
Rozwiązanie nieoznaczoności	wide-lane (L5) & narrow-lane (L3)
Średni procent wyznaczonych nieozn.	94% (L5) & 86% (L3)

Wykres przedstawia rozbieżności ZTD (mm) dla 101 stacji. Oś pionowa (Y) przedstawia rozbieżności ZTD w mm, z zakresu od -100 do 100. Oś pozioma (X) przedstawia listę stacji. Wykres jest podzielony na dwie części przez pionową linię. Każda stacja ma swój własny zestaw danych, który może być reprezentowany przez kropki, słupki lub inne symbole, z dodatkowymi liniami trendu.

9/45

Przykładowe mapy ZTD , dzień 311, rok 2011



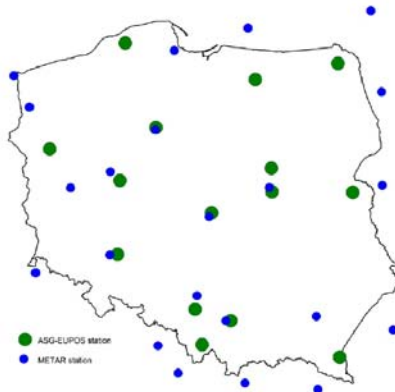
Czujniki meteorologiczne - stacje EPN



zbiory RINEX M:

```
11 03 17 20 00 01 989.4 5.3 94.7  
11 03 17 20 00 31 989.4 5.3 94.8  
11 03 17 20 01 01 989.4 5.3 94.7  
11 03 17 20 01 31 989.4 5.4 94.8  
11 03 17 20 02 01 989.4 5.3 94.7  
11 03 17 20 02 31 989.4 5.3 94.7  
11 03 17 20 03 01 989.4 5.3 94.7
```

Czujniki meteorologiczne - stacje METAR



Stacja meteorologiczna Warsaw-Okęcie
Airport (<http://www.imgw.pl>)

zbiór METAR:

METAR: 2011/04/01 00:00 EPWR 010000Z
23006KT 200V260 9999 -RA FEW013
BKN026 13/09 Q1016

Czujniki meteorologiczne - stacje SYNOP



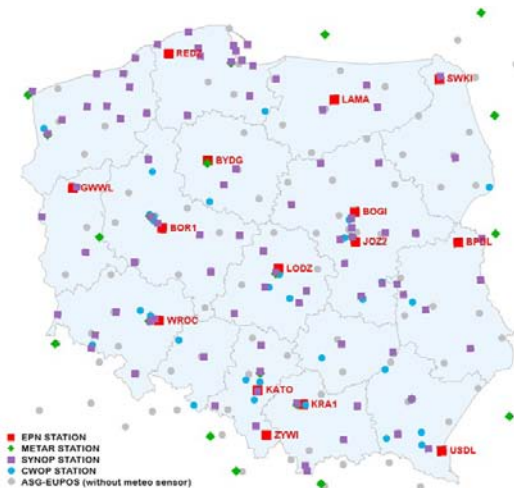
zbiór SYNOP:

```
12100,2011,03,24,06,00,AAXX 24061 12100  
11456 82706 10041 20023 30263 40270  
54000 60002 710// 885// 333 10062 20035  
30002 55083 21497 91011 91111 93000=
```

```
12100,2011,03,24,12,00,AAXX 24121 12100  
12965 12606 10069 20044 30255 40262  
58003 60001 80001 333 91011 91114 93000=
```

```
12100,2011,03,24,18,00,AAXX 24181 12100  
12965 22704 10061 20030 30235 40242  
55006 60002 80002 333 10081 20034 91011  
91114 93000=
```

Dane meteorologiczne



15 czujników
meteorologicznych
na stacjach EPN (Euref
Permanent Network)

21 stacji
meteorologicznych
ulokowanych na
lotniskach (stacje Metar)

96 stacji synoptycznych
IMGW (Institute of
Meteorology and Water
Management)

30 stacji cywilnych
CWOP (Citizen Weather
Observer Program)

Format danych meteorologicznych



Różna rozdzielczość czasowa:

EPN/ASG-EPOS: 30 sekund
 METAR: 30 minut
 SYNOP: ~1-6 godzin
 CWOP: ~ 5-30 minut

Numeryczny Model Prognozy Pogody (NWP) COAMPS



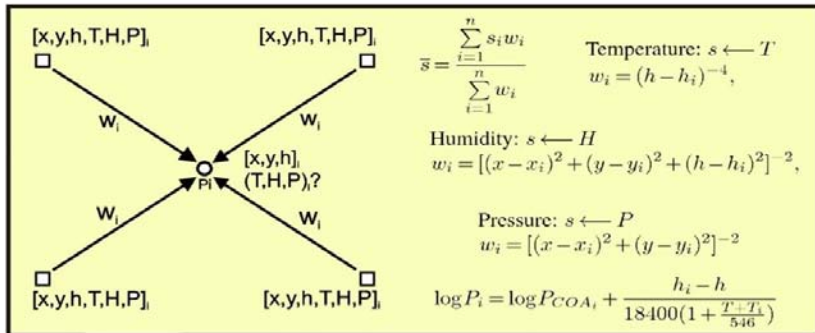
Siatka COAMPS (Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System)

4-wymiarowa macierz zawierająca informacje o ciśnieniu atmosferycznym, temperaturze i względnej wilgotności

