

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Lombar, T., 2013. Analiza prisotnosti vodne pare v ozračju iz opazovanj GNSS. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Stopar, B., somentor Sterle, O.): 46 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Lombar, T., 2013. Analiza prisotnosti vodne pare v ozračju iz opazovanj GNSS. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Stopar, B., co-supervisor Sterle, O.): 46 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJ
PRVE STOPNJE
TEHNIČNEGA
UPRAVLJANJA
NEPREMIČNIN**

Kandidatka:

TINA LOMBAR

**ANALIZA PRISOTNOSTI VODNE PARE V OZRAČJU IZ
OPAZOVANJ GNSS**

Diplomska naloga št.: 17/TUN

**MONITORING OF ATMOSPHERIC WATER VAPOR BY
THE ANALYSIS OF GNSS OBSERVATIONS**

Graduation thesis No.: 17/TUN

Mentor:
prof. dr. Bojan Stopar

Predsednik komisije:
viš. pred. mag. Samo Drobne

Somentor:
asist. mag. Oskar Sterle

Ljubljana, 27. 06. 2013

»Ta stran je namenoma prazna«

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVE

Podpisana **TINA LOMBAR** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom: »**ANALIZA PRISOTNOSTI VODNE PARE V OZRAČJU IZ OPAZOVANJ GNSS**«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 7. 6. 2013

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.2:551.507:551.57(043.2)
Avtor:	Tina Lombar
Mentor:	prof. dr. Bojan Stopar
Somentor:	asist. mag. Oskar Sterle
Naslov:	Analiza prisotnosti vodne pare v ozračju iz opazovanj GNSS
Tip dokumenta:	Dipl. nal.–VSŠ
Obseg in oprema:	46 str., 2 pregl., 7 sl., 3 graf., 25 en., 2 pril.
Ključne besede:	GNSS meteorologija, troposferska refrakcija, vodna para, opazovanje prisotnosti vodne pare v zraku

Izvleček

Diplomska naloga preučuje možnosti uporabe tehnologije GNSS za ugotavljanje prisotnosti vodne pare v zraku. Zaradi vodne pare v ozračju pride do zakasnitve signala na poti od oddajnika do sprejemnika, kar imenujemo troposferska refrakcija. To zakasnitev lahko zelo dobro ocenimo in jo povežemo z vsebnostjo vodne pare v stolpcu zraka. Študije kažejo, da lahko na ta način in s primerno obdelavo podatkov zagotavljamo podatke, ki jih uporabljajo meteorologi za opazovanje vremena in vremenske napovedi. Na konkretnem primeru smo preverili, ali obstaja povezava med vrednostmi mokre komponente troposferske refrakcije, zaznanimi z metodo GNSS, in meteorološkimi opazovanji prisotnosti vodne pare.

Razporeditev vodne pare vpliva na razporeditev oblakov in padavin. Najprej smo podatke GNSS-opazovanj o količini vodne pare, zbranih na območju celotne Slovenije, interpolirali in izrisali ter izris primerjali z radarsko sliko padavin. Izkazalo se je, da teh rezultatov ne moremo primerjati in da podatka o količini vodne pare ne moremo tako enostavno povezati s podatki o padavinah.

Primerjali smo tudi GNSS-opazovanja prisotnosti vodne pare z meteorološkim izračunom gostote vodne pare na eni točki. Rezultati statistične obdelave so pokazali, da med podatki obstaja srednja do močna povezanost.

Rezultati lastne analize in podatki študij v tujini kažejo, da bi lahko tak način analize prisotnosti vodne pare ob sodelovanju strokovnjakov s področja geodezije in meteorologije prišel v uporabo namesto meteoroloških opazovanj, zagotovo pa bi jih lahko vsaj izboljšal ali dopolnil.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC:	528.2:551.507:551.57(043.2)
Author:	Tina Lombar
Supervisor:	Prof. Bojan Stopar, Ph. D.
Co-advisor:	Assist. Oskar Sterle, M. Sc.
Title:	Monitoring of atmospheric water vapor by the analysis of GNSS observations
Document type:	Graduation Thesis – Higher professional studies
Scope and tools:	46 p., 2 tab., 7 fig., 3 graph., 25 eq., 2 ann.
Key words:	GNSS meteorology, tropospheric refraction, water vapor, observing presence of water vapor in the air

Abstract

The graduation thesis analyses the possibilities of usage of GNSS technology for observing the presence of water vapor in the air. Water vapor causes the delay of signals propagating from GNSS satellites to ground-based GNSS receivers. We call that tropospheric refraction. We can estimate this delay pretty well and connect it with the height of the water column. Researches showed, that that way we can produce data, that are used by meteorologists for weather observation and weather forecasts. With the experiment, we checked, whether there is a connection/correlation between zenith wet delay, estimated with GNSS gathered data and meteorological data of presence of water vapor. The distribution of water vapor is closely connected to the distribution of clouds and rainfall.

First, we compared graphical presentation of data on distribution of water vapor, collected with GNSS on the area of Slovenia, with the rainfall radar picture. It proved that we can't compare those data and that the connection between water vapor and rainfalls is not that simple. Then we also compared GNSS observation of water vapor with meteorological calculation of water vapor density. Results of statistical analysis showed, that there is a middle to strong connection between both types of data.

Results of the researches and analysis that were done abroad show, that GNSS analysis of presence of water vapor, along with cooperation of experts from both, geodesy and meteorology, could maybe become useful as a replacement tool for meteorological observations, or at least an improvement or completion of them.

ZAHVALA

Hvala mentorju prof. dr. Bojanu Stoparju in somentorju asist. mag. Oskarju Sterletu za pomoč pri izdelavi diplomske naloge in za predajanje znanja z zame najbolj zanimivega področja geodetske stroke. Za pomoč se zahvaljujem tudi viš. pred. mag. Samu Drobnetu.

Jožetu Vrhovšku hvala za lobiranje za podatke na Agenciji RS za okolje.

Pot do sem je bila naporna. Hvala vsem, ki ste me ta čas prenašali.

Domačim. Sošolcem za razumevanje in pomoč, vesela sem, da smo postali prijatelji. Urošu, da me je seznanil s to vedo, me spodbujal in mi pomagal pri študiju v vseh možnih urah dneva.

