

Vedecká rada Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Ing. Miroslava Igondová

Autoreferát dizertačnej práce

**VYUŽITIE PERMANENTNÝCH SIETÍ GPS NA
MODELOVANIE TROPOSFÉRY A IONOSFÉRY**

na získanie

vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor

v odbore doktorandského štúdia:

39-31-9 Geodézia a geodetická kartografia

Bratislava 2004

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre geodetických základov Stavebnej fakulty STU v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Miroslava Igondová
Katedra geodetických základov
SvF STU v Bratislave
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

Školiteľ: Doc. Ing. Ján Hefty, PhD.
Katedra geodetických základov
SvF STU v Bratislave
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

Oponenti: Prof. Ing. Ján Melicher, PhD.
Katedra geodetických základov
SvF STU v Bratislave
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

Prof. Ing. Jan Kostecký, DrSc.
Katedra vyšší geodézie
ČVUT v Praze, Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6, Česká republika

Doc. RNDr. Milan Lapin, CSc.
Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná o h pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia, vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie

39-31-9 Geodézia a geodetická kartografia

na Katedre geodetických základov SvF STU v Bratislave, Radlinského 11

Predseda spoločnej odborovej komisie:

Prof. Ing. Alojz Kopáčik, PhD.
Katedra geodézie, SvF STU v Bratislave
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

1 ÚVOD

Družicový globálny systém na určovanie polohy (GPS) bol pôvodne vyvinutý na absolútne určovanie polohy, navigáciu a presné určenie času. Hneď na začiatku jeho používania sa zrodila myšlienka využiť ho aj na presné relatívne určovanie polohy. Jedna z ďalších aplikácií GPS je určovanie atmosférických parametrov, čo je možné vzhľadom na fakt, že signál je počas prechodu od družice k prijímaču na zemskom povrchu ovplyvnený zemskou atmosférou. Troposféra a v nej obsiahnuté vodné pary spôsobujú systematické oneskorenie signálu a voľné elektróny v ionosfére môžu spôsobiť oneskorenie, resp. zrýchlenie signálu.

V súčasnosti sa uskutočňuje permanentné spracovanie existujúcej siete pozemných staníc GPS. Jednou z oblastí, kde by výsledky z permanentných spracovaní mohli byť efektívne využité, je aj meteorológia. GPS predstavuje perspektívny nástroj pre globálne permanentné monitorovanie atmosféry Zeme, ktorý je, na rozdiel od klasických metód, nezávislý od počasia a nevyžaduje si žiadnu kalibráciu meracieho systému.

Vzhľadom na relatívne hustú sieť staníc GPS je možné vytvárať modely celkového obsahu vodných pár a taktiež voľných elektrónov nad monitorovaným územím.

Dizertačná práca je zameraná na možnosť vytvárania aktuálnych regionálnych modelov troposféry a ionosféry na podklade permanentných meraní GPS. Práca vychádza z prehľadu technológií umožňujúcich monitorovanie dejov v troposfére a ionosfére. Uvádza informácie o systéme GPS, ktorý predstavuje základný nástroj na tvorbu modelov v rámci prezentovanej práce. Je tu uvedený prehľad permanentných sietí GPS, ktorých výsledky sú použité pri analýze troposféry a ionosféry a prehľad medzinárodných projektov zaoberajúcich sa využitím systému GPS na modelovanie troposféry a ionosféry. Obsahuje použité metódy spracovania danej problematiky: postupy a metódy pri tvorbe regionálnych modelov troposféry a ionosféry, výsledné modely, ako aj porovnanie modelov s inými dostupnými technológiami. Súčasťou dizertačnej práce je aj softvérové riešenie umožňujúce spracovanie modelov a analýza časových radov, ako jeden z nástrojov umožňujúcich skúmanie procesov v atmosfére.

2 SÚČASNÝ STAV V OBLASTI RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

Atmosféra tvorí plynný obal Zeme, ktorý je k nej pripútaný gravitačnou silou a v prevažnej miere rotuje spolu so zemeguľou. Siahá od zemského povrchu do výšky približne 30 – 40 tisíc km a bez výraznej hornej hranice prechádza do medziplanetárneho priestoru. Voda, či už v skupenstve tuhom, kvapalnom alebo plynnom je sústredená predovšetkým v spodnej časti do výšky 10 km. Jej obsah tu predstavuje 0.2 až 4 % z celkového objemu. V dôsledku kolobehu vody sa vodná para nad určitým miestom zemského povrchu obnovuje priemerne 47-krát za rok, teda približne každých 8 dní [16].

Troposféra predstavuje neutrálnu časť atmosféry bez elektricky nabitých častíc. V troposfére sú sústredené približne $\frac{3}{4}$ hmotnosti celej atmosféry a vyskytuje sa v nej takmer všetka voda (99%) obsiahnutá v atmosfére. Je to spodná časť atmosféry, ktorá siahá od zemského povrchu do výšky 16 až 18 km nad rovníkom, v stredných zemepisných šírkach v priemere do 11 km a do 7 až 9 km nad pólmi.

Ionosféra je elektricky vodivá časť atmosféry vo výške od 60 do 500 km. Ióny a elektróny sa tu uvoľňujú z atómov hlavne pôsobením slnečného ultrafialového žiarenia. Hustota iónov v ionosfére sa počas dňa mení. Maximálnu hodnotu nadobúda na danom mieste asi dve hodiny po pravom poludní a minimum nastáva pred svitaním.

Existuje mnoho metód umožňujúcich stanovenie obsahu vodných pár (PWV – Precipitable Water Vapour) v atmosfére. V minulosti existovalo len niekoľko priamych spôsobov (pozemné senzory, meteorologické balóny, ...). V súčasnosti je k dispozícii viacero systémov schopných monitorovať PWV na rozsiahlej ploche na diaľku (Lidar, rádiometer vodných pár, lietadlá nesúce meteorologické zariadenia, mikrovlnné a infračervené rádiometre, senzory na princípe slnečného zákrytu, GPS) [34].

Výskum ionosféry sa taktiež realizuje rôznymi metódami. Používajú sa magnetometre, riometre, radary s malým alebo veľkým rozptylom lúča, ionosondy, nízko letiace družice, systém TOPEX/Poseidon a taktiež GPS.

GPS – Globálny systém na určovanie polohy je navigačný systém založený na báze umelých družíc Zeme, ktorý umožňuje určenie polohy, navigáciu a získanie informácií o presnom čase používateľom vybaveným špeciálnymi prijímacími zariadeniami.