Wymiary: 145x169x30 węzłów

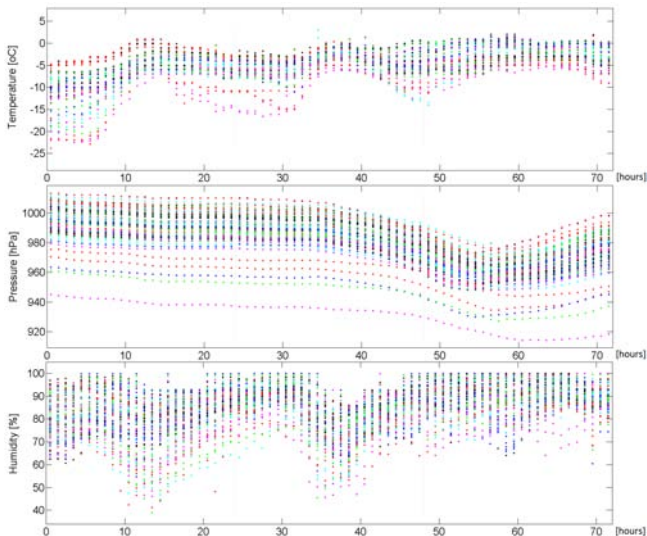
Prognozy na 24 godziny, z rozdzielczością czasową godziną, podawane o godz: 0:00 i 12:00

Metoda interpolacji parametrów meteorologicznych

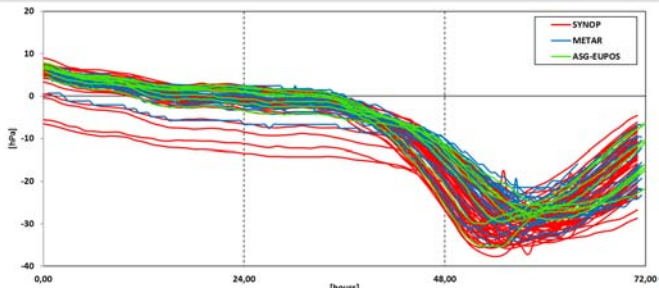


(Borkowski A., Bosy J., Kontny B. *Meteorological Data and Determination of Heights in Local GPS Networks - Preliminary Results. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities (EJPAU), s. Geodesy and Cartography, Vol. 5 No. 2, Wrocław 2002*)

Przykłady interpolacji parametrów meteorologicznych

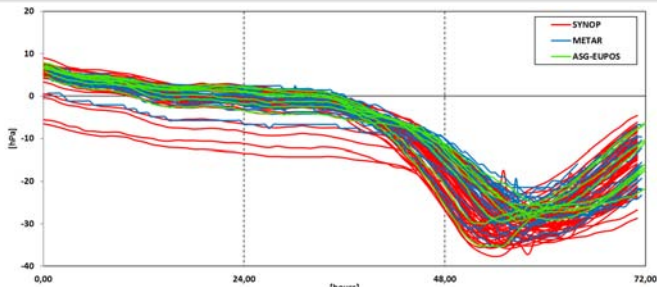


Porównania



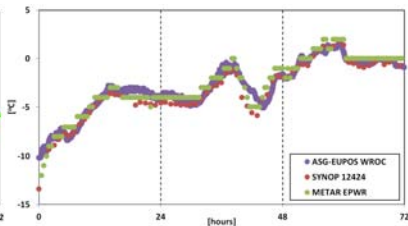
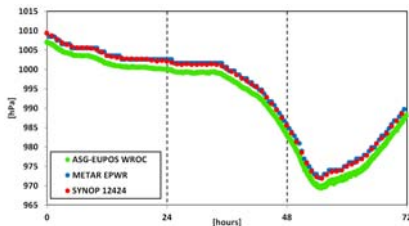
GPT

Porównania

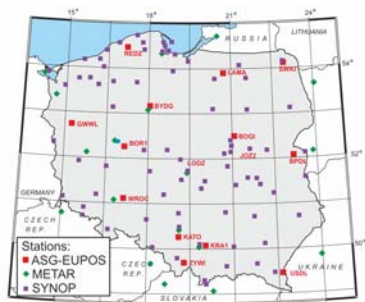
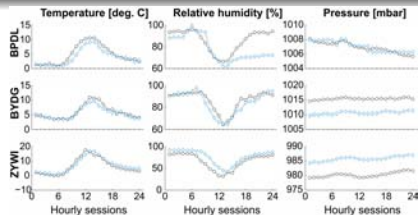
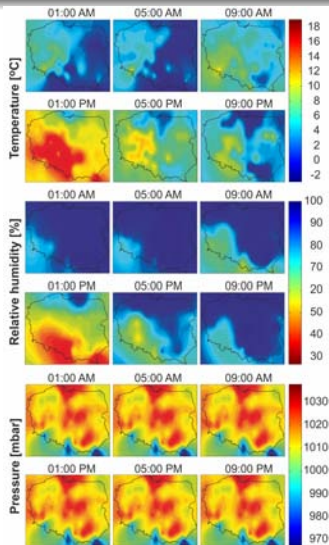


