

## SOUČASNÝ STAV VYUŽÍVÁNÍ GLOBÁLNÍCH NAVIGAČNÍCH POLOHOVÝCH SYSTÉMŮ PRO ZKVALITNĚNÍ PŘEDPOVĚDÍ POČASÍ

Michal KAČMARÍK<sup>1</sup>, Jan DOUŠA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut geoinformatiky, Hornicko-geologická fakulta, Vysoká škola báňská — Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33, Ostrava, Česká republika

<sup>2</sup> GO Pecný, Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v.v.i., Ondřejov 244, 251 65, Ondřejov, Česká republika  
*michal.kacmarik@vsb.cz*

### Abstrakt

Příspěvek představuje aktuální situaci v oblasti GNPS meteorologie využívající signály z Globálních navigačních polohových systémů (GNPS) pro nepřímé stanovování obsahu vodních par v atmosféře. Tento parametr výrazně ovlivňuje stav a vývoj počasí a je také jedním ze skleníkových plynů. Do vybraných evropských numerických předpovědních modelů počasí (NWM) jsou již po několik let asimilovány hodnoty celkového zpoždění GNPS signálu v zenitovém směru nad přijímačem (ZTD) ze sítě referenčních stanic, což má pozitivní dopad na kvalitu předpovědi srážek, zejména těch krátkodobých. V současnosti probíhající výzkum v rámci projektu COST ES1206 *Advanced Global Navigation Satellite Systems tropospheric products for monitoring severe weather events and climate* (GNSS4SWEC) si klade za cíl vyvinout nové produkty GNPS meteorologie pro moderní numerické předpovědní modely počasí, ale i oblast nowcastingu. Prvotní provedené analýzy ukazují, že například směrové gradienty odvozené z GNPS měření v husté síti referenčních stanic dokáží poskytovat detailnější struktury vývoje studovaného parametru v atmosféře než aktuální NWP modely. Další oblastí vývoje je přechod ze zpracování dat v blízkém reálném čase s dodáním výsledků z GNSS měření zhruba 90 až 120 minut po observacích na zpracování v čase reálném. Dle provedených testovacích kampaní je aktuálně již možno dosahovat požadované kvality výstupů i při tomto způsobu zpracování, což z GNPS meteorologie činí potenciálně hodnotný zdroj informací pro nowcasting nejen extrémních atmosférických jevů.

### Abstract

Paper presents current status of GNSS meteorology technique which uses Global navigation satellite systems (GNSS) signals for determination of water vapor in the atmosphere. This parameter significantly influences weather conditions and weather development and is also one of the green-house gases. Some of European numerical weather prediction models (NWM) have been assimilating zenith total delays (ZTD) of GNSS signals from networks of ground reference stations into their predictions for several years. This has positive impact on quality of rain forecasts, especially of short-time ones. Currently undergoing research within the project COST ES 1206 *Advanced Global Navigation Satellite Systems tropospheric products for monitoring severe weather events and climate* (GNSS4SWEC) is focused on development of new GNSS meteorology products which could be useful for modern numerical weather prediction models as well as for meteorological nowcasting. First analyses show that for example horizontal tropospheric gradients derived from dense network of GNSS reference stations can offer more detailed structures of studied parameter in the atmosphere than state-of-the art NWM. Another important topic of the research is a switch from near-real time processing mode which delivers results between 90 and 120 minutes after the GNSS observations to real time processing. According to preliminary test campaigns it is already possible to achieve demanded accuracy of zenith total delays even in this processing regime. This situation can make GNSS meteorology a potentially interesting source of information for nowcasting of extreme weather events.

**Klíčová slova:** GNPS meteorologie; numerický předpovědní model počasí; celkové zpoždění signálu v zenitovém směru

**Keywords:** GNSS meteorology; numerical weather prediction model; zenith total delay

## 1. ÚVOD

Globální navigační polohové systémy (GNPS) hrají svou již neodmyslitelnou roli při mapování zemského povrchu či navigaci dopravních prostředků a osob. Natolik všeobecně známé však nejsou další možnosti jejich využívání, mezi které patří například technika GNPS meteorologie [1]. Ta se zabývá nepřímým stanovováním obsahu vodních par v troposféře z GNPS měření, tedy parametr ovlivňující aktuální stav a vývoj počasí.