System pracuje s kódovými a fázovými meraniami. V oboch prípadoch signály vysielané družicami prechádzajú cez atmosféru, ktorá zväčšuje dĺžku optickej dráhy medzi družicou a prijímačom a následne predlžuje aj časový interval medzi vyslaním a prijatím signálu. Keďže meranie GPS je takto ovplyvnené atmosférou, je možné spätným spracovaním meraní určiť niektoré fyzikálne parametre atmosféry. Zmenu geometrickej vzdialenosti medzi družicou a prijímačom vplyvom troposféry alebo ionosféry označujeme troposférická, resp. ionosférická refrakcia.

Troposférická refrakcia ovplyvňuje rovnakým spôsobom kódové aj fázové merania, ale ionosférická refrakcia pôsobí raz kladným a raz záporným smerom, čo umožňuje jej vplyv eliminovať vhodnou kombináciou meraní. Veľkosť oboch refrakcií sa mení s časom a vzdialenosťou a je tiež funkciou elevačného uhla pozorovania (najmenšia refrakcia je v smere zenitu) [8].

V práci boli využité výsledky zo spracovania dvoch permanentných sietí GPS realizovaných na Katedre geodetických základov Stavebnej fakulty STU v Bratislave. Prvou je sieť 34 staníc, ktoré sú spracovávané v rámci Lokálneho analytického centra EUREF na uvedenej katedre. Druhá sieť, tvorená 35 stanicami situovanými v strednej Európe, je spracovávaná v rámci medzinárodného projektu CERGOP-2 / Environment.

Možnosťou využitia GPS pre meteorologické účely sa zaoberajú viaceré medzinárodné projekty. Výskum troposféry bol, alebo stále je, realizovaný v rámci projektov COST 716, WAVEFRONT, GEWEX, GPS/MET, GASP a EUREF Special Project Troposphere Parameter Estimation. Výskumom ionosféry sa zaoberajú projekty ATMOZ, GASP, ESA's Space Weather Applications Pilot Project, SPECTRE a IGS Ionosphere Working Group.

3 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavným cieľom dizertačnej práce je navrhnúť metodiku a realizovať tvorbu aktuálnych regionálnych modelov troposféry a ionosféry na podklade permanentných meraní GPS.

Konkrétne úlohy, ktorými sa bolo potrebné zaoberať pri dosahovaní hlavného cieľa, sa dajú zhrnúť do nasledujúcich čiastkových cieľov:

1. Vytvorenie prehľadu o existujúcich metódach a postupoch umožňujúcich modelovanie troposféry a ionosféry z meraní GPS.

2. Vzhľadom na potrebu znalosti meteorologických parametrov pri modelovaní troposféry je potrebné zaoberať sa presnosťou a dostupnosťou týchto parametrov.

3. Spracovaním meraní GPS získavame diskkrétne údaje o okamžitom stave troposféry. Tvorba výstižného aktuálneho modelu troposféry si preto vyžaduje štúdiu o hustote a počte staníc potrebných na regionálne modely.

4. Vizualizácia zostavených modelov troposféry a ionosféry.

5. Analýza dosiahnutých výsledkov porovnaním s inými dostupnými modelmi získanými nezávislými metódami.

6. Využitie metód analýzy časových radov na zistenie systematických zložiek v časových radoch hodnôt PWV a TEC. Vzhľadom na časové obdobie niekoľkých rokov, ktoré je spracovávané, bude možné určiť nielen krátkoperiodické, ale aj dlhoperiodické zložky uvedených časových radov.

7. Možnosti využitia získaných modelov troposféry a ionosféry v geodézii a iných prírodných vedách ako je meteorológia, klimatológia a hydrológia.

4 METÓDY SPRACOVANIA PROBLEMATIKY

4.1 TROPOSFÉRA A MOŽNOSTI JEJ MODELOVANIA POMOCOU GPS

Troposférická refrakcia, ktorej znalosť umožňuje stanovenie celkového obsahu vodných pár v troposfére, nie je funkciou frekvencie signálu. Závisí hlavne od meteorologických parametrov ovzdušia, akými sú najmä teplota, tlak a vlhkosť [8]. Troposférickú refrakciu T môžeme rozdeliť na suchú zložku T_d , ktorá tvorí asi 90% celkovej troposférickej refrakcie, čo predstavuje hodnotu okolo 2.3 m v smere zenitu a vlhkú zložku T_w . Suchá zložka je, na rozdiel od vlhkej zložky, pomerne ľahko modelovateľná.

Jeden z modelov na výpočet suchej zložky v zenite, model **Saastamoinena** [19], má tvar:

$$T_d(S) = \frac{2277 \cdot p}{1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0.00028 \cdot H}, \quad (1)$$

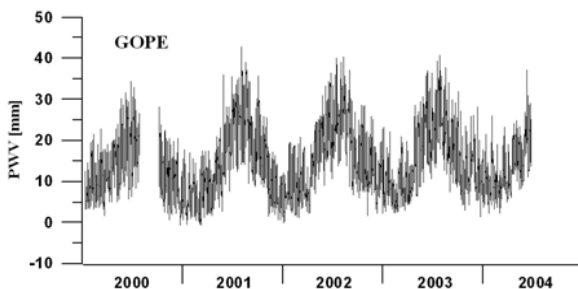
kde p [hPa] je celkový atmosférický tlak,
 φ zemepisná šírka a

H [km] elipsoidická výška stanice.

Vlhkú zložku troposférickej refrakcie T_w možno určiť jednoduchým odpočítaním suchej zložky T_d od celkovej troposférickej refrakcie T určenej na základe merania pomocou GPS. Celkové množstvo vodných pár v profile nad stanicou IWW (Integrated Water Vapour) [kg/m^2] získame z T_w aproximatívnym vzťahom

$$IWW = \kappa \cdot T_w = PWV \cdot \rho, \quad (2)$$

pričom hodnota κ je definovaná napr. v [1]. Iný spôsob vyjadrenia obsahu vodných pár v atmosfére je výška zodpovedajúceho stĺpca kondenzovanej vody PWV (Precipitable Water Vapour) [mm], ktorú získame z IWW uvážením hustoty vody ρ .



Obr. 1 Hodnoty PWV na stanici GOPE v rokoch 2000 – 2004.

Okrem znalosti meteorologických parametrov je, pre výpočet PWV , nutné poznať celkové troposférické oneskorenie (ZTD – Zenith Tropospheric Delay) na konkrétnej stanici. Priemerná štandardná odchýlka (presnosť) riešení ZTD jednotlivých lokálnych analytických centier voči kombinovanému riešeniu EUREF dosahuje hodnotu 5 mm. Ak vezmeme do úvahy, že približne platí vzťah $PWV = T_w / 6$, potom uvedená presnosť určenia ZTD spôsobí nepresnosť v určení PWV asi na úrovni 1 mm.

