

MOŽNOSTI VYBUDOVÁNÍ SYSTÉMU GNSS TOMOGRAFIE ATMOSFÉRY NAD ÚZEMÍM ČESKÉ REPUBLIKY

Michal KAČMAŘÍK¹, Lukáš RAPANT²

¹ Institut geoinformatiky, HGF, VŠB-TU Ostrava, 17. Listopadu 15, 708 33, Ostrava, Česká republika
michal.kacmarik@vsb.cz

² Katedra aplikované matematiky, FEI, VŠB-TU Ostrava, 17. Listopadu 15, 708 33, Ostrava, Česká republika
lukas.rapant@vsb.cz

Abstrakt

Příspěvek je věnován současným možnostem vybudování systému GNSS tomografie atmosféry nad územím České republiky umožňujícího 3D rekonstrukci obsahu vodních par v atmosféře. Základem tohoto systému by se měla stát na tomto území existující síť referenčních stanic GNSS. Příspěvek obecně představuje dostupné metody studia obsahu vodních par v atmosféře s využitím GNSS signálů, zkušenosti autora z této oblasti včetně návrhu a výsledků testování vlastní metody 2D tomografie atmosféry a nastiňuje přehled aktuální situace v oblasti GNSS tomografie atmosféry v celosvětovém měřítku.

Abstract

Paper is focused on actual possibilities for the development of a GNSS tomography system above the Czech Republic which would allow a 3D atmospheric water vapour reconstruction. This system should be based on an existing network of GNSS reference stations. Paper generally presents methods for atmospheric water vapour studies using GNSS signals, author's experience in this field of study including a proposal and testing results of a new 2D GNSS tomographic method and an overview about the actual worldwide state around the GNSS tomography of the atmosphere.

Klíčová slova: GNSS meteorologie; GNSS tomografie atmosféry; Česká republika; referenční stanice GNSS

Keywords: GNSS meteorology; GNSS tomography of the atmosphere; Czech Republic; GNSS reference station

ÚVOD

Možnost použití Globálních navigačních družicových systémů (GNSS) k určování obsahu vodních par v atmosféře byla prokázána již více než před dvaceti lety [1] [2]. Od té doby dochází k intenzivnímu vývoji v této oblasti, který vyústil například v operativní využívání výstupů z této metody (GNSS meteorologie) v numerických předpovědních modelech počasí v některých evropských zemích – projekt E-GVAP. Jedním z aktuálních témat v této oblasti je trojrozměrná rekonstrukce rozložení obsahu vodních par v atmosféře nad sítí GNSS přijímačů zvaná GNSS tomografie atmosféry. Její principy jsou shodné s tomografií využívanou v řadě lidských odvětví, jako je lékařství, archeologie či studium struktury materiálů. Uskutečněné vědecké projekty ukazují na reálný potenciál této metody poskytovat hodnověrné výsledky, ale také na celou řadu úskalí prozatím s metodou spojených. Tento příspěvek si klade za cíl seznámit s problematikou určování obsahu vodních par v atmosféře, principy metody tomografie atmosféry a možnostmi jejího praktického využití pro území České republiky.

OBSAH VODNÍCH PAR V ATMOSFÉRE A JEHO URČOVÁNÍ

„Obsah vodních par je jedním z nejdůležitějších ukazatelů projevu troposféry. Je základní složkou přenosu energie a jedním z hlavních činitelů, které ovlivňují počasí.“ [3] Platí, že přibližně polovina vodních par se v atmosféře nachází do výšky 1,5 km nad zemí, 5 % v horních vrstvách troposféry nad 5 km a pouhé 1 % nad hranicí troposféry ve stratosféře. [4]

Obsah vodních par v atmosféře vyjádřený v milimetrech vodního sloupce nalezneme v mnohé literatuře pod pojmem IWV (Integrated Water Vapour). Můžeme si jej představit jako výšku vodního sloupce vzniklou kondenzací veškeré vodní páry nacházející se ve troposféře nad daným místem. Typické hodnoty se pro zeměpisnou šířku České republiky pohybují v rozmezí 5 až 40 mm.