Posebej bi se rada zahvalila vsem tistim s Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, ki so držali z mano. Asist. mag. Oskar Sterle, doc. dr. Dušan Petrovič in Zdene Breška, hvala ker ste me razumeli.

Gotofo je!

Izgled je pomemben, pamet je pomembnejša, srce je najpomembnejše.

Prof. dr. Miro Cerar

KAZALO VSEBINE

IZJAVE	IV
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	V
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION	VI
ZAHVALA	VII
1 UVOD	1
2 O SISTEMIH GNSS.....	3
2.1 Začetek vesoljske dobe.....	3
2.2 Sistemi GNSS (globalni navigacijski satelitski sistemi)	3
2.2.1 Začetki navigacijskih sistemov.....	3
2.3 O sistemu GPS.....	4
2.3.1 Vesoljski segment sistema GPS	4
2.3.2 Razvoj GPS-satelitov.....	5
2.3.3 Kontrolni segment	5
2.3.4 Uporabniški segment	6
2.4 GPS-signal.....	6
2.5 Kodna opazovanja	7
2.6 Fazna opazovanja	7
2.7 Določanje položaja z GNSS-tehnologijo.....	8
2.8 Vplivi na opazovanja GNSS.....	9
2.9 Metode geodetskih GNSS-meritev	11
2.9.1 Statična metoda.....	11
2.9.2 Hitra statična metoda	12
2.9.3 Kinematična metoda	12
2.9.4 RTK-GNSS-metoda.....	12
3 VPLIVI ATMOSFERE NA SIGNAL GNSS	13
3.1 Ionosfera	13
3.2 Troposfera.....	13
3.2.1 Troposferska refrakcija.....	14
3.2.1.1 Saastamoinenov model troposferske refrakcije	15
3.2.1.2 Niellov model projekcijske komponente troposferske refrakcije	15
3.3 O radarskih meritvah	17
3.3 Merjenje količine padavin	19
3.4 Vodna para v zraku.....	20
3.5 Opazovanje prisotnosti vodne pare.....	20
3.5 GNSS-meteorologija	21
3.6 Praktična uporaba GNSS-meteorologije	23

4 OPIS PRIMERA	25
4.1 Primerjava radarske slike padavin in izrisa porazdelitve vodne pare.....	25
4.1.1 Meteorološki podatki.....	25
4.1.2 Podatki GNSS	25
4.1.3 Metoda dela, izračun	27
4.1.4 Izris in interpolacija količine vodne pare v stolpcu zraka	29
4.1.5 Interpolacija z metodo minimalne ukrivljenosti.....	29
4.1.6 Primerjava izrisanih vrednosti višine vodnega stolpca in radarskih slik.....	29
4.2 Primerjava meteoroloških podatkov o absolutni vlažnosti in podatkov o vsebnosti vodne pare v stolpcu zraka, pridobljenih z geodetskimi opazovanji	34
4.2.1 Meteorološki podatki.....	34
4.2.3 Podatki GNSS	34
4.2.4 Metoda dela, obdelava.....	35
4.2.5 Razsevni grafikon.....	36
5 ZAKLJUČKI.....	39
VIRI.....	41

OKRAJŠAVE, SIMBOLI

ETRS – angl. European Terrestrial Reference System – evropski terestrični referenčni sistem.

D48/GK koordinatni sistem – horizontalni državni koordinatni sistem, vzpostavljen leta 1948. Predstavlja ga astrogeodetska mreža trigonometričnih točk prvega reda

DOP – angl. dilution of precision, je merilo za presojo kvalitete določitve položaja. Podaja mero kakovosti geometrijske razporeditve satelitov GNSS.

GLONASS – rus. Globalnaja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistema – ruski satelitski navigacijski sistem.

GMT program – angl. Generic Mapping Tools – odprtokodna zbirka, ki vsebuje funkcije in orodja za prikazovanje in analize prostorskih podatkov.

GNSS – angl. Global Navigation Satellite System – globalni navigacijski satelitski sistem.

GPS – angl. Global Positioning System – kratica in ime za ameriški vojaški globalni navigacijski satelitski sistem.

MEO – angl. Middle Earth Aerospace Orbit – sateliti, ki so v srednji zemeljski tirnici, od okrog 2000 do 36000 km nad zemeljskim površjem.

NASA – angl. National Aeronautics and Space Administration – ameriška nacionalna zrakoplovna in vesoljska agencija.

NAVSTAR – angl. Navigation System using Timing And Ranging – ime ameriškega programa razvoja navigacijskega sistema.

ppm – angl. parts per milion – število delov v milijonu delov (delež od milijon delov).

PWV – angl. precipitable water vapor – vsebnost vodne pare v stolpcu zraka.

RTK GNSS-metoda – angl. real time kinematic – relativna metoda GNSS-izmere, ki omogoča določitev položaja z znano kakovostjo v realnem času.

SIRAD – slovensko radarsko omrežje, ki ga razvija, upravlja in vzdržuje Agencija RS za okolje.

UTC – angl. Coordinated Universal Time. Univerzalni koordinirani čas je mednarodno sprejet standardni čas.

SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

Efemeride – tabele s podatki o parametrih, ki jih uporabimo za določitev lege nebesnih teles in umetnih satelitov v odvisnosti od časa. Za potrebe reševanja geodetskih nalog, ki jih izvajamo s tehnologijo GNSS, uporabljamo več vrst efemerid; oddane (ang. broadcast) efemeride, ki jih pridobimo v času izvajanja opazovanj, pri katerih natančnost omogoča določitev položaja satelitov s točnostjo do 10 m, najhitreje efemeride (IGU - ultra rapid) efemeride, ki so na voljo, pa so za dva dneva nazaj in en dan vnaprej, in določajo položaj satelitov s točnostjo do 1 dm, hitre efemeride IGR (rapid), ki so na razpolago za tri dni nazaj, in določajo položaj satelitov z natančnostjo okoli 5 cm, ter končne, IGS-efemeride, ki so dosegljive za tri tedne nazaj, in določajo položaj satelitov s točnostjo, boljše od 5 cm (Pavlovčič Prešeren, 2011).

Ekstrapolacija – metoda, ki na podlagi znanih vrednosti spremenljivke na določenem območju pripiše vrednosti spremenljivke na območju, kjer te sicer niso znane (Šumrada, 2011).