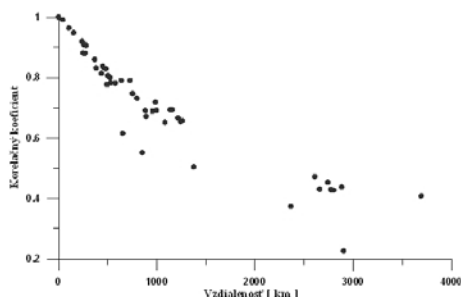
Z diskretných údajov PWV je možné vytvoriť model PWV na danom území v konkrétnom čase. Pri výbere staníc, ktoré budú zahrnuté do modelu, sú podstatné hlavne dve kritériá:

1. stanice by mali rovnomerne pokrývať modelované územie (pokiaľ časť územia neobsahuje žiadne údaje o PWV , hodnoty sa tu buď interpolujú

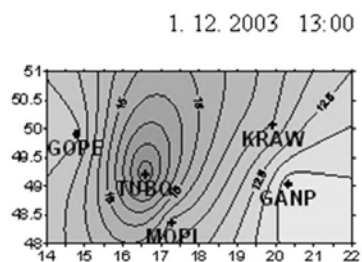
- z príliš vzdialených staníc, alebo sú extrapolované; v obidvoch prípadoch výsledný model stráca na presnosti),
2. sieť staníc musí byť dostatočne hustá, inak nie je možná spoľahlivá interpolácia.

Potrebná hustota staníc bola posúdená na základe vzájomných korelácií medzi jednotlivými stanicami v závislosti od ich vzdialenosti.

Korelácia klesá do vzdialenosti 500 km prakticky lineárne a dosahuje tu ešte relatívne vysokú hodnotu okolo 0.8. Preto sme sa snažili, aby stanice pre model neboli vzdialené viac ako 250 km (korelácia 0.9), vo výnimočných prípadoch (ak neexistujú v okolí iné vhodné stanice) 500 km.



Obr. 2 Grafické znázornenie korelácií hodnôt PWV v závislosti od vzájomnej vzdialenosti príslušných staníc.

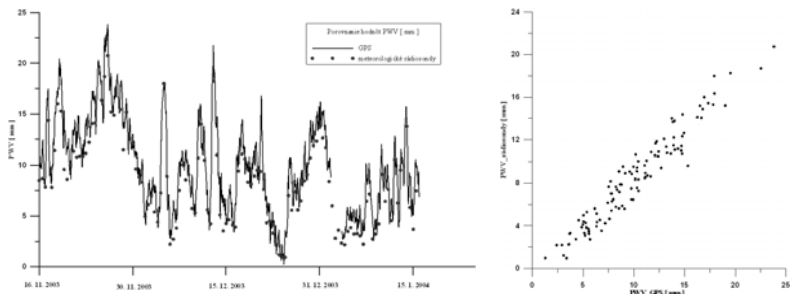


Obr. 3 Model PWV

Nezávislou metódou určenia obsahu vodných pár v atmosfére je priame meranie v troposfére pomocou meteorologickej rádiosondy, ktorá je vynášaná meteorologickým balónom. Sonda je schopná zaznamenávať údaje až do výšky 20, resp. 40 km.

Permanentná stanica GPS Gánovce – Poprad (GANP) je umiestnená v objekte Slovenského hydrometeorologického ústavu, kde sa realizuje taktiež vypúšťanie meteorologických balónov. Zo vzájomného porovnania hodnôt PWV získaných obidvomi metódami bola zistená stredná hodnota rozdielov 1.96 mm pri štandardnej odchýlke 2.07 mm. Veľkosť korelácie medzi obidvomi hodnotami PWV (bolo analyzovaných 88 dvojíc hodnôt) je 0.963, čo predstavuje veľmi dobrú zhodu.

Je tu však jasne viditeľný systematický posun obidvoch modelov. Hodnoty z GPS dosahujú systematicky vyššie hodnoty.



Obr. 4 Porovnanie hodnôt PWV získaných z meraní GPS a z meraní meteorologickými rádi sondami na stanici GANP v čase 16. 11. 2003 – 15. 1. 2004.

4.2 IONOSFÉRA A MOŽNOSTI JEJ MODELOVANIA POMOCOU GPS

Ionosféra predstavuje, na rozdiel od troposféry, elektricky vodivú časť atmosféry, ktorá rôzne ovplyvňuje merania v závislosti od frekvencie a charakteru elektromagnetickej vlny. Pri eliminácii ionosférických vplyvov sa obyčajne uplatňujú dva principiálne odlišné prístupy. Prvý využíva vlastnosť disperzného prostredia na to, aby vytvoril vhodnú kombináciu vysielaných frekvencií (L3 – Ionosphere-free combination – kombinácia zbavená vplyvu ionosféry), v ktorej bude vplyv ionosféry potlačený na minimum alebo úplne eliminovaný. Problém ionosférickej refrakcie sa tu rieši v procese spracovania meraní modifikáciou modelu vyrovnania bez nutnosti poznania stavu ionosféry v epoche merania. Druhý prístup predpokladá, že máme k dispozícii potrebné modelové údaje o ionosfére a použijeme ich na výpočet ionosférickej refrakcie I [8].

Hodnota TEC (Total Electron Content – Celkový obsah elektrónov), ktorá popisuje stav ionosféry, je udávaná v jednotkách TECU (Total Electron Content Unit; $TECU = 10^{16}$ elektrónov/ m^2), je to teda množstvo elektrónov vo valci nad miestom pozorovania, ktorého prierez má obsah $1 m^2$).

$$I_v = \frac{-40.3 \cdot 10^{16} \cdot TEC_v}{f^2}. \quad (3)$$

Veľkosť ionosférickej refrakcie v smere zenitu I_v je funkciou celkového obsahu voľných iónov v smere zenitu TEC_v a frekvencie elektromagnetickej vlny f . Pre získanie hodnoty v ľubovoľnom smere ($z \neq 0^\circ$) je potrebné použiť tzv. mapovaciu funkciu.

Modely ionosféry

Vo všeobecnosti možno modely ionosféry rozdeliť podľa rozsahu na globálne a regionálne modely (napr. model Európy). Na základe použitého matematického aparátu sa obidva druhy modelov delia do 2 skupín [5]. Sú to mriežkové modely (grid-based models) a modely popísané funkciou (function-based models).