Vliv troposféry na signál vyslaný družicí GNPS má za důsledek zpomalení jeho šíření a tudíž ve výsledku zpoždění jeho přijetí pozemním přijímačem. Celkové zpoždění signálu vlivem troposféry je možno rozdělit na dvě části, a to na větší poměrnou část způsobenou hydrostatickou složkou vlivu závislou především na atmosférickém tlaku a teplotě vzduchu, a menší část způsobenou nehydrostatickou složkou vlivu závislou na aktuálním obsahu vodních par v troposféře. Výsledkem základního zpracování GNPS měření jsou hodnoty celkového zpoždění signálu v zenitovém směru nad stanicí (Zenith Total Delay, ZTD) v určitém časovém intervalu (typicky 5 až 60 minut) a obvykle také horizontální gradienty troposféry, které obsahují informace o azimutální asymetrii v troposféře. Typická hodnota ZTD pro přijímač umístěný v nulové nadmořské výšce se pohybuje okolo 2.3 m, přičemž nehydrostatická složka tvoří přibližně 5 až 10 procent celku. Při znalosti meteorologických veličin v místě pozemního přijímače (atmosférický tlak a teplota vzduchu) je následně možno ze ZTD vyjádřit obsah vodních par v atmosféře (Integrated Water Vapour, IWV), taktéž v zenitovém směru. Parametr IWV reprezentuje výšku vodního sloupce v milimetrech, která by vznikla kondenzací veškeré vodní páry v daném profilu nad stanicí.

GNPS meteorologie je jednou z několika dostupných technik pro měření obsahu vodních par v troposféře, jejíž hlavními výhodami je prostorové a časové rozlišení výstupu, kvalita a stabilita výstupu při jakýchkoliv meteorologických podmínkách a denní či roční době. Pro lokální měření jsou používány meteorologické radiosondy měřící kompletní výškový profil nad stanicí či v omezené míře pozemní vysokofrekvenční mikrovlnné radiometry. V globálním měřítku jsou to pak radiometry na družicích Dálkového průzkumu Země.

V současnosti jsou v Evropě hodnoty ZTD z pozemních referenčních GNPS stanic již několik let operativně asimilovány do numerických předpovědních modelů počasí (NWM) provozovaných meteorologickými institucemi ve Velké Británii, Francii, Nizozemí či Dánsku. Hybatelem a koordinátorem v této oblasti je projekt E-GVAP (více <http://egvap.dmi.dk>). Aktuálně jsou v blízkém reálném čase k dispozici hodnoty ZTD/IWV zhruba z 1 700 referenčních stanic rozmístěných na území celé Evropy. Studie provedené i mimo Evropu ukazují pozitivní dopad těchto asimilací na předpovědi srážek, zejména krátkodobých předpovědí silných srážek ([2], [3], [4], [5], [6]).

## 2. PROJEKT COST ACTION GNSS4SWEC

Neustálý vývoj moderních NWM vedoucí ke zvyšování jejich prostorového i časového rozlišení a popisu atmosférických jevů společně s potřebou kvalitněji předpovídat extrémní jevy počasí, jejichž výskyt roste díky globální změně klimatu, přináší poptávku po novém zdroji dat o absolutní vlhkosti v troposféře a nových produktech nowcastingu. Zároveň jsou již k dispozici časové řady hodnot ZTD ze stanic umístěných po celé Zemi za posledních dvacet až dvacet pět let, což začíná být zajímavá datová sada již i z pohledu klimatologie. Výše popsané skutečnosti se staly hybným motorem pro realizaci projektu COST Action ES 1206 "Advanced Global Navigation Satellite Systems tropospheric products for monitoring severe weather events and climate (GNSS4SWEC)", který je realizován v letech 2013 až 2017.