GPT

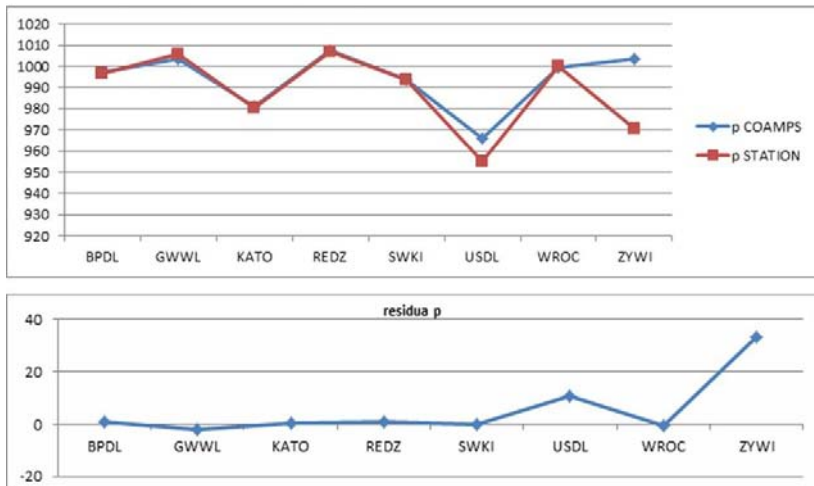
WROC



Wyniki



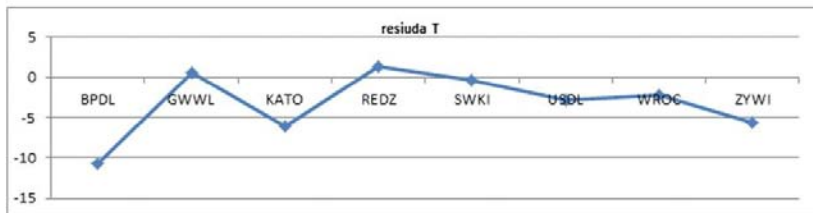
Wzajemna weryfikacja danych- porównanie ciśnienia



Porównanie wartości ciśnienia dla 8 stacji EPN. Data: 14.02.2012 g. 0:00;

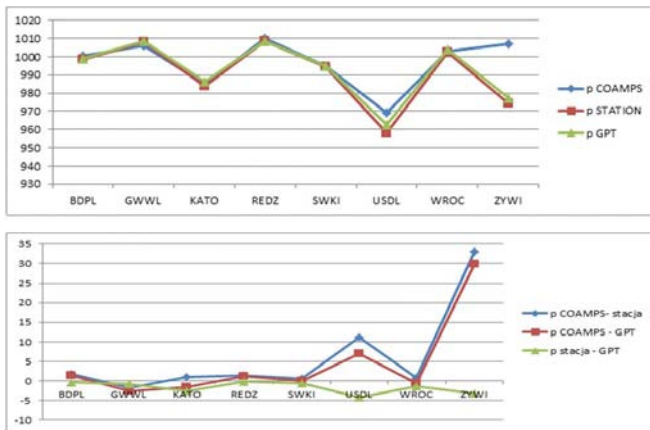
$m = 5.45 \text{ hPa}$, $\sigma = 11.13 \text{ hPa}$

Wzajemna weryfikacja danych- porównanie temperatury



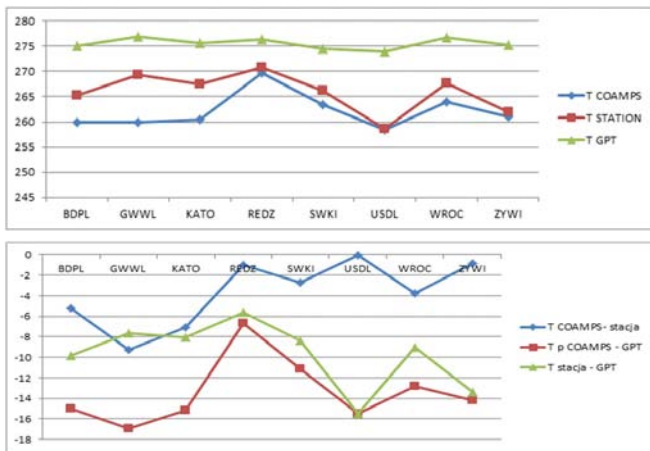
Porównanie wartości temperatury dla 8 stacji EPN. Data: 14.02.2012 g. 0:00;

Walidacja danych - porównanie ciśnienia z zewnętrznym weryfikatorem



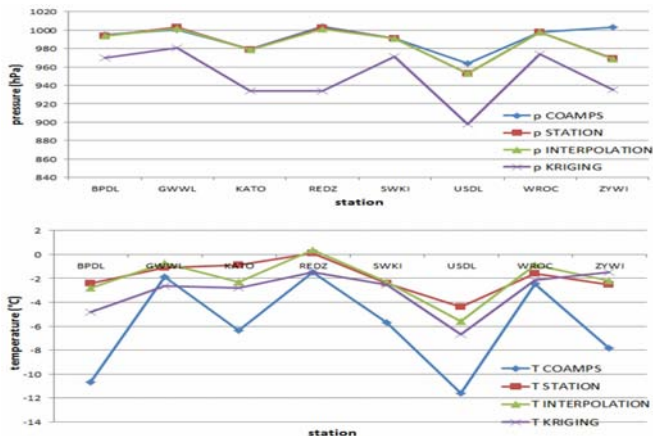
Porównanie wartości ciśnienia z dodatkowym weryfikatorem – modelem GPT (Global Pressure and Temperature) dla 8 stacji EPN. Data 13.02.2012 (Model GPT ma rozdzielczość czasową dobową)