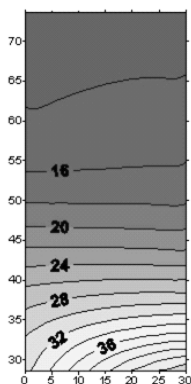
Matematické funkcie, ktoré sa používajú na popis ionosféry, sú:

- kosínusová funkcia – napr. denný kosínusový model vysielaný z družíc GPS v navigačnej správe,
- polynomicke funkcie,
- rozvoj do sférických harmonických funkcií.

Modely prezentované v rámci dizertačnej práce sú popísané rozvojom TEC_v do sférických harmonických funkcií.

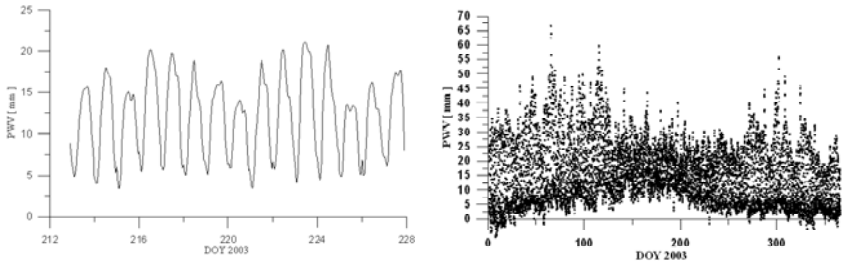
$$TEC_v(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{n,m}(t) (a_{n,m} \cos(m.s) + b_{n,m} \sin(m.s)). \quad (4)$$

$\tilde{P}_{n,m}(t)$ sú normované pridružené Legendreove funkcie stupňa n a rádu m argumentu $t = \sin \beta$ (β je geocentrická šírka) [20] a s predstavuje dĺžku fixovanú na Slnko. Prevodný vzťah medzi dĺžkou fixovanou na Slnko a geodetickou dĺžkou L má tvar [20] $s = L + UT - \pi$, kde UT je svetový čas (Universal Time). Koefficienty rozvoja (4) $a_{n,m}$ a $b_{n,m}$ sú obsiahnuté napr. v regionálnom ionosférickom modeli.



V posledných rokoch sa pozornosť viacerých výskumníkov ionosféry sústreďuje na tzv. tomografický model ionosféry [5]. Ide o model, ktorý popisuje ionosféru vo všetkých troch dimenziách, teda ako médium meniace sa aj vo vertikálnom smere, čo zodpovedá fyzikálnej realite. Toto umožňuje presnejšie skúmanie charakteristík ionosféry a následne jej presnejšie modelovanie.

Obr. 5 Regionálny model ionosféry (TEC) získaný z riešenia Lokálneho analytického centra SUT – 7. 5. 2004 o 12 hodín UTC.



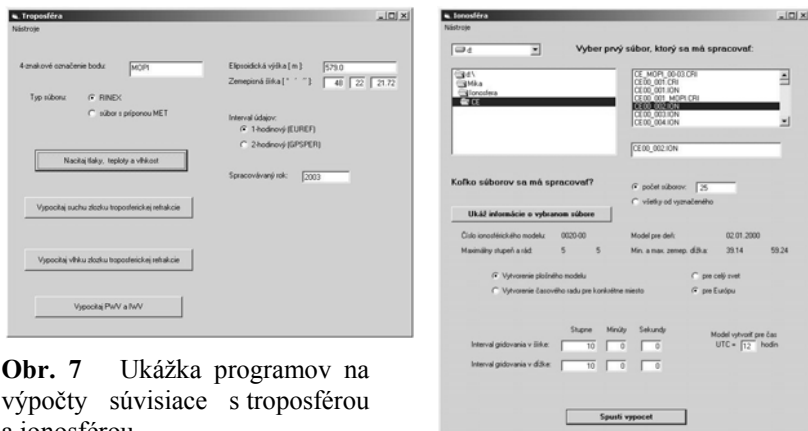
Obr. 6 Zmeny stavu ionosféry počas dňa (vľavo) na stanici MOPI a počas roku (vpravo) na stanici CAGL.

Hodnoty z modelu tvoreného na SUT vykazujú systematicky nižšie hodnoty voči iným modelom (napr. IGS, CODE, JPL) [2]. Rozdiel priemerne dosahuje hodnotu 3.5 – 4 TECU pri štandardnej odchýlke 3.7 – 4.2 TECU.

Rôzne porovnávané modely vo všeobecnosti dosahovali lepšiu zhodu počas letného obdobia. Najväčšie rozdiely sa ukazovali v zimných mesiacoch, kedy v našich zemepisných šírkach nastávajú väčšie výkyvy v ožiarení ionosféry Slnkom [2].

4.3 SOFTVÉROVÉ RIEŠENIE

V rámci dizertačnej práce boli vypracované dva vlastné počítačové programy, ktoré umožňujú výpočet PWV a TEC a obsahujú niekoľko ďalších pomocných funkcií. Bol použitý programovací jazyk Visual Basic 6.0, ktorý pracuje pod operačným systémom Windows.



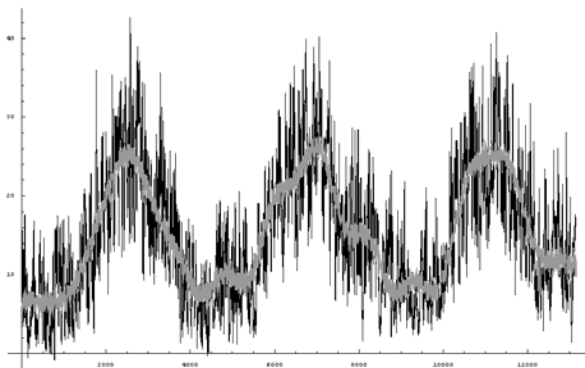
Obr. 7 Ukážka programov na výpočty súvisiace s troposférou a ionosférou.

4.4 ANALÝZA ČASOVÝCH RADOV PWV A TEC

Časový rad je množina pozorovaní zaznamenávaná postupne v čase. Predpokladá sa, že medzi jednotlivými pozorovaniami je rovnaká vzdialenosť v čase.

Matematickou analýzou je možné určiť jednotlivé systematické zložky (trend, sezónnu zložku a cyklickú zložku) obsiahnuté v časovom rade [3]. Tento proces sa nazýva dekompozícia časového radu. Po odstránení systematických vplyvov ostáva v časovom rade tzv. reziduálna zložka. Predstavuje fluktuácie v časovom rade, ktoré nemajú rozpoznaťelný systematický charakter. Reziduálnu zložku (biely šum), je možné modelovať pomocou tzv. Box – Jenkinsovej metodológie.