Nejčastěji v současnosti operativně používanou metodou pro určování obsahu vodních par v atmosféře je radiosonda nesená meteorologickým balónem. Radiosonda je vybavena meteorologickými čidly pro měření atmosférické teploty, tlaku a relativní vlhkosti vzduchu. Měřené hodnoty jsou pomocí vysílače vysílány zpět k meteorologické stanici.

Meteorologické balóny vybavené radiosondami jsou vypouštěny 1x až 4x za den, v rámci České republiky ze dvou meteorologických stanic (Praha – Libuš, Prostějov). Hlavní nevýhodou tohoto zařízení je jeho provozní a ekonomická nákladnost a malý počet měření. Stále se však jedná o jediné dostupné zařízení, které je schopné spolehlivě poskytovat kromě celkové hodnoty obsahu vodních par v atmosféře i vertikální profil rozložení těchto hodnot. Měření radiosond jsou v meteorologii využívána při tvorbě předpovědí počasí, jako vstupní data numerických předpovědních modelů počasí a při studiu klimatických změn globálních rozměrů. Další uplatnění nacházejí například v oblasti řízení letového provozu.

Obsah vodních par v atmosféře je dále možné určovat také z měření vysokofrekvenčního mikrovlnného radiometru, družic dálkového průzkumu Země zaměřených na studium atmosféry či měření z Globálních navigačních družicových systémů. Třetí uvedené metodě se věnují následující odstavce kapitoly.

Obsah vodních par v atmosféře jsme schopni z měření GNSS s vysokou přesností určovat na základě znalosti hodnoty celkového zpoždění signálu v zenitovém směru nad GNSS přijímačem způsobeného vlivem troposféry (Zenith Total Delay, ZTD) a hodnot atmosférické teploty a tlaku vzduchu v místě měření. Standardní hodnota zpoždění signálu v zenitovém směru nad přijímačem způsobené troposférou je 2,3 m (neboli 8 ns) pro přijímač umístěný v nulové nadmořské výšce a při standardních atmosférických podmínkách. Hodnoty ZTD je možné získat zpracováním přesných GNSS měření z permanentních referenčních stanic ve specializovaných softwarech (Bernese GPS SW, Gamit, Gipsy, G-Nut), určujeme je pro polohu referenční stanice v pravidelném časovém intervalu (obvykle 15 – 60 minut).

Troposféra ovlivňuje signál GNSS dvěma způsoby. Za prvé, signál se ohýbá na přechodech vrstev s různými indexy refrakce a šíří se díky tomu po křivce místo po přímce. Za druhé se vlna šíří v prostředí s určitou hustotou pomaleji než ve vakuu. Součet těchto komponent dává celkové zpoždění signálu. To může být pro studované účely rozděleno i jiným způsobem, a to na větší poměrnou část způsobenou hydrostatickou složkou vlivu atmosféry (ZHD) a menší část způsobenou nehydrostatickou složkou vlivu atmosféry (ZWD). ZHD závisí převážně na hodnotách atmosférického tlaku vzduchu a ZWD na obsahu vodních par [5]. V průběhu zpracování GPS měření jsou obě tyto komponenty určovány samostatně a platí vztah (1). Obecně platí, že hydrostatické vlastnosti atmosféry jsou z pohledu času statického charakteru a jsou relativně snadno modelovatelné. Obsah vodních par v atmosféře je naopak v čase velice proměnlivý a nejen z tohoto důvodu mnohem obtížněji určitelný.