Walidacja danych - porównanie temperatury z zewnętrznym weryfikatorem



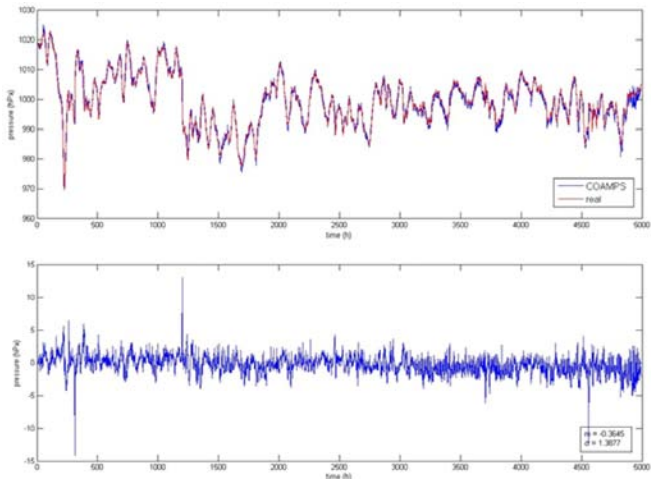
Porównanie wartości temperatury z dodatkowym weryfikatorem – modelem GPT (Global Pressure and Temperature) dla 8 stacji EPN. Data 13.02.2012

Weryfikacja danych - porównanie metod interpolacji



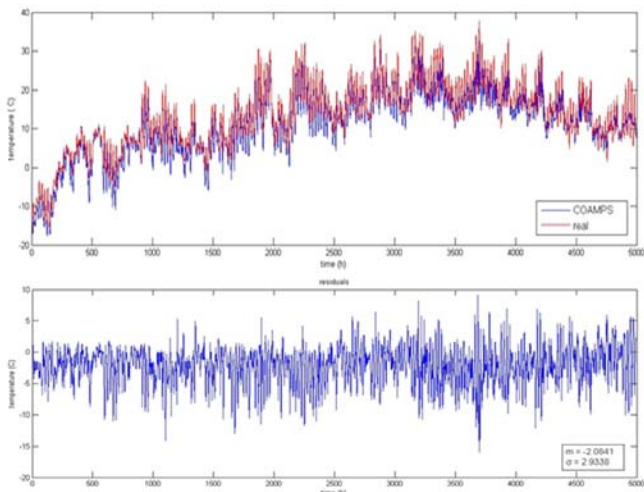
Data: 14.02.2012 g.12:00

Analiza długich szeregów czasowych - stacja WROC (ciśnienie)



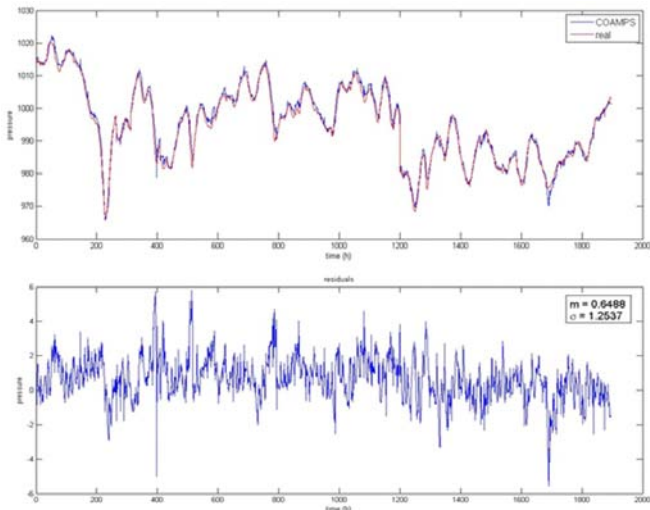
Okres: 6.02.2012 g 0:00 – 21.10.2012 g. 23:00

Analiza długich szeregów czasowych - stacja WROC (temperatura)



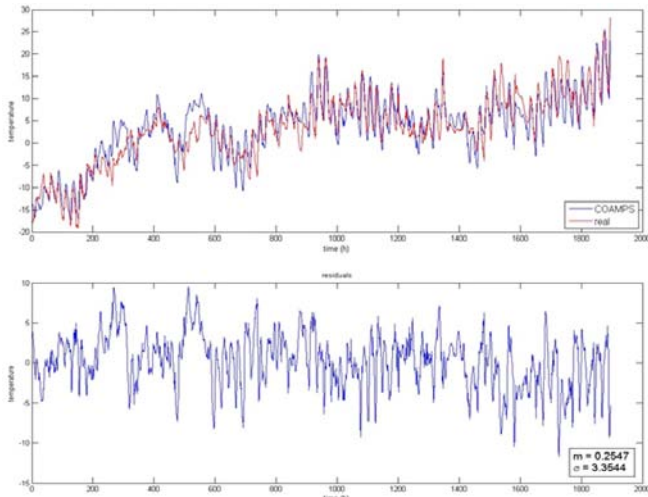
Okres: 6.02.2012 g 0:00 – 21.10.2012 g. 23:00

Analiza długich szeregów czasowych - stacja BPDŁ (ciśnienie)