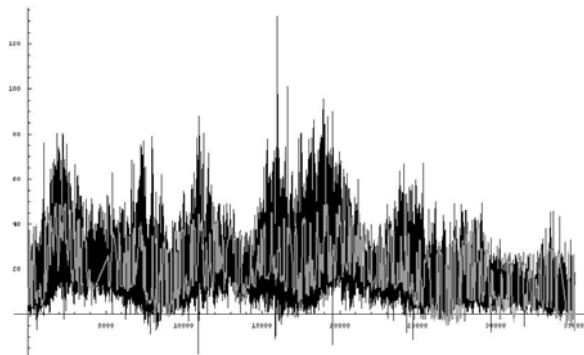
Analýza časového radu PWV pre stanicu GOPE bola vykonaná na 13140 údajoch. Štandardná odchýlka pôvodného súboru meraní dosahovala hodnotu 8.1 mm. Po určení trendu, sezónnej a cyklickej zložky dosahovala štandardná odchýlka reziduálnej zložky veľkosť 4.9 mm.



Obr. 8 Časový rad hodnôt PWV na stanici GOPE zobrazený spolu s trendom, sezónnou zložkou a cyklickou zložkou.

Analýzou bol zistený lineárny trend, ročná sezónna zložka a cyklické zložky s periódami $\frac{1}{2}$ roka, 3 roky, 219 dní, 99.5 dňa, 91 dní, 8.6 dňa, 2.57 dňa, 1 deň a $\frac{1}{2}$ dňa. Zvyšné reziduá sme ďalej modelovali pomocou Box-Jenkinsovej metodológie. Ako najlepší sa javil model ARMA(1, 1).

Pre analýzu ionosférického časového radu boli použité údaje o TEC na stanici MOPI v časovom období 4 rokov 2000 – 2003, čo je celkovo 35 064 údajov. Štandardná odchýlka pôvodných údajov bola 15.3 TECU.



Obr. 9 Časový rad hodnôt TEC na stanici MOPI zobrazený spolu s trendom, sezónnou zložkou a cyklickou zložkou.

V časovom rade bol identifikovaný lineárny trend a výrazne sa v ňom prejavili dve sezónne zložky – denná a ročná. Spektrálnou analýzou boli určené cyklické zložky s periódami 4 roky, $\frac{1}{2}$ roka, 1.003 dňa, $\frac{1}{2}$ dňa, 2 roky, 8 hodín, 6 hodín a 112 dní. Po odstránení systematických zložiek štandardná odchýlka dosiahla hodnotu 8.8 TECU. Ako najlepší model pre popis reziduálnej zložky sa opäť javil ARMA (1,1).

5 APLIKÁCIA TROPOSFÉRICKÝCH A IONOSFÉRICKÝCH MODELOV

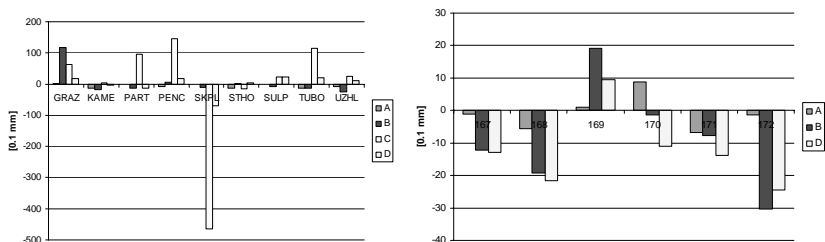
5.1 SPRACOVANIE LOKÁLNYCH SIETÍ GPS

Vytvorené troposférické modely môžeme využiť pri spracovaní lokálnych sietí GPS, ktoré napríklad kvôli krátkej dĺžke observácií neumožňujú vytvorenie vlastných modelov počas spracovania. Analýza vplyvu troposféry na dosiahnuté výsledky spracovania bola vykonaná na meraniach realizovaných v rámci kampane CEGRN 2003 (Central European GPS Geodynamic Reference Network - Stredoeurópska geodynamická referenčná sieť GPS), ktorá je súčasťou projektu CERGOP-2/Environment (Central European Regional Geodynamics Project - Stredoeurópsky regionálny geodynamický projekt). Pre analýzu bolo použitých celkovo 10 bodov, z ktorých 6 (GRAZ, PENC, SULP, TUBO, UZHL, KRAW) je

súčasťou stredoeurópskej permanentnej siete spracovávanej na KGZA a 4 body (KAME, PART, SKPL, STHO), ktoré nemajú permanentný charakter a merania sa na nich realizovali len v rámci uvedeného projektu.

Súradnice bodov boli určené niekoľkými nezávislými spracovaniami pomocou Bernského softvéru, pri použití rôznych parametrov výpočtu:

- Kombinované riešenie zo všetkých šiestich dní (výsledné riešenie kampane CEGRN 2003 zahrňujúce všetky body, na ktorých prebiehalo meranie); troposférický model bol počítaný ako jedna z neznámych (ďalej označované ako referenčné riešenie).
- Denné riešenia; troposférický model bol počítaný ako jedna z neznámych (ďalej označovaný ako riešenie A).
- Denné riešenia; na modelovanie troposféry bol použitý iba apriórny model Saastamoinena (riešenie B).
- Denné riešenia; vplyv troposféry nebol vôbec uvažovaný (riešenie C).
- Denné riešenie; použitý bol model troposféry získaný zo spracovania stredoeurópskej permanentnej siete doplnený o interpolované hodnoty na bodoch KAME, PART, SKPL a STHO (riešenie D).



Obr. 10 Odchýlky jednotlivých riešení vo výške od referenčného riešenia (vľavo) 16. 6. 2004.

Odchýlky jednotlivých riešení (okrem riešenia C) vo výške od referenčného riešenia na stanici PART počas šiestich dní, kedy prebehlo meranie 16. – 21. 6. 2004 (vpravo).

Dôležitosť modelovania troposféry pri spracovaní meraní GPS je jasne zreteľná z porovnania uvedených štyroch riešení, kde riešenie C, v ktorom sa neuvažoval vplyv troposféry, veľmi výrazne vybočuje. Vplyv troposféry sa najviac prejavuje vo vertikálnej zložke. Riešenie D, v ktorom bol použitý náš model, dosahuje odchýlky od referenčného riešenia na úrovni 2 – 3 mm, okrem stanice SKPL. Problém pri použití modelu PWV v takej podobe, ako bol v práci prezentovaný, je v lineárnej interpolácii, ktorá nijako

nezoľadňuje fakt, že s rastúcou nadmorskou výškou sa znižuje celkový obsah vodných pár v atmosfére. Tento problém je jasne viditeľný práve na stanici SKPL – Skalnaté pleso, ktorá je vo Vysokých Tatrách v nadmorskej výške asi 1800 m. V budúcnosti bude pri použití modelov potrebné vziať tento fakt do úvahy, či už priamo pri modelovaní, napr. využitím dodatočnej informácie o výške z digitálneho modelu reliéfu, alebo až pri interpolácii hodnôt z modelu, zavedením vhodnej korekcie z výšky.