Interpolacija – metoda za določitev iskane vrednosti na nepoznani legi na podlagi poznanih vrednosti v okolici (Šumrada, 2011).

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Človek je od nekdaj raziskoval planet, na katerem je živel. Opazil je, da niso vsi dnevi enako dolgi, da Sonce ni vse leto enako visoko nad obzorjem. Ko je začel potovati v daljne kraje, je opazil, da zvezda Severnica in druge zvezde okrog nje ostajajo na isti višini, če se premika v smeri vzhod-zahod, in da se njihova višina spreminja, kadar se premika v smeri sever-jug. Videl je, da se velikost sence predmetov spreminja, kadar se premika v smeri sever-jug, in ostaja približno enaka, kadar potuje v smeri vzhod-zahod (Smith, 1997). Geodezija je najstarejša izmed geo-ved in je bila v začetku tesno povezana z astronomijo (Kuhar, 2009). Eratosten (276 – 194 pr. n. št.) pa je prvi izračunal velikost Zemlje in dokazal, da je okrogla. S tem je nastala geodezija kot samostojna znanost.

Pridobiva podatke o obliki in velikosti Zemlje, o njenem težnostnem polju, vzpostavlja koordinatne sisteme za rešitev svojih nalog, ukvarja se s pridobivanjem podatkov o detajlu na Zemljinem površju in s prikazovanjem le-tega. Podatki, ki jih zagotavlja, so uporabni za različne namene: zvezde (katerih lego določa astronomija) lahko uporabljamo kot referenčne točke, s pomočjo katerih rešujemo naloge geodezije, navigiramo ladje, znanje geodezije je omogočilo sočasno kopanje predorov z dveh strani hriba (NASA, 2012). Za povečanje ekonomičnosti in točnosti rešitve geodetskih nalog so iskali nove metode dela in razvijali nove geodetske instrumente. Razvila in uveljavila se je fotogrametrija, ki je omogočila pridobivanje podatkov na območjih, kjer klasična geodezija ni bila uporabna, razvilo se je daljinsko zaznavanje in nazadnje lasersko skeniranje ... (Kregar, 1954; Geodetic science 2013). Iznajdba radioteleskopov in umetnih satelitov je omogočila uporabo geodetskih opazovanj za spremljanje premikanja tektonskih plošč, z analiziranjem tirnic umetnih satelitov pa dobivamo vpogled v spreminjanje oblike Zemlje in njene težnosti (NASA, 2012).

Geodezija je neposredno povezana z mnogimi drugimi znanstvenimi disciplinami kot so: hidrografija, gradbeništvo, urbani menedžment, okoljski menedžment, geografija, planetologija, ekologija, geofizika, astronomija, oceanografija, znanosti o atmosferi in geologija (Vaníček, 2001).

Od devetdesetih let prejšnjega stoletja proučujejo tudi možnosti uporabe GNSS-sistemov za opazovanje meteoroloških parametrov v zraku. Pojem, ki označuje daljinsko zaznavanje vodne pare na podlagi opazovanj GNSS, je GNSS-meteorologija. Če želimo podatke o položaju dobiti s primerno natančnostjo, moramo upoštevati medij, skozi katerega potuje signal od satelita do sprejemnika. Eden izmed teh vplivov je količina vodne pare v zraku. Ta ima veliko vlogo pri nastajanju oblakov in padavin. Tehnologija GNSS torej omogoča tudi opazovanje količine ter prostorske in časovne razporeditve vodne pare v ozračju, metoda pa je v primerjavi z ostalimi načini zbiranja podatkov o vlagi v zraku veliko cenejša in deluje v vseh vremenskih razmerah.

V okviru diplomske naloge skušamo ugotoviti, ali je mogoče vzpostaviti povezavo med geodetskimi opazovanji GNSS, prisotnostjo vodne pare v ozračju in podatki o količini padavin oz. o količini vodne pare. Z analizo na konkretnem primeru skušamo ugotoviti, ali so podatki teh opazovanj primerljivi in ali med njimi obstaja povezava, ki bi nakazovala, da je GNSS-tehnologija uporabna tudi za namene meteorologije.

2 O SISTEMIH GNSS

2.1 Začetek vesoljske dobe

Leta 1957 so znanstveniki Sovjetske zveze s kozmodroma v Bajkonurju v Kazahstanu izstrelili Sputnik 1, prvi umetni satelit, ki je obkrožil Zemljino orbito. To je pomenilo začetek vesoljske dobe in poletov v vesolje. Hkrati je dogodek zaostрил hladno vojno med Združenimi državami Amerike in Sovjetsko zvezo, začela se je t. i. vesoljska tekma.

Ni šlo le za zmage posameznikov, pač pa za prevlado političnega sistema (Collins, 1999). V ZDA so se zbal, da izgubljajo premoč na področju znanosti in tehnologije, zato so znanost in izobraževanje tudi politično podprli. Že leta 1958 so v vesolje izstrelili prvi ameriški satelit Explorer 1, ustanovili civilno Nacionalno zrakoplovno in vesoljsko agencijo NASA, v obdobju naslednjih devetih let so finančna sredstva, namenjena Zvezni znanstveni fundaciji, povišali s 3,5 milijona na 500 milijonov dolarjev na leto (McCormick in sod., 2008). Prva spoznanja in vedenje, da je tirnice satelitov mogoče določiti s površja Zemlje, so odprla pot v vesolje. V šestdesetih letih sta ameriška vojska in CIA (Centralna obveščevalna agencija) razvila vohunski vesoljski program z imenom Corona, da bi iz zraka nadzorovali Sovjetsko zvezo in Kitajsko (Rojc, 2008). Pojavili so se prvi komunikacijski sateliti, ki so omogočali satelitske televizijske prenose in satelitsko telefonijo (Krmelj, 2012), in prvi vremenski sateliti (Tiros-1) (Oštir, 2006), s katerih so meteorologi s pomočjo modelov, ki so jih razvili, lahko tolmačili satelitske slike. V šestdesetih in sedemdesetih letih prejšnjega stoletja so začeli razvijati prve globalne navigacijske sisteme.