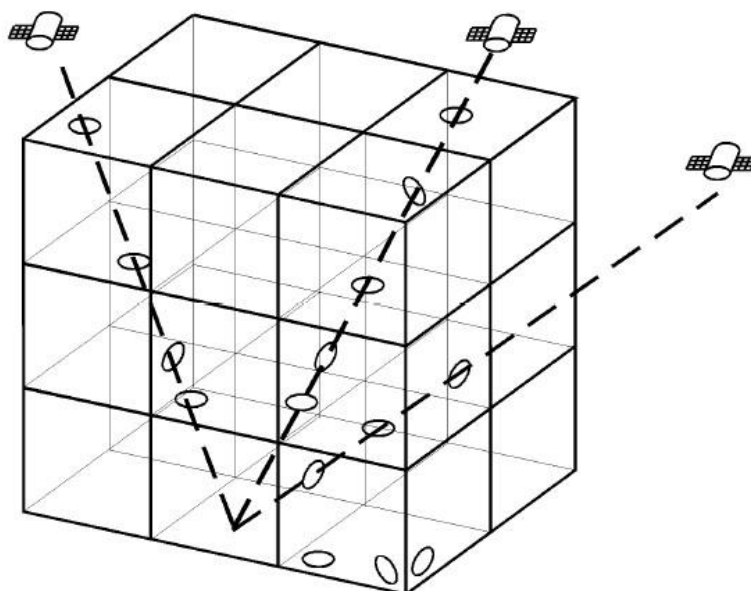
$$\text{ZTD} = \text{ZHD} + \text{ZWD} \quad (1)$$

Při zpracování měření ze sítě například dvaceti přijímačů GNSS a výpočtu hodnot IWV v hodinovém intervalu jsme schopni získat 480 hodnot IWV pro dané území a den. Porovnání tohoto čísla s výstupem z měření radiosond jasně hovoří ve prospěch metody GNSS. Značnou výhodou GNSS meteorologie je schopnost poskytovat stabilní a spolehlivé výsledky i za velmi nepříznivých atmosférických podmínek, jakými jsou extrémní bouře, vichřice či přívalové deště. Zásadní nevýhodou této již standardní metody je, že není schopna poskytnout informace o vertikálním rozložení vodních par v atmosféře, ale pouze integrovanou hodnotu pro celý profil. Z tohoto důvodu dochází k vývoji metody tomografie atmosféry.

TOMOGRAFIE ATMOSFÉRY

Hlavním principem GNSS tomografie atmosféry je diskretizace prostoru nad sítí referenčních stanic GNSS do trojrozměrné sítě buněk nazývaných voxely, viz **Obr. 1**. Potenciál této metody byl již několikrát prokázán (například [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]), v současnosti je metoda podrobována dalšímu vývoji a výzkumu.

Obsah vodních par je rekonstruován pro každý voxel sítě ze všech dostupných observací v podobě šikmých zpoždění signálu (Slant Wet Delay). Tato šikmá zpoždění signálu získáváme aplikací mapovací funkce na hodnotu platnou pro zenitový směr, abychom ji přepočítali na elevační úhel platný pro danou observaci. Obsah vodních par je v rámci každé buňky sítě považován za konstantní. Pro účely tomografie je dráha signálu atmosférou považována za přímku a vliv ohýbání signálu je tak zanedbáván. Díky tomuto předpokladu se celý problém inverze stává lineárním a vede na soustavu lineárních rovnic. Její řešení je možné pomocí několika numerických přístupů, z nichž nejčastěji používaná je metoda nejmenších čtverců, Kalmanova filtrace či algebraické rekonstrukční techniky (ART). Zásadním problémem tomografie je omezený počet signálů daný počtem pozemních přijímačů a v čase proměnlivým počtem velmi vzdálených družic. Zlepšení v této oblasti může přinést zhušťování sítí dvoufrekvenčních GNSS přijímačů levnými jednofrekvenčními moduly [13] a používání kombinace signálů z více GNSS (aktuálně GPS + GLONASS, v budoucnu přínos systémů Galileo a Beidou).