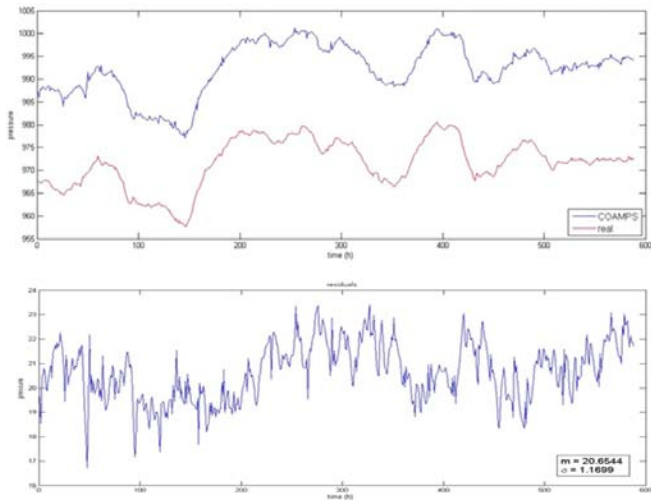
Okres: 6.02.2012 g 0:00 – 28.04.2012 g. 23:00

Analiza długich szeregów czasowych - stacja BPDŁ (temperatura)



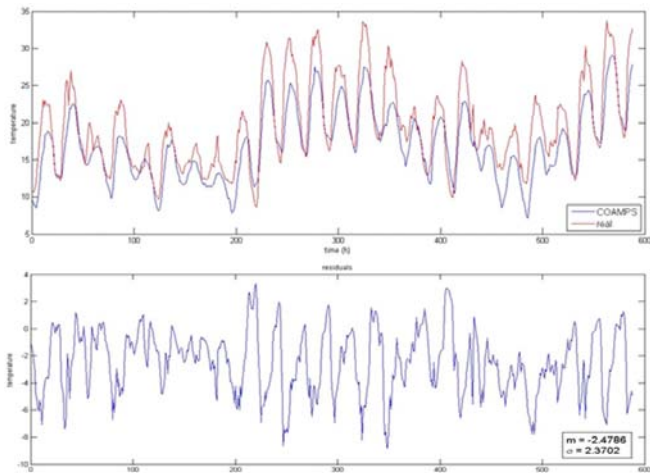
Okres: 6.02.2012 g 0:00 – 28.04.2012 g. 23:00

Analiza długich szeregów czasowych - stacja ZYWI (ciśnienie)



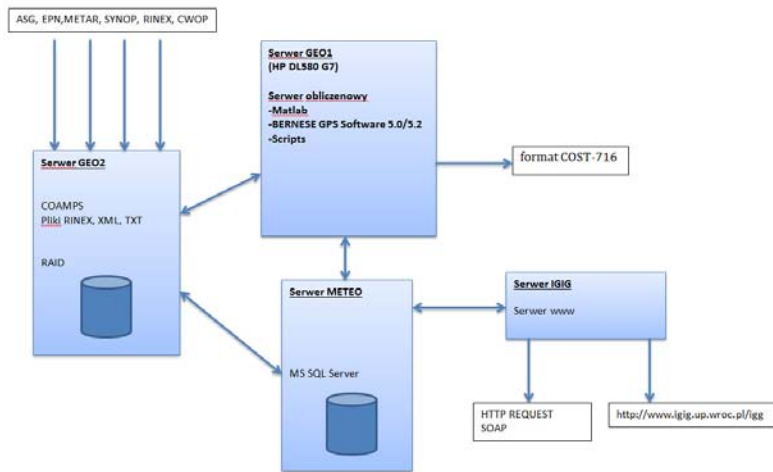
Okres 6.06.2012 g.0:00 – 1.07.2012 g.23:00

Analiza długich szeregów czasowych - stacja ZYWI (temperatura)



Okres 6.06.2012 g.0:00 – 1.07.2012 g.23:00

Schemat funkcjonalny systemu



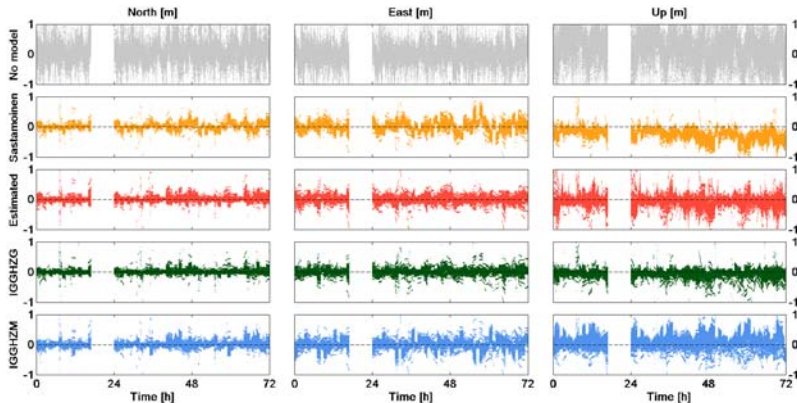
PPP strategia przetwarzania



Bernese GPS Software (postprocessing)

Rozwiązanie	a-priori atm. par.	ZTD model	correction estimation
No model	none	none	no
Saastamoinen	standard atm.	Saastamoinen	no
Estimation	standard atm.	Saastamoinen	yes
IGGHZG	none	GNSS (NRT)	no
IGGHZM	meteor. dat.	Saastamoinen	no