Pri použití modelu na ostatných stanicích, ktoré nie sú súčasťou permanentných riešení (obr. 10 vpravo), odchýlky voči referenčnému riešeniu dosahovali hodnoty 1 – 2 mm.

Riešenie pri ktorom bol použitý iba apriórny model (riešenie B) a riešenie s použitím modelu doplneného o interpolované hodnoty (riešenie D), dosahovali rádovo asi rovnaké hodnoty, avšak pri použití apriórneho modelu riešenia vykazovali väčšie výkyvy v rámci jednotlivých dní. Riešenia D boli navzájom konzistentnejšie (okrem už spomínanej stanice SKPL).

Podobne ako modely troposféry, takisto aj ionosférické modely vytvárané pri permanentnom spracovaní sietí GPS je možné využiť ako vstupnú informáciu pri spracovaní lokálnych sietí. Znalosť stavu ionosféry má podstatný význam pre používateľov jednofrekvenčných prístrojov GPS. Podľa presnosti, aká je požadovaná, je možné použiť niekoľko ionosférických modelov, od vysielaného denného kosínusového modelu, až po aplikáciu regionálnych alebo globálnych modelov získaných z permanentných spracovaní meraní GPS.

5.2 APLIKÁCIE PRE PRÍRODNÉ VEDY SKÚMAJÚCE ATMOSFÉRU

Systém GPS je celosvetovo rozšírený a stovky staníc, ktoré permanentne zaznamenávajú údaje nielen o polohe, ale aj o stave celkového obsahu vodných pár v atmosfére a o celkovom obsahu voľných elektrónov v ionosfére, poskytujú vhodný zdroj informácií pre meteorológov, klimatológov, geofyzikov a ďalších záujemcov. Celá táto sústava už je vybudovaná a funkčná, preto predstavuje relatívne veľmi ľahko prístupný a lacný spôsob, ako získať uvedené údaje.

Aby boli modely GPS využiteľné pre meteorológov na spresnenie predpovedí počasia, je nutné ich poznať s časovým odstupom maximálne 3 hodiny. Tento problém sa však dá riešiť použitím ultrarýchlych (ultra-rapid) efemerid družíc, ktorých znalosť umožňuje určovanie PWV v takmer reálnom čase. Údaje, ktoré spracovanie meraní GPS poskytuje, doteraz

nebolo možné získať inými systémami v takom rozsahu (či už sa to týka celosvetovej relatívne hustej siete staníc, hustého intervalu záznamu údajov alebo dosahovanej presnosti), ako ponúka práve GPS.

Prvé analýzy prínosu GPS pre systémy založené na numerických predpovediach počasia (NWP – Numerical Weather Prediction) už boli realizované v rámci projektu COST 716. Európsky projekt TOUGH (Targeting optimal use of GPS humidity measurements in meteorology – Cielené optimálne využitie meraní vlhkosti systémom GPS pre meteorológiu), ktorý tento rok zahájil svoju činnosť, má za cieľ optimálne využitie údajov GPS v NWP, nájdenie najvhodnejších algoritmov pre asimiláciu údajov GPS a analýzy vplyvu GPS na presnosť modelov.

Modely troposféry rovnako ako aj modely ionosféry získané z meraní GPS je možné využiť pre vedecké účely, na detailnejšie poznanie procesov v atmosfére a ionosfére.

Detailné znalosť ionosféry a jej aktuálneho stavu je taktiež potrebná pre všetkých používateľov rádiových vln, ktoré ionosféra v podstatnej miere ovplyvňuje. O ionosférické modely by preto mohli mať záujem napríklad telekomunikačné spoločnosti.

6 PRÍNOS PRE VEDU A PRAX

Hlavným cieľom dizertačnej práce bolo navrhnúť metodiku a realizovať tvorbu aktuálnych regionálnych modelov troposféry a ionosféry na podklade permanentných meraní GPS.

Na základe splnenia úloh, ktoré si vyžadoval cieľ práce, môžeme uviesť výsledky dizertácie a ich prínos pre prax:

1. Vytvorenie prehľadu o existujúcich metódach a postupoch používaných na modelovanie troposféry a ionosféry, keďže na Slovensku nebola publikovaná žiadna literatúra zaoberajúca sa danou problematikou hlbšie. Taktiež boli matematicky presne popísané postupy pri tvorbe jednotlivých modelov.

2. Vytvorenie softvéru pre tvorbu a prácu s modelmi troposféry a ionosféry. Softvér umožňuje, na základe celkových troposférických refrakcií určených spracovaním meraní GPS v softvéri Bernese a známych meteorologických parametrov na jednotlivých staniaciach, vytvoriť aktuálne lokálne troposférické modely. Druhou možnosťou je vytváranie aktuálnych

modelov ionosféry na podklade koeficientov sférických harmonických funkcií, ktoré sú výsledkom spracovania meraní GPS v softvéri Bernese. Taktiež sú implementované funkcie pre vytváranie časových radov hodnôt PWV a TEC pre konkrétne miesto a niekoľko ďalších pomocných funkcií. Softvér je dostupný pre ďalších záujemcov o prácu v tejto oblasti.

3. Overenie presnosti vytvorených regionálnych modelov PWV porovnaním s nezávislou technológiou určenia obsahu vodných pár v troposfére, meraním pomocou meteorologických rádiosond. Obidve metódy dosiahli veľmi dobrú zhodu, na úrovni 2 mm, pričom technológia GPS umožňovala merania s niekoľkonásobne väčšou hustotou a teda poskytovala kvantitatívne viac informácií. Presnosť regionálnych modelov TEC bola overená porovnaním s globálnymi modelmi TEC, ktoré boli taktiež určené technológiou GPS. Regionálny model SUT vykazoval systematicky nižšie hodnoty o 3.5 – 4 TECU. Kvalitu globálnych, resp. regionálnych modelov ionosféry, získaných zo spracovania meraní GPS, nebolo možné spoľahlivo overiť vzhľadom na to, že nezávislý model ionosféry z meraní systému TOPEX sa ukázal vo viacerých prípadoch ako nepoužiteľný.