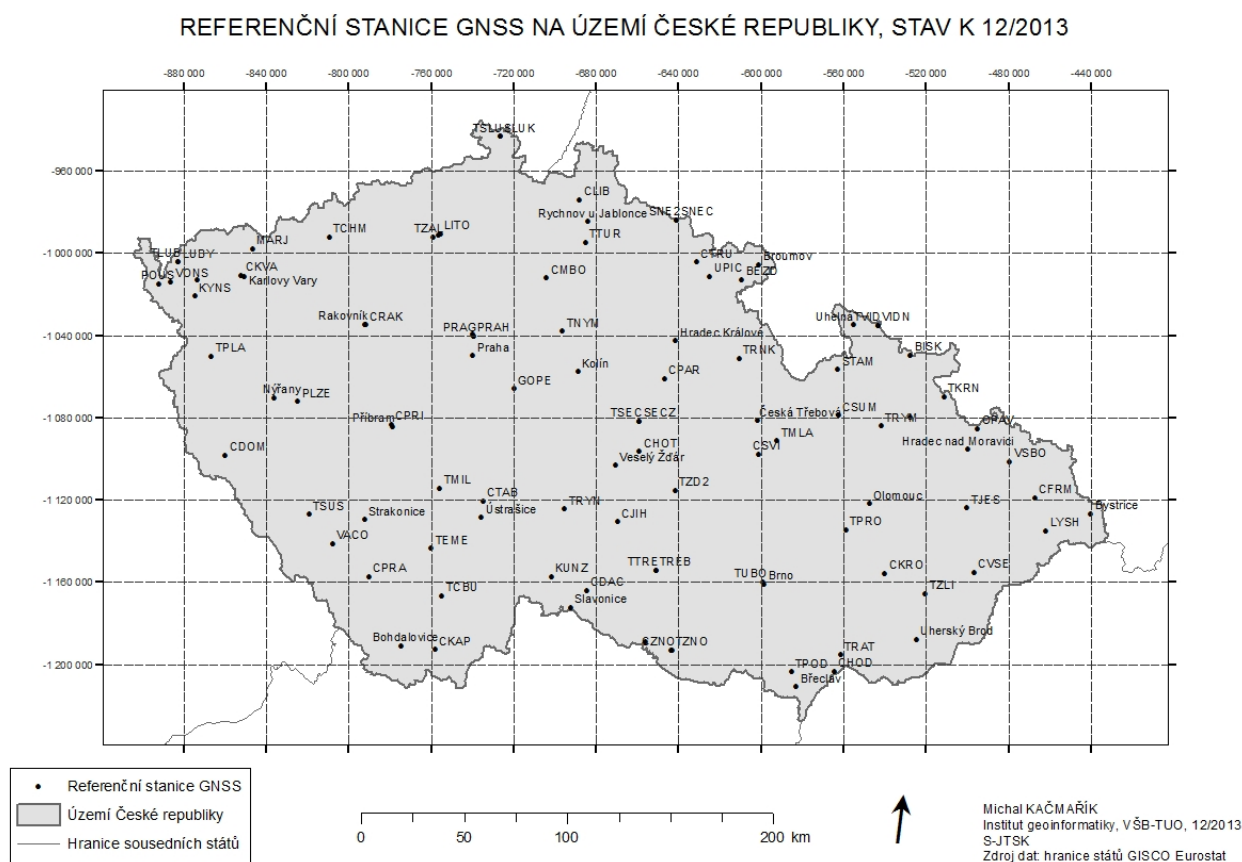
Obr. 1. Jednoduché schéma principu GNSS tomografie atmosféry [14]

Možnosti vybudování systému GNSS tomografie atmosféry nad Českou republikou

Na území České republiky existuje v současnosti 98 referenčních stanic GNSS zařazených do pěti samostatných sítí (VESOG, GEONAS, CZEPOS, TopNET, Trimble VRS Now Czech). Referenční stanice sítí VESOG a GEONAS jsou provozovány výzkumnými ústavami či vysokoškolskými institucemi zejména pro výukové a výzkumné účely. Zbývající tři sítě jsou komerčního charakteru a jejich hlavním účelem je poskytovat korekce pro diferenční GPS měření geodetické komunitě.