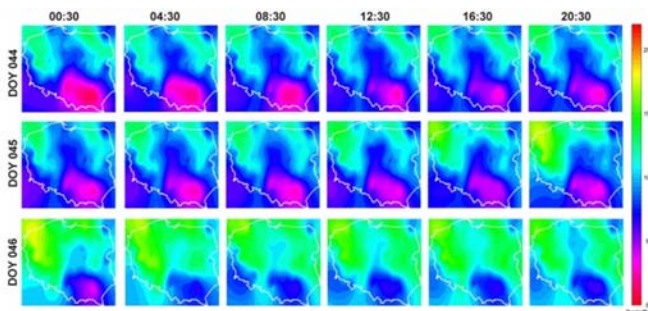
PPP - porównanie z wynikami IGS



IWV - model 2D

$$IWV = \frac{ZWD}{10^{-6} \cdot R_w} \left(k'_2 + \frac{k_3}{T_M} \right)^{-1}$$

gdzie $R_w = 461.525 \pm 0.003 [J kg^{-1} K^{-1}]$ stała gazowa dla pary wodnej,
 $k'_2 = 24 \pm 11 [K hPa^{-1}]$, $k_3 = 3.75 \pm 0.03 [10^5 K^2 hPa^{-1}]$ współczynniki refrakcji, a
 $\bar{T}_M \approx 70.2 \pm 0.72 \cdot T_0$ średnia ważona temperatura pary wodnej w atmosferze, T_0
 temperatura na wysokości anteny GNSS.



COST-716 Format

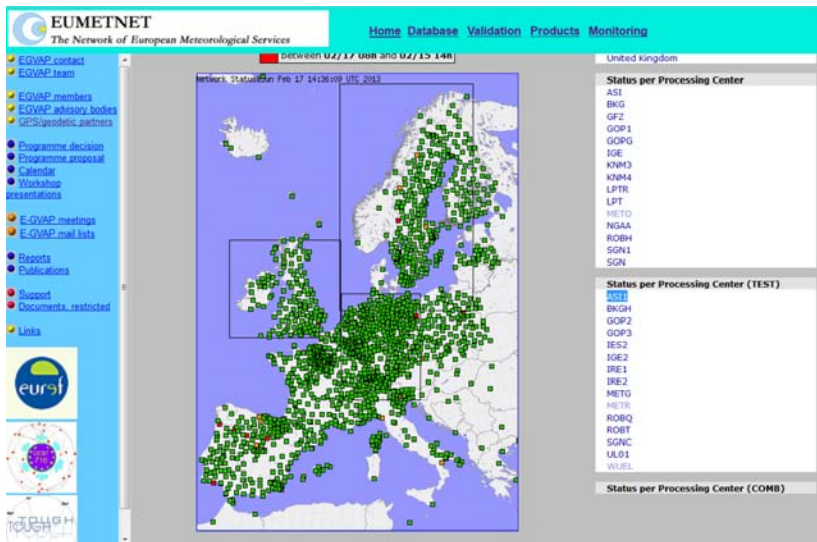
Do upowszechniania wyników wybrano format COST-716 opracowany na potrzeby programu TOUGH (Targeting Optimal Use of GPS Humidity data in meteorology) (Barlag, de Haan, Offiler, 2004)

```
-----
COST-716 V2.0a      E-GVAPII
BIAL 12235M001      Bialystok (Poland)
TRIMBLE NETRS      TRM41249.00      TZGD
    53.132083    23.138750    191.393    163.157    0.000
21-NOV-2012 09:00:00    21-NOV-2012 10:39:30
IGIG      BERN_V5.0      IGSULT      NONE
    60    60 1440
00000065
-999
09 00 00 ffffffff 2345.4    1.5    -9.9    -9.9    -9.9    -9.9    -9.9 999.99 999.99    -9.99    -9.99    -9.999
0
09 59 00 ffffffff 2349.5    2.7    -9.9    -9.9    -9.9    -9.9    -9.9 999.99 999.99    -9.99    -9.99    -9.999
0
-----
```

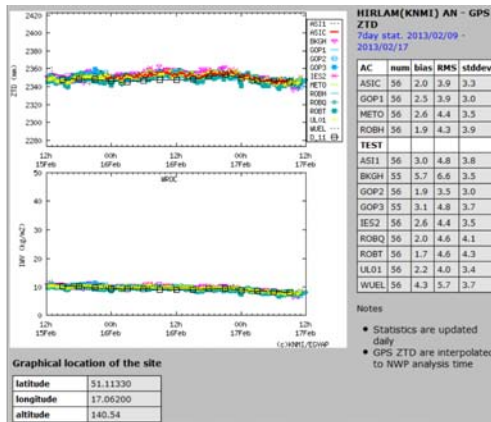
Gdzie:

ZTD	mZTD	ZWD	IWV	P	T	RH	ZTD Gradients	Grad. Errors	TEC
2345.4	1.5	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	999.99 999.99	-9.99 -9.99	-9.999

E-GVAP - The EUMETNET EIG GNSS water vapour programme



E-GVAP - The EUMETNET EIG GNSS water vapour programme



Tomografia troposfery GNSS

Danymi wejściowymi do tomografii GNSS są: opóźnienie troposferyczne w kierunku do satelity *SWD*, które są wynikami przetwarzania danych GNSS, dane meteorologiczne ze stacji naziemnych i wyniki z numerycznych modeli prognozy pogody (NWP).