V rámci projektu existují tři vzájemně kooperující pracovní skupiny zaměřené na 1, vývoj pokročilých produktů GNPS meteorologie a jejich použití v meteorologii a geodézii, 2, vývoj a aplikaci nových GNSS produktů pro předpovídání jevů extrémního počasí, 3, využití GNPS meteorologie v klimatologii.

Jednou z aktivit v rámci projektu GNSS4SWEC bylo vytvoření rozsáhlého, dobře dokumentovaného a konzistentního Benchmark data setu s observacemi z GNPS a různých meteorologických zařízení postihujícího zajímavé období z pohledu výskytu extrémních jevů počasí, který by umožňoval společný vývoj nových produktů, porovnání existujících řešení jednotlivých zainteresovaných institucí a fungoval jako zdroj informací pro nově angažované výzkumné týmy. Vybraná oblast pro tento data set se nachází ve střední

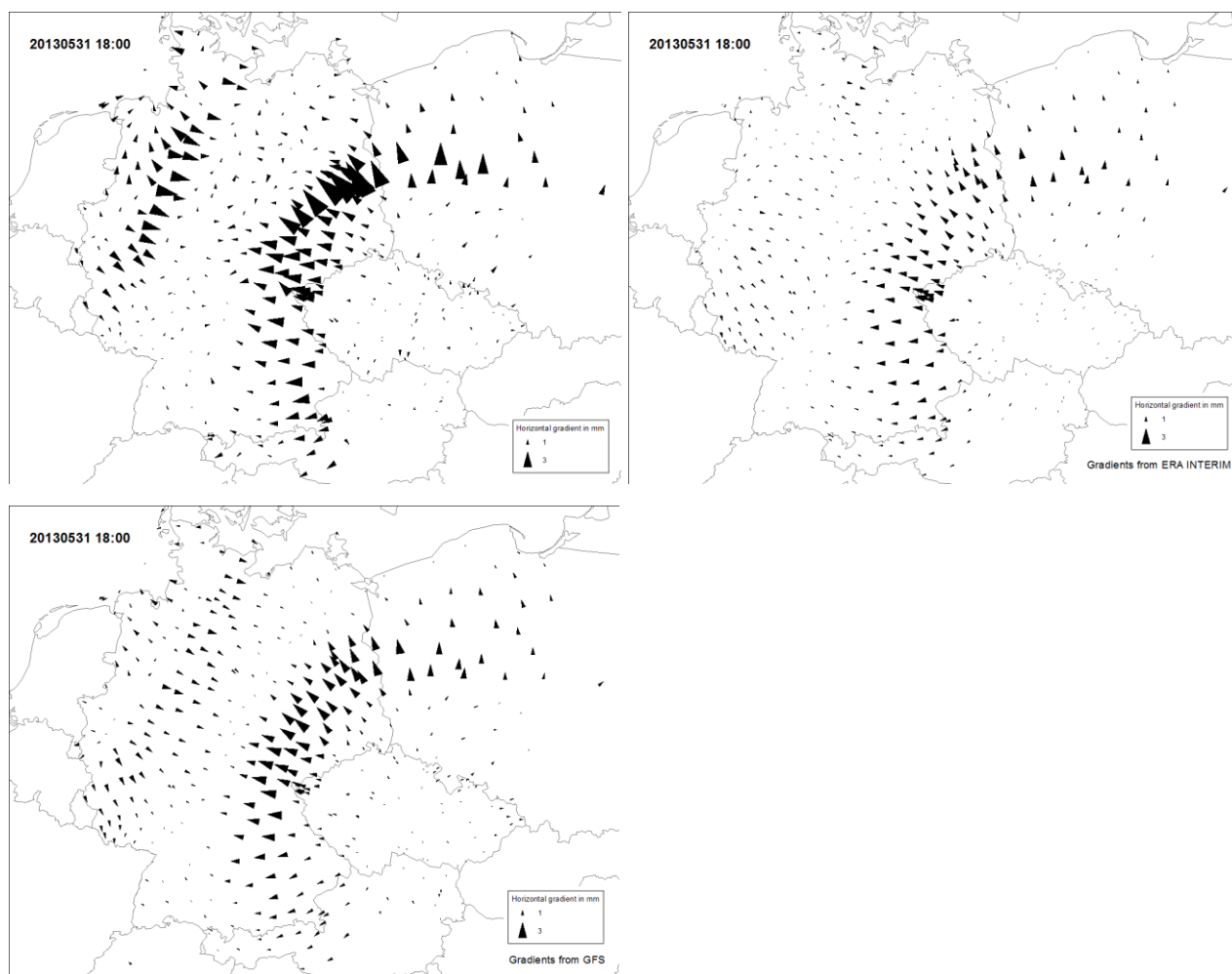
Evropě na území států Česká republika, Německo, Rakousko a Polsko. Jako vhodné časové období byl zvolen květen a červen roku 2013, kdy zejména ve druhém zmíněném měsíci došlo k několika meteorologicky významným událostem vedoucím k rozsáhlým povodním na řekách Dunaj, Labe a Vltava. Vytvořený data set zahrnuje observace z celkem 430 GNPS referenčních stanic, 600 meteorologických synoptických stanic, 21 stanic vypouštějících radiosondy, 2 vysokofrekvenčních mikrovlnných radiometrů, 2 meteorologických radarů a kompletní sadu předpovědí z NWM Aladin provozovaného Českým Hydrometeorologickým ústavem. Výsledky představené v následující kapitole tohoto příspěvku pocházejí ze zpracování dat z tohoto data setu.