Důležitým parametrem pro potencionální vytvoření tomografického systému nad určitým územím je celkový počet permanentních přijímačů a průměrná vzdálenost mezi nimi. Ve srovnání s evropskými zeměmi, které již mají systém tomografie pro své území vybudován (Německo, Švýcarsko) či jsou ve fázi jeho vývoje (Polsko, Rakousko), je hustota referenčních stanic v rámci ČR lepší než hustota sítí používaných pro tomografii v Německu [11] či Švýcarsku [10] a výrazně lepší než situace v Polsku [15]. Rozmístění všech stanic je znázorněno na mapovém výstupu v rámci **Obr. 2**. Průměrná vzdálenost dvou stanic je 17 km, nejkratší vzdálenost mezi dvěma stanicemi pod 1 km a nejdelší vzdálenost stanice k nejbližší sousední

stanici 49 km. Síť by pro účely tomografie bylo možno doplnit o stanice nacházející se v pohraničí. Jen v rámci sítě CZEPOS jsou pro zkvalitnění poskytovaných korekcí využívána měření z 11 stanic umístěných na území Německa, 7 stanic v Polsku, 4 na Slovensku a 5 v Rakousku. Z těchto 27 stanic se 23 nachází přímo v pohraničí v blízké vzdálenosti k našim hranicím. Celá síť by mohla být dále doplněna o několik stanic ze sítě EUREF (DRES, KATO, LINZ, WTZR, zaneseny do mapového výstupu) a dosahovat tak konečného slibného počtu okolo 125 stanic. Pokud by se podařilo zajistit přístup k datům ze všech těchto stanic dodávaných v pravidelných intervalech blízkých reálnému času či přímo v reálném čase, bylo by nad územím České republiky možné vybudovat tomografický systém o obdobných parametrech, jakých dosahuje německý návrh (horizontální rozlišení 30 – 40 km, vertikální 500 m, časový interval vstupních observací 30 min). Do mapového výstupu byla doplněna síť s krokem 40 km, na jejímž základě je možné udělat si potencionální představu o přibližně dosažitelných počtech stanic v jednotlivých voxelech sítě a také územích, které na tom svou hustotou stanic nejsou příliš dobře. Jedná se zejména o oblasti v okolí Brna či některé lokality středních a severních Čech.



Obr. 2. Referenční stanice GNSS na území České republiky, leden 2013

Aktuálním cílem autora příspěvku a jeho spolupracovníků je vybrat vhodné časové období, získat pro něj data ze všech sítí referenčních stanic a pokusit se vytvořit první 3D tomografické řešení nad územím České republiky. Při této práci budou využity doposud nabyté znalosti a zkušenosti s vlastním dvojrozměrným tomografickým řešením, kterému je věnována následující kapitola.

METODA 2D GNSS TOMOGRAFIE ATMOSFÉRY

Tomografie atmosféry představená v minulé kapitole umožňuje z GNSS měření rekonstruovat prostorové rozložení obsahu vodních par v atmosféře. Vyžaduje k tomu však hustou síť přijímačů rozmístěných na území, pro které chceme rekonstrukci provádět. V minulosti byly tyto sítě budovány uměle jen pro krátkodobé účely určitého projektu, v posledních několika málo letech díky stále rostoucím počtům referenčních stanic v rámci národních sítí vzniká možnost pokusit se rekonstruovat rozložení vodních par nad územím celého státu. Realizace takového řešení je však spojena s dlouhodobou prací nejen v oblasti

samotného budování systému tomografické rekonstrukce (zajištění přístupu k datům z referenčních stanic různých sítí, vytvoření řešení zpracování hodnot ZTD v co nejrychlejší čas apod.).

Vzhledem k těmto problémům bylo přistoupeno k návrhu nové a jednodušší metody. Základní myšlenkou jejího návrhu je použití pouze jednoho řezu atmosférou namísto řešení celé trojrozměrné sítě voxelů. Nutnost mít k dispozici velké množství GNSS přijímačů umístěných v konkrétní síti by se díky tomu eliminovala pouze na několik přijímačů umístěných v terénu v přísmce. Výsledkem této metody by tedy nebyla znalost trojrozměrného rozložení obsahu vodních par v atmosféře, ale pouze vertikální profil těchto hodnot nad přijímačem umístěným ve středu přísmky, tedy výsledek totožný s výstupem z měření meteorologické radiosondy, pro potřeby meteorologie zcela dostačující. Návrh této metody s jejím podrobnějším popisem byl představen v [16], tento příspěvek je věnován popisu prvotních výsledků rekonstrukce profilů vodních par nad reálnými daty z kampaně na území České republiky.