Tomografia troposfery GNSS

Danymi wejściowymi do tomografii GNSS są: opóźnienie troposferyczne w kierunku do satelity *SWD*, które są wynikami przetwarzania danych GNSS, dane meteorologiczne ze stacji naziemnych i wyniki z numerycznych modeli prognozy pogody (NWP).

STD można rozłożyć na składową suchą (hydrostatyczną) *SHD* i moką *SWD*:

$$STD = SHD + SWD = m_d(\varepsilon)ZHD + m_w(\varepsilon)ZWD$$

gdzie ε kątem elewacji satelity, a $m_d(\varepsilon)$ i $m_w(\varepsilon)$ to funkcje odwzorowujące.

Tomografia troposfery GNSS

Danymi wejściowymi do tomografii GNSS są: opóźnienie troposferyczne w kierunku do satelity *SWD*, które są wynikami przetwarzania danych GNSS, dane meteorologiczne ze stacji naziemnych i wyniki z numerycznych modeli prognozy pogody (NWP).

STD można rozłożyć na składową suchą (hydrostatyczną) *SHD* i moką *SWD*:

$$STD = SHD + SWD = m_d(\varepsilon)ZHD + m_w(\varepsilon)ZWD$$

gdzie ε kątem elewacji satelity, a $m_d(\varepsilon)$ i $m_w(\varepsilon)$ to funkcje odwzorowujące.

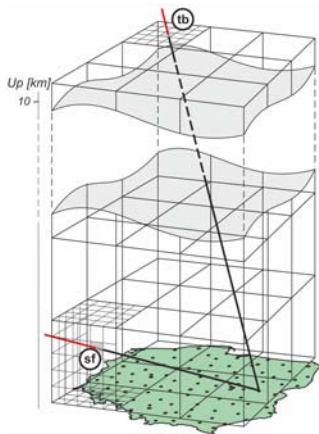
W tomografii GNSS *SWD* z powyższego równania jest powiązane z refrakcyjnością dla części mokrej N_w :

$$SWD = A \cdot N_w$$

gdzie A jest macierzą planu.

model tomograficzny GNSS - Rozwiązania

- **Model A:**



$$N_w = (A^T \cdot P \cdot A)^+ \cdot A^T \cdot P \cdot SWD$$
$$(A^T \cdot P \cdot A)^+ = V \cdot S^+ \cdot U^T$$

gdzie $P = C_{SWD}^{-1}$ jest macierzą wag.

model tomograficzny GNSS - Rozwiązania

• Model A:

$$N_w = (A^T \cdot P \cdot A)^+ \cdot A^T \cdot P \cdot SWD$$

$$(A^T \cdot P \cdot A)^+ = V \cdot S^+ \cdot U^T$$

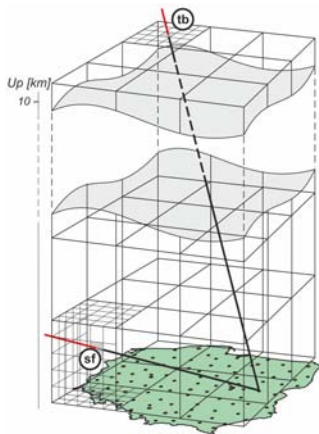
gdzie $P = C_{SWD}^{-1}$ jest macierzą wag.

• Model B:

$$\Delta N_w = (A^T \cdot A)^+ \cdot A^T \cdot \Delta SWD$$

$$(A^T \cdot A)^+ = V \cdot S^+ \cdot U^T$$

$$N_w = N_{w\text{apriori}} + \Delta N_w$$



Model tomograficzny GNSS - Wyniki

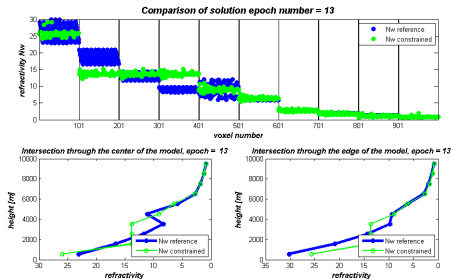
- **Model A:**

- N_w z danych GNSS
SWD (zielony)
- N_w z modelu
referencyjnego
(niebieski)

Model tomograficzny GNSS - Wyniki

Model A:

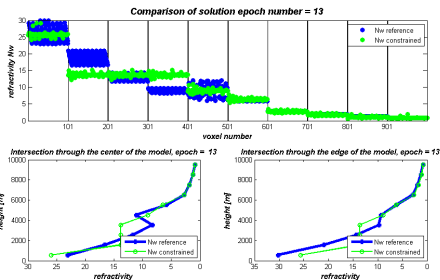
- N_w z danych GNSS
SWD (zielony)
- N_w z modelu
referencyjnego
(niebieski)



Model tomograficzny GNSS - Wyniki

• Model A:

- N_w z danych GNSS
SWD (zielony)
- N_w z modelu
referencyjnego
(niebieski)



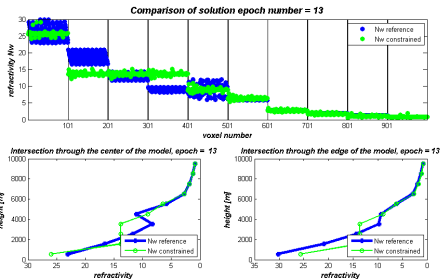
• Model B:

- N_w z danych GNSS
SWD (zielony)
- N_w z modelu
referencyjnego
(niebieski)
- N_w z modelu a
priori (różowy)