2.2 Sistemi GNSS (globalni navigacijski satelitski sistemi)

Globalni navigacijski satelitski sistemi so sistemi za določevanje položaja na podlagi znanih položajev satelitov in opazovanj razdalj med sprejemniki in sateliti. Sestavljajo jih trije segmenti:

- Vesoljski segment, ki ga sestavlja konstelacija delujočih satelitov, ki uporabnikom oddaja signal,
- kontrolni segment sestavljajo kontrolne postaje na Zemlji, ki spremljajo delovanje satelitov in izračunavajo parametre satelitovih tirnic,
- uporabniški segment, ki ga predstavljamo vsi uporabniki sistema (MZIP, GURS, 2012a).

2.2.1 Začetki navigacijskih sistemov

V sedemdesetih letih dvajsetega stoletja so v ZDA začeli vzpostavljati sistem TRANSIT, ki je začel delovati leta 1964 in prenehal leta 1996. Sistem je omogočal določanje položaja ameriškim podmornicam na 25 metrov natančno (Clarke, 1998). Sočasno se je v okviru programa NAVSTAR začel razvoj danes najbolj uveljavljenega sistema GPS (Global Positioning System), ki ga je razvijalo ameriško obrambno ministrstvo za potrebe vojske (L. Easton, 2000). GPS-tehnologijo so želeli vgrajevati v bombe, da bi te s pomočjo satelitsko podprte navigacije zadele svoj cilj (BBC, 2007). Prvi

satelit sistema, Navstar 1, je bil v vesolje izstreljen 22. februarja 1978, sistem, ki ga danes sestavlja 31 satelitov GPS, je polno operativen od 17. julija 1995 (GPS, 2012).

Prav tako so v sedemdesetih letih svoj navigacijski sistem Tsiklon-Tsikada razvijali v Rusiji, prvi navigacijski satelit Cosmos-192 so izstrelili leta 1967. Sistem so sestavljali sateliti z nizko orbito, kar ni zadostilo potrebam raznovrstnih uporabnikov. Do leta 1995 so izstrelili 24 satelitov, ki predstavljajo konstelacijo sistema GLONASS in omogočajo določitev položaja na vsakem kraju v vsakem trenutku (Nis GLONASS, 2012).

Trenutno je na svetu razpoložljivih več navigacijskih sistemov; poleg že uveljavljenih GPS-a in GLONASS-a svoje sisteme razvijata še Kitajska in Evropska unija.

Kitajska je svoj regionalni navigacijski sistem Beidou oz. Compass začela razvijati leta 2000, saj je želela za določanje položaja v prostoru zagotoviti svojo tehnologijo. Sistem je z desetimi sateliti operativen od začetka leta 2012 (BBC News Technology 2011). Evropska komisija in evropska vesoljska agencija sta se v devetdesetih letih zaradi vse večje uporabe satelitske navigacije in zaradi možnosti poslovnih priložnosti, ki jih ta prinaša, odločili, da bosta razvili samostojni civilni navigacijski sistem Galileo. Prva dva od načrtovanih 30 satelitov sta v vesolju od jeseni 2011 (ESA, 2012).

2.3 O sistemu GPS

GPS (Global Positioning System) je kratica imena ameriškega vojaškega globalnega navigacijskega satelitskega sistema. Deluje v okviru programa NAVSTAR, pod okriljem ameriškega ministrstva za obrambo. Ameriške zračne sile razvijajo, vzdržujejo in upravljajo z vesoljskim in kontrolnim segmentom (GPS). Sistem omogoča določitev položaja na podlagi opazovane razdalje med danimi točkami (sateliti) in novimi točkami (točko na Zemlji, kjer se nahajamo).

2.3.1 Vesoljski segment sistema GPS

Vesoljski segment predstavlja konstelacija satelitov, ki uporabnikom posredujejo radijske signale. Uporabnikom je na razpolago signal vsaj 24 satelitov, ki do uporabnika prenaša informacije, na osnovi katerih je mogoče določiti položaj in točen čas. V zadnjih letih je v vesolju 31 (število ni enako skozi obdobje več let) operativnih GPS-satelitov in še tri do štirje nadomestni, ki jih po potrebi lahko ponovno aktivirajo. Sateliti so locirani v srednji Zemljini orbiti (so MEO (Middle Earth Aerospace Orbit) sateliti) na višini približno 20200 km nad Zemljo in jo obkrožijo dvakrat dnevno. Razporejeni so na šestih ravninah, ki so proti ravnini ekvatorja nagnjene pod kotom 55° , imajo črkovne oznake od A do F, in so enakomerno razporejene od pomladišča proti vzhodu. Na vsaki ravnini se nahajajo štirje sateliti z oznakami od 1 do 4. Sateliti niso popolnoma enakomerno razporejeni v ravninah, saj tako omogočajo optimalno »vidljivost« oz. dostopnost z Zemljinega površja. Glede na številko satelita in ravnino imajo tako oznake od A1 do F4.

Taka razporeditev omogoča, da so z vsake točke na Zemlji v vsakem trenutku vidni vsaj štirje GPS-sateliti (GPS, 2012). GPS-signal mora za uspešno določitev položaja sprejemnika vsebovati podatke, ki omogočajo identifikacijo satelita, podatke o času in trenutnem položaju satelita in informacije o razmerah v Zemljini atmosferi.

2.3.2 Razvoj GPS-satelitov

Konstelacijo GPS sestavljajo sateliti različnih generacij. Prvi so bili Block I sateliti s konca sedemdesetih let 20. stoletja. Samostojno so delovali tri do štiri dni. Zadnji satelit te generacije je nad Zemljo krožil do leta 1995 (Janet 2007). Zdaj vesoljski segment GPS sestavljajo sateliti generacij Block II, ki so jih začeli izstreljevati ob koncu osemdesetih let, sateliti Block IIA, sateliti generacije IIR, ki so sposobni medsebojno izmenjavati podatke in imajo opremo, ki omogoča samostojno pripravo navigacijskih sporočil, sateliti IIR(M), ki imajo dodatno novo civilno kodo L2C in dve vojaški kodi ter sateliti IIF, ki imajo dodano tretjo civilno kodo. V primerjavi s prejšnjimi sateliti, imajo sateliti generacije IIF najdaljšo življenjsko dobo, novo frekvenco L5 za večjo natančnost geolociranja, izboljšanje interne ure in programsko prilagodljive procesorje (GPS, 2012; Triglav, 2010). Razvijajo že generacijo GPSIII, ki bo zagotavljala še boljšo natančnost časa in položaja, in bo izpolnjevala zahteve civilnih in vojaških uporabnikov (GPS, 2012).