Popis testovací kampaně a procesu rekonstrukce

Jako testovací kampaň byla použita data z šesti referenčních stanic (seřazeno dle jejich geografické polohy ve směru západ-východ = HABA, CKVA, CRAK, CPRG, CZKO, CPAR) rozmístěných do pomyslné přísmky okolo meteorologické stanice Praha-Libuš, která provádí radiosondážní měření. Celková délka přísmky je 231 km, průměrná vzdálenost mezi dvěma přijímači 46 km, orientace přísmky přibližně ve směru SZ-JV. Byla zpracována data za období 20. – 25. 9. 2012. Jelikož jsou radiosondy vypouštěny v 6hodinovém intervalu (0, 6, 12, 18 UTC), byl vždy vybírán co nejvhodnější hodinový interval GNSS měření pokud možno co nejvíce blízký času měření radiosondy, kdy se v úzkém pruhu vymezeném v zenitovém směru nad vybranými stanicemi vyskytoval co největší počet observovaných družic. Signály k těmto družicím za daný hodinový interval byly následně používány k tomografické rekonstrukci.

Hodnoty ZTD byly získány v 30minutovém intervalu zpracováním signálů ze systémů GPS a GLONASS technikou dvojitých diferencí v Bernese GPS Software, k extrakci hodnot ZWD a jejich následné konverzi na IWV byly použity hodnoty atmosférického tlaku a teploty vzduchu naměřené na profesionálních stanicích provozovaných ČHMÚ v dosahu GNSS přijímačů. Hodnoty tlaku byly přepočítány na nadmořskou výšku přijímače GNSS, hodnoty teploty byly převzaty bez zásahu. Pro výpočet šikmých hodnot obsahu vodních par (Slant IWV) byla použita Niellova mapovací funkce [17], do výpočtu nebyly zahrnuty horizontální gradienty troposféry ani post-fit residua.