Model tomograficzny GNSS - Wyniki

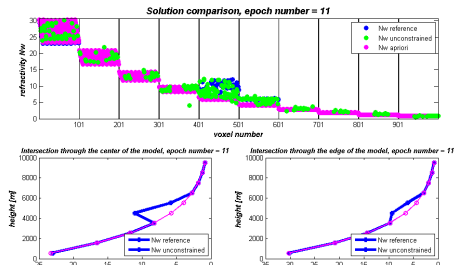
Model A:

- N_w z danych GNSS SWD (zielony)
- N_w z modelu referencyjnego (niebieski)



Model B:

- N_w z danych GNSS SWD (zielony)
- N_w z modelu referencyjnego (niebieski)
- N_w z modelu a priori (różowy)



Podsumowanie

- 1 Model troposfery NRT oparty o dane GNSS i meteorologiczne może być stosowany w serwisach pozycjonowania GNSS czasie rzeczywistym i post-processingu w systemach GBAS.

Podsumowanie

- ❶ Model troposfery NRT oparty o dane GNSS i meteorologiczne może być stosowany w serwisach pozycjonowania GNSS czasie rzeczywistym i post-processingu w systemach GBAS.
- ❷ Istotnym elementem w pozycjonowaniu GNSS jest fakt, że opóźnienia troposferyczne będą obliczane bezpośrednio z obserwacji, a nie jak teraz z modeli deterministycznych. Ma to szczególne znaczenie przys krótkich sesjach obserwacyjnych.

Podsumowanie

- ❶ Model troposfery NRT oparty o dane GNSS i meteorologiczne może być stosowany w serwisach pozycjonowania GNSS czasie rzeczywistym i post-processingu w systemach GBAS.
- ❷ Istotnym elementem w pozycjonowaniu GNSS jest fakt, że opóźnienia troposferyczne będą obliczane bezpośrednio z obserwacji, a nie jak teraz z modeli deterministycznych. Ma to szczególne znaczenie przys krótkich sesjach obserwacyjnych.
- ❸ Tomograficzny model troposfery stworzony z danych GNSS i meteorologicznych może być konkurencyjny w stosunku do modeli numerycznych prognozy pogody (NWP), zwłaszcza dla nowcastingu.

Projekty

- **N520 014 31/2095** Lokalny przestrzenno-czasowy model tomograficzny troposfery oparty o obserwacje satelitarne GPS i parametry meteorologiczne, czas trwania: 19.09.2006 - 18.03.2009;
- **N N526 197238** NRT model stanu atmosfery dla obszaru Polski z pomiarów GNSS i meteorologicznych realizowanych na stacjach referencyjnych systemu ASG-EUPOS, czas trwania: 9.03.2010 - 8.03.2013;
- **N R09 0010 10** Budowa modułów wspomagania serwisów czasu rzeczywistego systemu ASG-EUPOS czas trwania: 1.11.2010 - 31.10.2013;
- **COST Action ES1206** Advanced Global Navigation Satellite Systems tropospheric products for monitoring severe weather events and climate (GNSS4SWEC), 17 February 2013 - 20 November 2016

Publikacje

- ❶ Rohm W., Bosy J. (2009) *Local tomography troposphere model over mountains area*. *Atmospheric Research*, Vol. 93 No. 4, 2009, pp. 777-783, DOI: 10.1016/j.atmosres.2009.03.013 (**pkt. 27, IF 1.811**);
- ❷ Bosy J., Rohm W., Borkowski A., Figurski M., Kroszczyński K. (2010) *Integration and verification of meteorological observations and NWP model data for the local GNSS tomography*. *Atmospheric Research*, Vol. 96, 2010, pp. 522-530, DOI: 10.1016/j.atmosres.2009.12.012 (**pkt. 27, IF 1.597**);
- ❸ Bosy J., Rohm W., Sierny J. (2010) *The concept of Near Real Time atmosphere model based of GNSS and meteorological data from ASG-EUPOS reference stations*. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, Vol. 7 No. 3 (159), Prague 2010, pp. 253-261 (**pkt. 9, IF 0.452**);
- ❹ Rohm W., Bosy J. (2011) *The verification of GNSS tropospheric tomography model in a mountainous area*. *Advances in Space Research*, Vol. 47 No. , 2011, pp. 1721-1730, DOI: 10.1016/j.asr.2010.04.017 (**pkt. 20, IF 1.079**);
- ❺ Rohm W. (2012) *The precision of humidity in GNSS tomography*. *Atmospheric Research*, Vol. 107, 2012, pp. 69-75, DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.12.008 (**pkt. 25, IF 1.911**);
- ❻ Rohm W. (2012) *The ground GNSS tomography - unconstrained approach*. *Advances in Space Research*, Available online 24 September 2012, DOI: 10.1016/j.asr.2012.09.021 (**pkt. 20, IF 1.178**);
- ❼ Bosy J., Kaplon, J., Rohm W., Sierny J. and Hadas, T. (2012) *Near real-time estimation of water vapour in the troposphere using ground GNSS and the meteorological data*. *Annales Geophysicae*, Vol. 30, Göttingen, Germany 2012, pp. 1379-1391, DOI: 10.5194/angeo-30-1379-2012 (**pkt. 25, IF 1.842**);
- ❽ Hadas 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* (**pkt. 35, IF 1.494**);

Dziękuję za uwagę

jaroslaw.bosy@up.wroc.pl