2.3.3 Kontrolni segment

Delovanje GPS-sistema nadzorujejo Zračne sile Združenih držav Amerike. Sprva so kontrolni segment predstavljale glavna kontrolna postaja v bližini Colorado Springsa in še štiri kontrolne postaje na Havajih, na otoku Ascension na območju južnega Atlantika, na otoku Diego Garcia v Indijskem oceanu in na otoku Kwajalein v Osrednjem Pacifiku. Leta 2005 so zgradili še šest nadzornih postaj, tako da je vsak satelit v vsakem trenutku viden vsaj z dveh postaj. To omogoča bolj natančen izračun efemerid, kar za končnega uporabnika pomeni bolj natančno določitev položaja. V prihodnosti načrtujejo izgradnjo še petih nadzornih postaj, ki bi omogočale »vidnost« vsakega satelita z vsaj treh postaj hkrati (Kowoma.de, 2012).

Nadzorne postaje komunicirajo s sateliti, nadzorujejo satelitski signal, spremljajo podatke o stanju satelitovih ur in te podatke pošiljajo glavni nadzorni postaji, kjer opravljajo analize in določajo parametre tirnic GPS-satelitov. Enkrat ali dvakrat dnevno iz nadzorne postaje satelitom prek oddajnih anten prenašajo navigacijsko sporočilo. Sateliti IIR generacije lahko komunicirajo z drugimi sateliti, z njimi izmenjujejo dobljene podatke in sami popravljajo podatke o njihovi orbiti (GPS, 2012; Kowoma.de, 2102).

2.3.4 Uporabniški segment

Vsi uporabniki sistema GPS, mehanska GPS-oprema, programska in strojna merska oprema ter postopki izmere predstavljajo uporabniški segment sistema GPS. Sprejemniki GPS iz dobljenih signalov izračunajo svoj položaj in čas, za kar so potrebni podatki z vsaj štirih satelitov. GPS-sprejemniki se glede na svoj namen razlikujejo, saj zagotavljajo podatke z različno stopnjo natančnosti. GPS-sledilnike lahko uporabljamo za nadzor starejših ljudi, otrok ali hišnih ljubljencev, namestimo jih lahko v avtomobile, mopede, na kolesa, ki jih tako v primeru kraje laže najdemo. GPS-naprave, ki shranjujejo podatke o prepotovani poti uporabljajo pohodniki, kolesarji, padalci, jadralci, letalci (Florjančič, 2012).

Uporabljamo jih za navigacijo vozil in plovil, v geodeziji pa za potrebe topografske in katastrske geodetske izmere, v inženirski geodeziji za pridobivanje informacij o prostoru pred pričetkom gradnje, med njo in za spremljanje premikov in deformacij po njej, za fotogrametrične izmere, v kartografiji za izboljšanje kakovosti obstoječih kart, v globalni geodeziji za vzpostavitev mrež na globalnem nivoju, za geodinamične raziskave, v pomorski geodeziji in kartografiji, pri hidrografskih raziskavah (Stopar, 2011). Raziskovalni projekti pa preizkušajo nove možnosti uporabe te tehnologije – z opazovanji GNSS lahko tudi ocenjujemo vrednosti različnih parametrov v Zemljini atmosferi (Dana, 2012).

2.4 GPS-signal

Vsak satelit oddaja unikatni navigacijski signal na treh elektromagnetnih valovanjih: L1, s frekvenco $f_{L1} = 1575,42$ MHz, L2 s frekvenco $f_{L2} = 1227,6$ MHz in L5 s frekvenco $f_{L5} = 1176,45$ MHz. Frekvence so izbrane tako, da ionosfera čim manj vpliva na signal. Ta tako prehaja skozi oblake, se pa odbija od vodnih površin, zaustavi ga fizična ovira (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2011).

Nosilno valovanje, ki omogoča prenos kod in navigacijskega sporočila, ter tako tudi določitev časa potovanja signala in razdalje, je desnosučno krožno polarizirano valovanje. Satelitski signal je moduliran z dvema PRN (pseudo random noise) kodama, ki sta unikatni za vsak satelit.

Valovanje na frekvenci L1 je modulirano s C/A (Coarse/Acquisition) in P (Precise) navigacijsko kodo in navigacijskim sporočilom, na frekvenci L2 je valovanje modulirano s P navigacijsko kodo in navigacijskim sporočilom (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2011).

C/A (Coarse acquisition) oz. splošna koda, ki je dostopna civilnim uporabnikom, je sestavljena iz 1023 delov in se ponovi vsako milisekundo, frekvenca kode je $f_{C/A} = 1,023$ MHz. Valovna dolžina dela kode je $\lambda = 293$ m, dolžina celotne kode pa skoraj 300 km.

P (precise) oz. natančna koda, dostopna le pooblaščenim uporabnikom, je bolj kompleksna binarna koda s frekvenco 10,23MHz in valovno dolžino dela kode $\lambda = 29,3$ m, ki se v celoti ponovi na vsakih 266 dni (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2011).

Navigacijsko sporočilo, ki je modulirano na obe nosilni valovanji, omogoča določitev položaja sprejemnika v realnem času, saj vsebuje podatke o efemeridah satelitov, popravke urinega teka satelitovih ur, informacije o stanju sistema in GPS-model ionosfere. Osnovna enota navigacijskega sporočila je dolga 1500 bitov, navigacijsko sporočilo se oddaja s frekvenco $f_{NAV} = 50$ Hz.

Razdaljo med sateliti in sprejemniki lahko določimo z opazovanji dveh količin satelitskega signala: merske kode in fazne nosilnega valovanja.

2.5 Kodna opazovanja

Kodna opazovanja so opazovanja časovnega intervala od trenutka oddaje do trenutka sprejema kode. Razdaljo med satelitom in sprejemnikom bi lahko določili, če bi bili satelitova in sprejemnikova ura popolnoma usklajeni, a nista. Izmerjen časovni interval tako vsebuje pogrešek satelitove in sprejemnikove ure, izmerjena razdalja se zato imenuje psevdo razdalja. Satelit in sprejemnik generirata vsak svojo kodo, v sprejemniku se korelira koda nosilnega valovanja z valovanjem, generiranim v sprejemniku. Kodna opazovanja omogočajo pridobitev položaja z natančnostjo 10 – 30 m, kar ne zadošča za uporabo v geodeziji. Metode GNSS-izmere, ki jih uporabljamo v geodeziji, temeljijo na faznih opazovanjih (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2011).