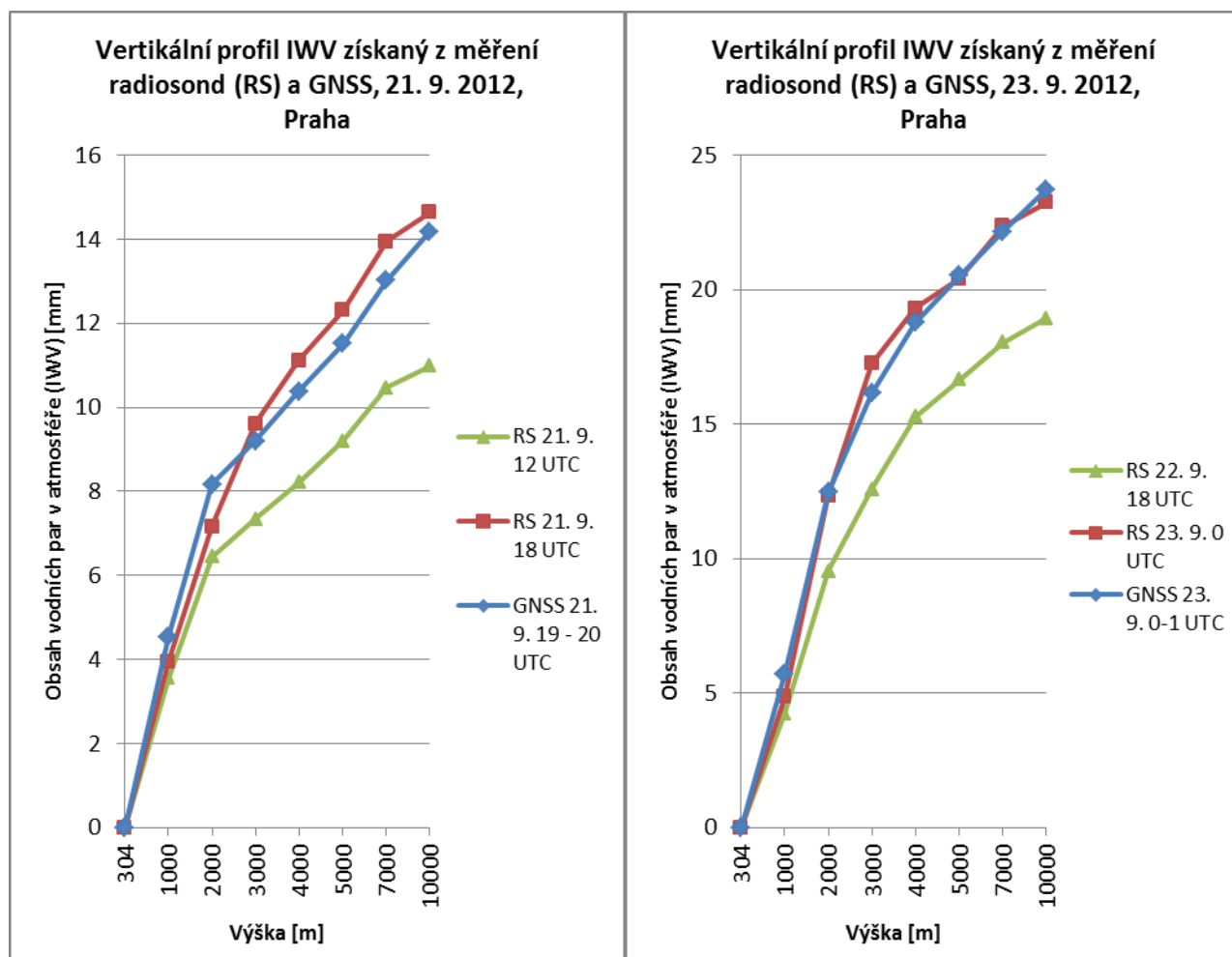
Prostor nad referenčními stanicemi byl rozdělen do 7 vertikálních vrstev (hranice ve výškách 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m, 5 000m, 7 000m, 10 000m). Typicky je pro tomografickou rekonstrukci využíváno jemnější vertikální členění (10–15 vrstev), které poskytuje lepší představu o rozložení vodních par v troposféře. V popisovaném případě se však jednalo o prvotní testování využitelnosti 2D metody, rekonstrukce s jemnějším vertikálním členěním jsou plánovány. V horizontálním směru byl systém rozčleněn do 6 buněk se středy umístěnými do místa polohy jednotlivých GNSS přijímačů.

Rekonstrukce byla prováděna numerickou metodou nejmenších čtverců v prostředí Matlab. Vstupem byly kromě šikmých hodnot obsahu vodních par také hodnoty IWV pro zenitový směr, které určovaly kontrolní součty v buňkách nad jednotlivými přijímači a podmínka, že hodnota IWV je v horní hranici tomografického systému (10 000 m) rovna 0. Signály, které tomografický systém opustily pod touto hranicí 10 000 m, byly z rekonstrukce předem vyloučeny. Pro inicializaci prvotního stavu vertikálního rozložení vodních par v troposféře byl používán profil naměřený radiosondou v čase předcházejícím tomografické rekonstrukci (například pokud byla zpracovávána GNSS měření z časového intervalu 10.30 – 11.30, bylo pro inicializaci systému použito měření radiosondy z 6.00 a výsledek rekonstrukce následně porovnáván s měřením radiosondy z 12.00).

Prvotní výsledky rekonstrukce

Aktuálně je používaný proces 2D rekonstrukce podrobován ladění a hledání optimálního nastavení parametrů metody nejmenších čtverců. **Obr. 3 a 4** předkládají ukázky vybraných vertikálních profilů obsahu vodních par v atmosféře ze dvou různých dnů kampaně. Na první pohled je patrné, že profily získané

z rekonstrukce s využitím GNSS signálů dosahují vysoké shody s profily naměřenými meteorologickými radiosondami a s pomocí inicializace počátečního stavu daného předcházejícím měřením radiosondy jsou schopny prezentovat změnu vývoje vodních par v atmosféře. Jedná se o dva vybrané profily z celkové sady 20 profilů, z nichž ne všechny dosahují takto evidentní shody. Po vyladění numerického řešení tomografie bude pro exaktnější zhodnocení provedeno statistické porovnání výsledků obou metod.