### 3. HORIZONTÁLNÍ GRADIENTY TROPOSFÉRY

Jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole, výstupem ze zpracování GNPS observací bývají kromě hodnot ZTD také horizontální gradienty troposféry. Ty jsou považovány za nositele informace o asymetrii rozložení hodnot obsahu vodních par v troposféře, i když část gradientu může být a bývá tvořena hydrostatickou složkou zpoždění dle aktuálního stavu počasí. Celkový gradient je dán dvěma složkami (první určuje vývoj ve směru sever-jih a druhá ve směru východ-západ) a určuje tak azimut, ve kterém se v dané době má nacházet nejvíce vodních par, a také velikost příspěvku pro ZTD v daném azimutu.

V rámci vytváření referenčních GNPS produktů troposféry pro Benchmark data set byly vytvořeny i vizualizace horizontální gradientů troposféry pro celou síť stanic a celé zpracované období. Totožným způsobem byly následně vizualizovány horizontální gradienty odvozené z globálního numerického modelu počasí ERA-INTERIM provozovaného ECMWF [7] a z modelu GFS provozovaného NCEP. Horizontální gradienty troposféry byly společně s hodnotami ZTD (ZWD a ZHD) odvozeny z obou modelů s využitím software DNS vyvinutého na GFZ Potsdam [8] a software G-Nut/Shu vyvinutého na GO Pecny [9].

Ukázku vyhotovených map horizontálních gradientů nabízí obrázek 1 platný pro 31. května 2013 18:00 UTC, tedy v čase předcházejícím dlouhodobé srážkové epizodě vedoucí k povodním na území východního Německa, západu České republiky a v Rakousku. Jak je viditelné, struktury a vzory patrné v gradientech odvozených ze zpracování GNPS měření velmi dobře odpovídají těm odvozených z NWM polí. Tento stav byl platný prakticky pro celé zpracovávané období dlouhé téměř dva měsíce. Na animacích vytvořených z jednotlivých statických map bylo možno díky vizualizovaným gradientům pozorovat pohyb frontálních systémů. V některých situacích výstupy z GNPS obsahují jemné lokální a regionální vzory, které globální modely počasí s hrubým prostorovým rozlišením nebyly schopny postihnout. V řadě případů je pozorovatelné, že velikosti gradientů z GNPS přesahují velikosti gradientů z obou modelů počasí, což může být taktéž způsobeno špatným rozlišením modelů. V dalším kroku je plánováno odvození horizontálních gradientů z výstupů modelu Aladin s výrazně vyšším prostorovým rozlišením. V každém případě již provedené analýzy indikují potenciál obsažený v horizontálních gradientech troposféry získaných z GNPS měření, pokud jsou k dispozici observace z husté sítě stanic.