4. Vykonanie analýzy časových radov hodnôt PWV a TEC, čo umožnilo určenie krátkoperiodických a dlhoperiodických variácií uvedených časových radov. Najvýznamnejšou systematickou zložkou časového radu PWV bola ročná sezónna zložka. Ďalšie identifikované významné periódy dosahovali hodnoty ½ roka, 219 dní, 4 mesiace, 8.6 dňa a 2.57 dňa. Vzhľadom na veľkú hustotu údajov bolo možné identifikovať aj dennú a poldennú periódu. V časovom rade TEC sa najvýznamnejšie prejavila denná a ročná sezónna zložka. Cyklické systematické zložky mali periódy ½ roka, 112 dní, 29 dní, ½ dňa, 8 hodín a 6 hodín. Uvedená analýza prispieva k rozvoju vedeckých poznatkov o procesoch v troposfére a ionosfére.

5. Možnosť aplikácie získaných modelov troposféry v spracovaní lokálnych geodetických sietí. Praktické riešenie bolo aplikované na spracovaní meraní z kampane CEGRN 2003, ktorá je súčasťou projektu CERGOP – 2 / Environment. Porovnávané boli riešenia, v ktorých bol rôznym spôsobom modelovaný vplyv troposféry. Miera zhody riešenia pri použití modelu zo spracovaní permanentných meraní, ktorý bol doplnený o interpolované hodnoty niektorých staníc, a riešenia, v ktorom bol troposférický model určovaný ako jedna z neznámych, je vo vertikálnej zložke na úrovni 2-3 mm. Riešenie pri ktorom bol použitý iba apriórny model troposféry a riešenie s použitím modelu doplneného o interpolované

hodnoty dosahovali rádovo rovnaké hodnoty. Pri použití apriórneho modelu však riešenia vykazovali väčší rozptyl v rámci jednotlivých dní.

Prezentovaná práca predstavuje základný prehľad o možnostiach využitia systému GPS pre výskum a modelovanie atmosféry a môže slúžiť ako základ pre ďalší výskum v tejto oblasti. Boli tu prezentované niektoré analýzy a porovnania získaných modelov, ale ostáva ešte široký priestor pre ďalších záujemcov hlavne v oblasti aplikácie modelov, keďže tieto modely poskytujú informácie v celosvetovom rozsahu a s veľkou hustotou záznamu.

7 ZÁVER

Celosvetovo rozšírená sieť staníc GPS v súčasnosti predstavuje jedinečný nástroj umožňujúci monitorovanie troposféry a ionosféry. Obidve tieto zložky atmosféry, i keď každá iným spôsobom, ovplyvňujú signály GPS, ktoré nimi prechádzajú. Známe matematické vzťahy umožňujú v procese spracovania meraní GPS určovať aj tzv. troposférické a ionosférické oneskorenie, ktoré spôsobuje, že odmeraná vzdialenosť medzi družicou a prijímačom GPS sa javí dlhšia, ako je v skutočnosti.

Predložená dizertačná práca sa zaoberá možnosťami využitia meraní GPS na modelovanie celkového obsahu vodných pár v troposfére a celkového obsahu voľných elektrónov v ionosfére. Porovnanie získaných modelov s údajmi z iných dostupných metód ukazuje ich dobrú zhodu. Údaje zo spracovaní meraní GPS predstavujú bohatý zdroj informácií pre iné prírodné vedy, napríklad meteorológia, klimatológia alebo geofyzika, ktoré sa zaoberajú štúdiom troposféry a ionosféry. Modely majú uplatnenie aj pri spracovaní meraní GPS, najmä v lokálnych sieťach, kde hlavne troposféru nie je možné spoľahlivo modelovať v procese spracovania.

Z prezentovaných výsledkov môžeme vidieť, že systém GPS predstavuje sľubný nástroj na permanentné globálne monitorovanie atmosféry a veríme, že v blízkej budúcnosti bude naplno využívaný aj v tejto oblasti.

Zoznam publikovaných prác

IGONDOVÁ, M. - HEFTY, J.: Stanovenie obsahu vodných pár v atmosfére pomocou GPS. Zborník referátov: Geodetické referenčné systémy, Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2002.

IGONDOVÁ, M.: Stanovenie obsahu vodných pár v atmosfére pomocou GPS. Zborník referátov z 5. Odborné konferencie doktorského studia, Brno, 2003.

HEFTY, J. – IGONDOVÁ, M. – GERHÁTOVÁ, L. – KOVÁČ, M.: Report of the SUT LAC: Standard and alternative network solutions, EUREF Analysis Centres Workshop, Graz, 18. – 19. september 2003.

HEFTY, J. – IGONDOVÁ, M. – GERHÁTOVÁ, L. – KOVÁČ, M.: Modelovanie troposféry a ionosféry na základe kontinuálnych meraní GPS. Zborník referátov: Význam kozmických metód pre súčasnú geodéziu, Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2003.

IGONDOVÁ, M.: Modelovanie troposféry a ionosféry na základe kontinuálnych meraní GPS. Zborník referátov z 6. Odborné konferencie doktorského studia, Brno, 2004.

HEFTY, J. – GERHÁTOVÁ, L. – IGONDOVÁ, M. – KOVÁČ, M. – HRČKA, M.: The network of permanent GPS stations in Central Europe as the reference for CERGOP related activities. Proceedings of the symposium G 11 “Geodetic and geodynamic programs of the CEI (Central European Initiative)” Nice, France. Reports on Geodesy No. 2 (69), 2004. Warsaw University of Technology.

HEFTY, J. – IGONDOVÁ, M. – KOVÁČ, M. – HRČKA, M.: Sub-daily coordinate variations in EUREF permanent network. Conference 10th anniversary of IGS, Bern, 2004, (v tlači).

HEFTY, J. – IGONDOVÁ, M.: Aktivita Lokálneho analytického centra EUREF na Slovenskej technickej univerzite v Bratislave. Geodetický a kartografický obzor, ročník 50 (92), číslo 4-5/2004. Bratislava, 2004.