2.6 Fazna opazovanja

Fazna opazovanja temeljijo na primerjavi faze sprejetega valovanje s satelita z fazo valovanja, generiranega v sprejemniku. Meri se razlika vrednosti faze med njima. Sprejemnik s primerjavo obeh valovanj v nekem trenutku izvede opazovanje faze (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2011). Opazovanja praviloma potekajo dalj časa in sicer v vnaprej predvidenih časovnih intervalih (Janet, 2007).

S tvorjenjem faznih razlik izboljšamo natančnost določitve položaja točk. Uporabljamo jih lahko, če z vsaj dvema sprejemnikoma hkrati sprejemamo signal s štirih ali več satelitov.

Poznamo:

- Enojne fazne razlike – tj. razlika enojnih faznih razlik za dvoje opazovanih valovanj, oddanih z dveh satelitov. S tvorjenjem enojnih faznih razlik odstranimo pogreške satelitovih ur.
- Dvojne fazne razlike – tj. razlika enojnih faznih razlik za dvoje opazovanih valovanj, oddanih z dveh satelitov. Z dvojnimi faznimi razlikami odstranimo pogreške sprejemnikovih ur.

- Trojne fazne razlike – razlike dvojnih faznih razlik, sesavljena za dva različna trenutka opazovanj. V izrazu za trojne fazne razlike odpade neznano začetno število celih valov, saj je le-to konstantno v času opazovanj (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2011).

Signal od oddajnika do sprejemnika potuje skozi Zemljino atmosfero, katere vplive moramo ustrezno upoštevati, da lahko dobimo položaj z zahtevano natančnostjo.

2.7 Določanje položaja z GNSS-tehnologijo

Sistem omogoča določitev položaja na podlagi opazovane razdalje med danimi in novimi točkami. Sateliti so dane točke, saj je njihov položaj znan v vsakem trenutku, nove točke pa so GPS-sprejemniki na Zemlji. Časovni interval, tj. čas, v katerem signal (elektromagnetno valovanje) pripotuje od oddajnika do sprejemnika, je osnova za določitev psevdorazdalje – tj. mera za razdaljo med satelitom in anteno sprejemnika. Določen je kot razlika med trenutkom oddaje signala s satelitovim sistemom ur in trenutkom sprejema signala, določenega s sprejemnikovo uro. S poznavanjem hitrosti potovanja elektromagnetnega valovanja in na podlagi znanega časa potovanja lahko določimo razdaljo med satelitom in sprejemnikom, ne pa tudi točnega položaja sprejemnika. Tega lahko določimo kot ločni presek vsaj treh razdalj med tremi sateliti in sprejemnikom. Če imamo opazovanja še s četrtega satelita, lahko odpravimo še pogrešek ure sprejemnika (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2011).

Geometrično razdaljo satelit-sprejemnik torej določimo kot:

$$P = \rho + c\Delta t + I + T + \xi \quad (1)$$

P – psevdorazdalja, izmerjena razdalja

ρ – geometrijska razdalja

$c\Delta t$ – pogrešek stanja satelitove in sprejemnikove ure

T – vpliv troposfere

I – vpliv ionosfere

ξ – šum

Podatki s satelitov GPS so brezplačno (vendar s primerno opremo) na voljo vsem civilnim, komercialnim uporabnikom in uporabnikom za namene znanosti. Sistem GPS zagotavlja dve ravni storitev:

standardno določitev položaja (SPS) in precizno določitev položaja (PPS). Standardna določitev položaja je dostopna vsem uporabnikom, PPS pa omogoča visoko natančno določitev položaja za vojaške namene.

2.8 Vplivi na opazovanja GNSS

Na signal, ki prepotuje od satelita do sprejemnika, delujejo številni vplivi:

- a) Z izvorom v satelitu: vpliv na tirnico satelita, pogrešek satelitove ure;

Efemeride, ki določajo tirnico satelita, so določene vnaprej, vendar dejanska tirnica, po kateri satelit potuje, od nje odstopa. Pogrešek tirnice satelita vpliva na merilo in rotacijo GNSS-mreže. Lahko ga eliminiramo ali zmanjšamo z uporabo bolj natančnih efemerid.

V navigacijskem sporočilu so parametri stanja satelitovih ur določeni vnaprej in zanje velja enaka ugotovitev kot za tirnico satelita. Pogrešek lahko odstranimo z enojnimi faznimi razlikami.

- b) z izvorom v mediju: inosferska refrakcija, troposferska refrakcija;

Zaradi vplivov v mediju, skozi katerega prehaja EMV (elektromagnetno valovanje), to ne potuje naravnost. Vpliv je odvisen od dolžine poti EMV in višinskega kota satelita. Vplive modeliramo z modeli ionosfere in troposfere, vendar ga nikoli ne moremo popolnoma odstraniti.

- c) vpliv geometrije satelitov in sprejemnika;

Faktor DOP (dilution of precision) je merilo za presojo kakovosti določitve položaja sprejemnika. Podaja mero za kakovost geometrijske razporeditve uporabljenih satelitov.

V GNSS je pogosta uporaba DOP faktorjev (DOP=dilution of precision) kot funkcije diagonalnih elementov kovariančne matrike koordinat v lokalnem sistemu.

Kovariančna matrika ocenjenih koordinat sprejemnika je:

$$\Sigma_{\mathbf{LL}} = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} q_n^2 & q_{ne} & q_{nh} \\ q_{en} & q_e^2 & q_{eh} \\ q_{hn} & q_{he} & q_h^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_n^2 & \sigma_{ne} & \sigma_{nh} \\ \sigma_{en} & \sigma_e^2 & \sigma_{eh} \\ \sigma_{hn} & \sigma_{he} & \sigma_h^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Kovariančno matriko $\Sigma_{\mathbf{LL}}$ koordinat točke uporabimo za prikaz natančnosti koordinat točke v poljubni obliki: intervali zaupanja, elipsa pogreškov, elipsoid pogreškov,...