**Obr. 1** Horizontální gradienty troposféry platné pro 31. května 2013 18:00 UTC získané z GNPS zpracování (vlevo nahoře), NWM ERA-INTERIM (vpravo nahoře) a NWM GFS (vlevo dole), zdroj [10]

#### 4. ZÍSKÁNÍ ZTD HODNOT V REÁLNÉM ČASE

V současnosti jsou operativně používaná ZTD řešení postavena na zpracování v blízkém reálném čase, kdy k dodání výsledků dochází 90 až 120 minut od samotných observací. Po konci každé hodiny zpracovatelské centrum vyčkává na dodání souborů s observacemi z referenčních stanic za poslední hodinu a následně spouští samotné řešení, ve kterém do řešení vstupují observace z delšího časového okna (typicky 12 hodin). V minulosti byla pro tyto účely využívána síťová zpracování založená na dvojité-diferencovaných observacích, ve kterých jsou observace ze všech zahrnutých stanic zpracovávány najednou. S nárůstem počtu referenčních stanic, jejichž data bylo potřeba zpracovávat, a se zvyšováním kvality produktů s efemeridami družic a korekcemi hodin na družicích, se začala dostávat do popředí technika Precise Point Positioning (PPP) [11], která vždy zpracovává data z pouze jedné stanice. Celý proces zpracování tak může být snadno paralelizován na více jader procesoru či i více počítačů. V současnosti tak již některá zpracovatelská centra využívají techniku PPP, jiná stále síťové řešení.

První experimenty určování parametrů troposféry v reálném čase byly provedeny v roce 2012. [12] Princip těchto řešení je založen na využití techniky PPP a korekcí palubních efemerid družic a chyb hodin družic distribuovaných v reálném čase (<http://igs.org/rt/products>). Dále je potřeba zajistit příjem observací z vlastního přijímače vyšší třídy či GNPS referenční stanice a využít některý z existujících software schopný vytvářet PPP řešení v reálném čase či pro tyto účely vytvořit vlastní aplikaci. Pro každou zpracovávanou epochu měření (typicky 1 s) jsou určovány neznámé parametry v podobě souřadnic přijímače (pokud nejsou fixovány na známou polohu), chyby hodin přijímače a také požadované hodnoty ZTD.

V rámci WG1 představeného projektu GNSS4SWEC je od dubna 2015 realizována kampaň pro porovnání ZTD řešení v reálném čase z různých software a pro podporu vývoje v této oblasti. Do této kampaně je zahrnuto zpracování dat z 27 referenčních stanic z celého světa a aktuálně své výsledky dodává pět institucí (plus jedna instituce dodávající ZTD z hodinových zpracování a jedna dodávající řešení odvozené z NWM předpovědí). Pro online monitoring byla na GO Pecný vytvořena webová mapová služba zobrazující vývoj hodnot ZTD pro všechny zahrnuté stanice a řešení. Služba je volně dostupná na adrese <http://www.pecny.cz/COST/RT-TROPO/>.

První realizovaná statistická porovnání ZTD řešení dodávajících výsledky v reálném čase s finálními ZTD produkty produkovanými EUREF EPN či IGS založenými na post-processingu dat a kombinaci řešení z různých analytických center poskytují povzbudivé výsledky. Řešení některých institucí již v současnosti splňují požadavky na kvalitu ZTD hodnot pro jejich použití v meteorologii pro nowcasting a globální či regionální NWM. Tyto požadavky byly stanoveny meteorologickou komunitou v rámci projektu E-GVAP, kdy byla prahová hodnota přesnosti ZTD zvolena 15 mm a optimální hodnota pak 10 mm. Dle provedených testů některá současná RT řešení dosahují < +-5 mm bias (ten je však značně odvislý od konkrétní stanice, na druhou stranu může být při dlouhodobé stabilitě poměrně jednoduše redukován) a 5-9 mm pro směrodatnou odchylku. [13]

## 5. ZÁVĚR

Příspěvek přináší základní informace o technice GNPS meteorologie sloužící pro nepřímé stanovování obsahu vodních par v atmosféře z analýzy GNPS signálů a současně o aktuálním stavu vývoje v některých z oblastí GNPS meteorologie v rámci projektu GNSS4SWEC. Byla demonstrována ukázka využitelnosti horizontálních gradientů troposféry z GNPS měření pro identifikování a sledování vývoje oblastí s vyššími hodnotami absolutní vlhkosti či nastíněn vývoj zpracování GNPS observací v reálném čase.