HEFTY, J. – KOVÁČ, M. – IGONDOVÁ, M.: Integration of epoch-wise GPS measurement campaigns into a permanent reference frame. Acta Geodyn. Geomater. Vol. 1, No. 3 (135), 2004

Zoznam použitej literatúry

- [1] BEVIS, M. – BUSINGER, S. – HERRING, T. A. – ROCKEN, CH. – ANTHES, R. A. – WARE, R. H.: GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, No. D14, pages 15,787 – 15,801, October 20, 1992
- [2] BEZRUČKA, J.: Modelovanie ionosféry z permanentných meraní GPS. Diplomová práca, Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita, Bratislava, 2004.
- [3] CIPRA, T.: Analýza časových řad s aplikacemi v ekonomii. SNTL, Praha, 1986.
- [4] DOUŠA, J.: Využití GPS pro účely meteorologie. *Geodetický a kartografický obzor*, ročník 46/88, 2000, číslo 8

- [5] GAO, Y. – LIU, Z. Z.: Precise Ionosphere Modeling Using Regional GPS Network Data, *Journal of Global Positioning System*, Vol. 1, No. 1: 18 – 24, 2002.
- [6] GAO, Y. – LIU, Z.: Ionospheric TEC predictions over a local area GPS reference network. *GPS Solutions*, Vol. 8, No. 1, Springer-Verlag 2004.
- [7] GOAD, C. C. – GOODMAN, L.: A Modified Hopfield Tropospheric Refraction Correction Model. In: *Proceedings of the Fall Annual Meeting of the American Geophysical Union*, San Francisco, California, December 12 – 17, 1974.
- [8] HEFTY, J. – HUSÁR, L.: *Družicová geodézia, Globálny polohový systém*, Bratislava: Slovenská Technická Univerzita, 2003.
- [9] HEISKANEN, W. A. – MORITZ, H.: *Physical Geodesy*. W. H. Freeman and company, San Francisco and London, 1967.
- [10] HOPFIELD, H. Two-quartic tropospheric refractivity profile correcting satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 74(18), 1969, s. 4487 – 4499.
- [11] HUGENTOBLER, U. – SCHAER, S. – FRIDEZ, P.: *Bernese GPS Software Version 4.2*, Astronomical Institute University of Berne, 2001.
- [12] IFADIS, M. I. – SAVVAIDIS, P.: Space to earth geodetic observations: Approaching the atmospheric effect. *Proceedings of EGS XXV General Assembly, Nice, France, 2000*. <http://gserver.civil.auth.gr/EGS2000-session-G4.03-ifadis-savvaidis.DOC>
- [13] LIN, L. S.: Remote sensing of ionosphere using GPS measurements. 22nd Asian Conference of Remote Sensing, 5 – 9 November 2001, Singapore.
- [14] MISRA, P. – ENGE, P.: *GLOBAL POSITIONING SYSTEM Signals, Measurements, and Performances*, Ganga-Jamuna Press, Massachusetts, 2001.
- [15] MOJZEŠ, M.: *Geofyzika a geodynamika 1. časť*. SVŠT, Bratislava, 1989.
- [16] MUNZAR, J. a kol.: *Malý průvodce meteorologii*. Praha: Mladá fronta, 1989
- [17] NEČAS, J. a kol.: *Oborové encyklopedie – Aplikovaná matematika*. SNTL, Praha, 1977.
- [18] NISHUMURA, M. – IWABUCHI, T. – NAITO, I. – SATOMURA, M.: Comparisons between GPS and radiosonde precipitable water vapors. *International workshop on GPS meteorology*, Tsukuba, Japan, 14. – 17. 1. 2003.
- [19] SAASTAMOINEN, J.: Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. In: *The Use of Artificial Satellites for Geodesy in Geodesy*. HENRIKSEN, S. W. – MANCINI, A. – CHOVIK, Z.

- B. H. (editori): Volume Geophys. Monogr. Ses. 15, pages 247 – 251. AGU, Washington, D. C. 1972.
- [20] SCHAER, S.: How to use CODE's Global Ionosphere Maps. May 1997.
- [21] SOBIŠEK, B. a kol.: *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. Praha: ACADEMIA, Ministerstvo životního prostředí ČR, 1993.
- [22] THAYER, D.: An improved equation for the radio refractive index of air. *Radio Science*, Vol. 9, p. 803 – 807, 1974.
- [23] VEDEL, H. – HUANG, X.-Y.: Impact of Ground Based GPS Data on Numerical Weather Prediction. Journal of Meteorological Society of Japan, Vol. 82, No. 1B, pp. 459 – 472, 2004.
- [24] XU, G.: GPS Theory, Algorithms and Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.
- [25] ZEMAN, A.: Fyzikální geodézie. ČVUT, Praha, 1998.
- [26] <ftp://olggps.oeaw.ac.at> European permanent reference network EUREF
- [27] <http://igsceb.jpl.nasa.gov/> International GPS Service for Geodynamics
- [28] <http://pcl.physics.uwo.ca/pclhtml/introlidar/introlidarf.html> SICA, R.: Exploring the Atmosphere with Lidars.
- [29] http://www.adlerplanetarium.org/learn/sun/solar_cycle.ssi The Solar Cycle and Sunspots
- [30] <http://www.ae.utexas.edu/courses/ase389/midterm/carter/carter.html>
- [31] <http://www.epncb.oma.be> EUREF Permanent Network
- [32] http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey/chap6/627.htm RIZOS, CH.: Principles and Practice of GPS Surveying, chapter: Measurement Biases and Errors, Ionospheric delay, 1999.
- [33] <http://www.haarp.alaska.edu/haarp/> High Frequency Active Auroral Research Program.
- [34] http://www.hbm.com/knowledge%20base/UD_LINCORR.htm Computation of Linear Correlation Coefficient
- [35] <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/garch/selection3.html> The MathWorks Homepage.
- [36] <http://www oulu.fi/~spaceweb/textbook/> Space Physics Textbook, 1998.
- [37] <http://www.shmu.sk> Slovenský hydrometeorologický ústav
- [38] http://www.sciencedaily.com/encyclopedia/empirical_orthogonal_functions Online Science Encyclopedia
- [39] http://www.windows.ucar.edu/spaceweather/sun_earth9.html Learning system covering the Earth and Space sciences.

Summary

Modeling of troposphere and ionosphere using permanent GPS observations

Global Positioning System (GPS) was originally developed for absolute positioning, navigation and timing. Next application was relative positioning, useful mainly for geodesists. One of the further possibilities of GPS is determination of atmospheric parameters. Electromagnetic signal is affected by troposphere and ionosphere on the way from GPS satellite to receiver on the Earth's surface. Therefore these parts of atmosphere can be modeled during processing of GPS measurements. We can determine Integrated Water Vapour (IWV) in the troposphere and Total Electron Content (TEC) in the ionosphere.

The presented thesis contains information about methods of modeling IWV and TEC using GPS observations. Models derived from GPS processing were compared with data from independent methods and there was found good coincidence among them. Models of PWV and TEC are useful as additional input information for precise processing of local GPS networks (if modeling of troposphere and ionosphere is not possible during the processing) and also for natural sciences, for example meteorology, climatology, geophysics etc. Continuous observations allow investigation of systematic effects in long time series of data. Results from time series analysis contribute to knowledge about troposphere and ionosphere.

GPS is full operating worldwide system. Therefore it can offer IWV and TEC data with high space and time (1 to 2 hours) resolution. No other system used in meteorology and other sciences can offer this kind of data with the same density. We believe that in the close future GPS will be used for meteorological purposes in full range the system can offer.