Na osnovi kovariančne matrike Σ_{LL} definiramo različna merila kakovosti, ki predstavljajo sled kovariančne matrike položaja točk:

$$GDOP \equiv \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_e^2 + \sigma_h^2 + \sigma_{dt}^2} \quad (3)$$

$$PDOP \equiv \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_e^2 + \sigma_h^2} \quad (4)$$

$$HDOP \equiv \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_e^2} \quad (5)$$

$$VDOP \equiv \sigma_h \quad (6)$$

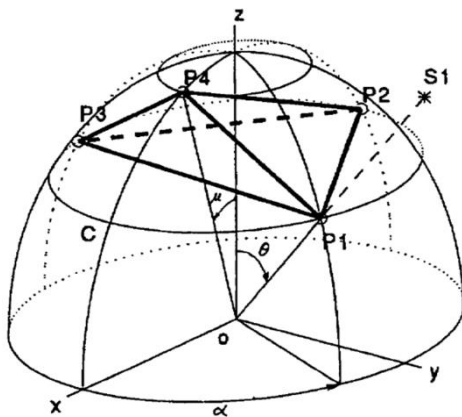
$$TDOP \equiv \sigma_{dt} \quad (7)$$

Kjer *GDOP* pomeni »Geometric Dilution of Precision«, P-position, H-Horizontal, V-Vertical, T-Time.

DOP faktorje lahko interpretiramo na podoben način kot kovariačno matriko, kar pomeni, da imamo v primeru natančnosti opazovanj $\sigma_0 = 1$ meter, standardno deviacijo v horizontalnem položaju velikosti HDOP metrov in standardno deviacijo pogreška sprejemnikove ure v velikosti TDOP sekund.

Matrika kofaktorjev, kovariančna matrika in tudi DOP-faktorji so funkcija geometrijske razporeditve satelitov. Dobra geometrija pomeni nižje vrednosti DOP-faktorjev in obratno. Kot splošno velja, da so vrednosti DOP-faktorjev, višje od 5, znak za slabšo geometrijsko razporeditev satelitov.

DOP-faktorji se navezujejo na 4 satelite, ki so najugodnejše razporejeni glede na koordinate opazovane točke. PDOP-faktorje povežemo s prostornino 3-strane piramide (Stopar, 2011).



Slika 1: Štiri prebodišča enotske krogle so oglišča 3-strane piramide, katere prostornina je merilo kakovosti geometrijske razporeditve satelitov. Manjša kot je prostornina te piramide, večja je vrednost PDOP-faktorja in obratno.

- d) Izvor v okolju, kjer se nahaja sprejemnik: večpotje, prekinitev sprejema signala, spreminjanje lege faznega centra antene GNSS-sprejemnika.

Večpotje pomeni, da signal do sprejemnika prispe posredno, saj se odbija od površin okrog sprejemnika, in do njega pride z zamikom. Pri kinematični izmeri se zaradi pomanjkanja nadštevilnih opazovanj vpliv večpotja prenese na neznanke, pri statični izmeri pa se deloma izniči, saj se prenese tako na popravke kot na neznanke.

Fazni center antene ni stalna, geometrijsko določena točka, ampak se spreminja v odvisnosti od višinskega kota in azimuta satelitov oziroma sprejetega signala. Medsebojno lego faznega in geometrijskega centra antene določimo s kalibracijo (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2011).

Nekatere omenjene vplive se da odpraviti, zmanjšati ali modelirati in tako nadzorovati njihovo velikost. Zaradi spreminjajoče se prostorske in časovne razporeditve vodne pare je najtežje modelirati vpliv mokre komponente troposfere, katere vpliv lahko določimo na nekaj centimetrov natančno (Stopar, 2011).

2.9 Metode geodetskih GNSS-meritev

V geodeziji se za različne naloge uporabljajo različne metode GNSS-meritev.

2.9.1 Statična metoda

Statična metoda je osnovna metoda za določitev relativnega položaja. Temelji na faznih opazovanjih in omogoča določitev horizontalnega položaja z natančnostjo do enega centimetra. Opazovanja na točki trajajo dlje časa, saj temeljijo na spremembi geometrije satelitov v času opazovanj, zato je dosežena natančnost visoka (0.1–10 ppm). Metoda je primerna za geodetske naloge, ki zahtevajo

visoko natančnost; npr. za določitev točk v geodetski mreži, geodinamične raziskave, določitev položaja stalno delujočih GNSS-postaj idr. (MZIP, GURS, 2012b).

2.9.2 Hitra statična metoda

Je enaka statični metodi izmere, le da je čas opazovanj krajši. Omogoča določitev koordinat z relativno natančnostjo opazovanj med 1 in 10 ppm.

2.9.3 Kinematična metoda

Omogoča določitev relativnih položajev premičnega sprejemnika glede na mirujoč referenčni sprejemnik. Vir podatkov so: opazovanja na baznih stojiščih (permanentnih postajah), ki jih pridobimo na portalu SIGNAL, efemeride, ki jih pridobimo na spletu ter podatki iz naših opazovanj.

Metoda zagotavlja relativno natančnost koordinat 1.5–10 ppm in je primerna za geodetske naloge, pri katerih podatka o položaju točk ne potrebujemo na terenu, ampak zadostuje, da ga pridobimo naknadno v pisarni; npr. na področju evidentiranja nepremičnin, geoinformacijskih storitev (GIS), gradbeništva, aerofotogrametrije in tehnike laserskega daljinskega zaznavanja (MZIP, GURS, 2012b).

2.9.4 RTK-GNSS-metoda

RTK (real time kinematic) je metoda, ki omogoča določitev položaja z znano kakovostjo v realnem času. Omogoča določitev položaja z natančnostjo do 1,5 cm. Za uporabo RTK-storitev Službe za GPS mora biti vzpostavljena telemetrična povezava med sprejemnikom in strežnikom (baznim stojiščem). Sprejemnik tako v realnem času pridobiva opazovanja s stalnih postaj. Povezava je praviloma spletna. RTK-metoda omogoča določitev horizontalnega položaja z visoko natančnostjo, kadar je oddaljenost sprejemnika od baze manjša od pet kilometrov. Metoda omogoča določitev koordinat točk z relativno točnostjo 10–50 ppm (Stopar, 2011).