## PODĚKOVÁNÍ

Autoři by na tomto místě chtěli poděkovat všem kolegům podílejícím se na řešení popsaných aktivit v rámci projektu GNSS4WEC (jmenovitě Galina Dick a Florian Zus z GFZ Potsdam, Pavel Václavík z GO Pecný, VÚGTK, Eric Pottiaux z ROB a další). Zároveň děkujeme všem institucím, které poskytly svá data pro Benchmark data set [10] a projektu MŠMT LD14102 za podporu při řešení projektu GNSS4SWEC.

## LITERATURA

- [1] Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., Ware, R. H. (1992) GPS meteorology – remote-sensing of atmospheric water-vapor using the global positioning system, *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, Vol. 97, Issue D14, pp. 15787-15801
- [2] Vedel, H. a Huang, X. (2004) Impact of Ground Based GPS Data on Numerical Weather Prediction, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 82, No. 1B, pp. 459-472, doi: 10.2151/jmsj.2004.459
- [3] Guerova, G., Bettems, J. M., Brockmann, E., Matzler, C. (2006) Assimilation of COST 716 Near-Real Time GPS data in the nonhydrostatic limited area model used at MeteoSwiss, *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 91, Issue 1-4, pp. 149-164, doi: 10.1007/s00703-005-0110-6
- [4] Shoji, Y., Kunii, M. a Saito, K. (2009) Assimilation of Nationwide and Global GPS PWV Data for a Heavy Rain Event on 28 July 2008 in Hokuriku and Kinki, Japan, *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 5, pp. 45-48, doi:10.2151/sola.2009-012
- [5] Bennitt, E. a Jupp, A. (2012) Operational Assimilation of GPS Zenith Total Delay Observations into the Met Office Numerical Weather Prediction Models, *Monthly Weather Review*, 140(8), pp. 2706-2719, doi: 10.1175/MWR-D-11-00156.1

- [6] Mahfouf, J.-F., Ahmed, F., Moll, P. a Teferle, F. N. (2015) Assimilation of zenith total delays in the AROME France convective scale model: a recent assessment, *Tellus A*, 67, 26106, doi:10.3402/tellusa.v67.26106
- [7] Dee, D. P. a kolektiv (2011) The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Q J R Meteorol Soc*, 137(656):553–597
- [8] Zus, F., Dick, G., Heise, S., Douša, J. a Wickert, J. (2014) The rapid and precise computation of GPS slant total delays and mapping factors utilizing a numerical weather model, *Radio Science*, 49(3): 207-216
- [9] Douša, J. a Eliaš, M. (2014) An improved model for calculating tropospheric wet delay, *Geophys. Res. Lett.*, 41:4389-4397
- [10] Douša, J., Dick, G., Kačmařík, M., Brožková, R., Zus, F., Brenot, H., Stoycheva, A., Möller, G. a Kaplon, J. (2016) Benchmark campaign and case study episode in Central Europe for development and assessment of advanced GNSS tropospheric models and products, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, doi:10.5194/amt-2015-395, v recenzním řízení
- [11] Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., ad Webb, F. H (1997) Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks. *Journal of Geophysical Research*, 102(B3):5005–5017
- [12] Douša, J. (2012) Global Near Real-Time, Multi-GNSS and Ultra-Fast Troposphere Estimation at Geodetic Observatory Pecny, IGS 2012 Workshop, Olzstyn, Polsko, 23. – 27. 7 2012
- [13] Douša, J. a kolektiv (2016) Real-time Demonstration and Benchmark campaigns for developing advanced troposphere products, IGS Workshop 2016, Sydney, Austrálie, 8. – 12. 2. 2016