Obr. 3, 4. Porovnání vertikálních profilů vodních par v atmosféře (IWV) získaných z radiosondážních měření a metody 2D GNSS tomografie atmosféry pro vybrané časové intervaly ve dnech 21. a 23. 9. 2012

ZÁVĚR

GNSS meteorologie a tomografie atmosféry představují moderní distanční metody získávání informací o dějích v atmosféře, které by v budoucnu mohly významně doplnit klasická radiosondážní měření. Hlavním cílem představené práce bylo poskytnout základní informace o těchto metodách, představit reálnou možnost vybudovat tomografické řešení nad územím České republiky díky existující síti permanentních referenčních stanic a představit prvotní pozitivní výsledky rekonstrukce obsahu vodních par v atmosféře s využitím vlastní metody 2D tomografie.

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] Duan, J. a kol. (1996) GPS meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water. *Journal Appl. M.*, 24(24), pp. 830–838

- [3] Igondová, M. (2004) Využití permanentních sítí GPS na modelování troposféry a ionosféry, disertační práce, Slovenská technická univerzita, Bratislava, Slovenská republika
- [4] Seidel, D. J. (2002) Water Vapor: Distribution and Trends, The Earth System: Physical and Chemical Dimensions of Global Environmental Change, John Wiley & Sons, Ltd
- [5] Zhengdong, B. (2004) Near-Real Time GPS Sensing of Atmospheric Water Vapour, disertační práce, Queensland University of Technology, Austrálie
- [6] Flores, A., Rius, A., Vilá-Guearou, J., Escudero, A. (2001) Spatio-Temporal Tomography of the Lower Troposphere Using GPS Signals, Phys. Chem. Earth (A), Vol. 26, No. 6-8, pp. 405-411
- [7] Noguchi, W., Yoshihara, T., Tsuda, T., Hirahara, K. (2004) Time-Height Distribution of Water Vapor Derived by Moving Cell Tomography During Tsukuba GPS Campaigns, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 82, No. 1B, pp. 561-568
- [8] Gradinarsky, L. P., Jarlemark, P. (2004) Ground-Based GPS Tomography of Water Vapor: Analysis of Simulated and Real Data, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 82, No. 1B, pp. 551-560
- [9] Champollion, C., Masson, F., Bouin, M.-N., Walpersdorf, A., Doerflinger, E., Bock, O., Van Baelen, J. (2004) GPS water vapour tomography: preliminary results from the ESCOMPTE field experiment, Atmospheric research, Vol. 74, p. 253-274
- [10] Troller, M. (2004) GPS based Determination of the Integrated and Spatially Distributed Water Vapor in the Troposphere, disertační práce, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Švýcarsko
- [11] Bender, M., Dick, G., Ge, M., Deng, Z., Wickert, J., Kahle, H.-G., Raabe, A., Tetzlaff, G. (2011) Development of a GNSS water vapour tomography system using algebraic reconstruction techniques, Advances in Space Research, Vol. 47, Issue 10, pp. 1704-1720
- [12] Rohm, W. (2013) The ground GNSS tomography - unconstrained approach, Advances in Space Research, Vol. 51, pp. 501-513
- [13] Deng, Z. (2012) GPS Meteorology With Single Frequency Receivers, disertační práce, GFZ Potsdam, Německo
- [14] Miidla, P., Rannat, K., Uba, P. (2008) Simulated studies of water vapour tomography, WSEAS Transactions on Environment and Development, Issue 3, Vol. 4
- [15] Bosy, J., Rohm, W., Sierny, J. (2010) The Near Real Time Atmosphere Model Based on the GNSS and the Meteorological Data from the Ground Base Augmentation System ASG-EUPOS, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol. 38, Part 8, Japonsko
- [16] Kačmařík, M., Rapant, L. (2012) New GNSS Tomography of the Atmosphere Method, Geoinformatics FCE CTU, Vol. 9, pp. 63-76
- [17] Niell, A. E. (1996) Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths. Journal of Geophysical Research, Vol. 101, B2, pp. 3227-3246