Prednost metode je, da pridobimo koordinate točk in oceno njihove točnosti že med izmero na terenu in jih lahko takoj uporabljamo za nadaljnje naloge. Rezultat take izmere so koordinate točk v ETRS koordinatnem sistemu. V inštrument GNSS lahko vnesemo tudi želene transformacijske parametre med koordinatnim sistemom ETRS89 in drugimi koordinatnimi sistemi. V praksi poleg ETRS89 oziroma D96/TM-koordinatnega sistema najpogosteje uporabljamo koordinatni sistem D48/GK. Koordinate v D48/GK-koordinatnem sistemu pridobimo z različnimi metodami transformacij, oziroma z uporabo različne programske opreme. (Pavlovčič Prešeren 2011, Stopar, 2011).

Za potrebe geodetske izmere lahko tudi kombiniramo hitro statično in RTK-GNSS-metodo.

3 VPLIVI ATMOSFERE NA SIGNAL GNSS

Na točnost določitve položaja z GNSS imajo največji vpliv vplivi z izvorom v Zemljini atmosferi. Pri obravnavi vplivov atmosfere na opazovanja GNSS delimo Zemljino atmosfero na troposfero in ionosfero. Troposfera je del atmosfere do višine 50 kilometrov, ionosfera pa od višine 50 do 1500 km nad Zemljinim površjem.

3.1 Ionosfera

Ionosfera je del Zemljine atmosfere, ki ni elektriško nevtralna. V tem delu atmosfere se nahajajo pozitivno nabiti iono-atomi in molekule atmosferskih plinov ter negativno nabiti prosti elektroni. Prisotnost ionov in prostih elektronov je posledica Sončevega ultravijoličnega sevanja, ki iz atomov in molekul atmosferskih plinov izbija elektrone (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2011). Pozitivno ionizirani atomi in molekule ter prosti elektroni reagirajo z drugimi plini. Negativno nabiti elektroni vplivajo na elektromagnetno valovanje, vpliv je odvisen od frekvence valovanja. Vpliv ionosfere na signal-GNSS imenujemo ionosferska refrakcija. Valovanja s frekvenco, nižjo od 30 MHz, ionosfere ne preidejo, pač pa se od nje odbijejo, tista z večjo frekvenco pa jo preidejo, a so obremenjena z njenim vplivom. Vpliv ionosfere na kodna in fazna opazovanja je po velikosti enak, po predznaku pa različen. Pseudorazdalje satelit-sprejemnik, določene s kodnimi opazovanji so zaradi ionosferske refrakcije predolge, pseudorazdalje, določene s faznimi opazovanji pa so prekratke, kar povzroči zmanjšanje merila baznega vektorja oziroma geodetske mreže (Sterle in sod., 2011).

Vpliv ionosfere lahko modeliramo z modeli ionosferske refrakcije (Klobuchar, Bent, IRI, ICED, FAIM, NEQUICK) ali pri obdelavi dvofrekvenčnih kodnih GNSS-opazovanj sestavimo tako linearno kombinacijo kodnih opazovanj na nosilnih valovanjih L1 in L2, ki je neobčutljiva na vpliv ionosfere (Sterle in sod., 2011).

3.2 Troposfera

Tako kot Zemlja, je tudi troposfera na polih sploščena. Nad ekvatorjem je visoka do 18 km, nad poli pa okrog 9 km (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2011). Vsebuje okoli 80 odstotkov vse mase zraka v atmosferi in skoraj vse vodne hlapce in aerosole. Je najbolj nemirna plast Zemljinega območja, tu se dogajajo največje atmosferske turbulence, plasti zraka se intenzivno premikajo, večina vremenskih pojavov nastaja v troposferi, v njej najdemo skoraj vse vrste oblakov (MKO, ARSO, 2012a). Temperatura v troposferi se z višino znižuje, pri čemer je povprečna sprememba temperature z višino približno 6°C/km (Reynolds, 2004). Vplive neionizirane oz. elektriško nevtralne atmosfere na opazovanja GNSS imenujemo troposferska refrakcija.

3.2.1 Troposferska refrakcija

Troposferska refrakcija je neodvisna od frekvence valovanja, zato je ne moremo odstraniti z opazovanji različnih frekvenc, lahko pa jo modeliramo. Ločeno obravnavamo vpliv suhe (dry) komponente in vpliv mokre (wet) komponente, ki skupaj sestavljata troposfersko refrakcijo (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2011):

$$\Delta^{\text{Trop}} = \Delta_{\text{d}}^{\text{Trop}} + \Delta_{\text{w}}^{\text{Trop}} \quad (8)$$

Δ^{Trop} – troposferska refrakcija

$\Delta_{\text{d}}^{\text{Trop}}$ – suha komponenta troposferske refrakcije

$\Delta_{\text{w}}^{\text{Trop}}$ – mokra komponenta troposferske refrakcije

Troposferska refrakcija povzroči zakasnitev prihoda satelitskega signala. Delimo jo tudi na zenitno $\Delta_{\text{zen}}^{\text{Trop}}$ in projekcijsko $\Delta_{\text{proj}}^{\text{Trop}}(z, \alpha)$, ki je odvisna od zenitne razdalje z in azimuta α satelita. Vpliv troposferske refrakcije je najmanjši, kadar je satelit v zenitu sprejemnika, in se večja z manjšanjem višinskega kota satelita.

Troposferska refrakcija je dana z enačbo:

$$\Delta^{\text{Trop}} = \Delta_{\text{zen}}^{\text{Trop}} * m_{\text{proj}}^{\text{Trop}}(z, \alpha) \quad (9)$$

Δ^{Trop} – troposferska refrakcija

$\Delta_{\text{zen}}^{\text{Trop}}$ – zenitna troposferska refrakcija

$m_{\text{proj}}^{\text{Trop}}(z, \alpha)$ – projekcijska komponenta troposferske refrakcije

Ko zenitno troposfersko refrakcijo $\Delta_{\text{zen}}^{\text{Trop}}$ razstavimo na suho in mokro komponento, dobimo:

$$\Delta^{\text{Trop}} = \Delta_{\text{zen}}^{\text{Trop}} * m_{\text{proj}}^{\text{Trop}}(z, \alpha) + \Delta_{\text{zen}}^{\text{Trop}} * m_{\text{proj}}^{\text{Trop}}(z, \alpha) \quad (10)$$

Vrednost suhe komponente lahko modeliramo z relativno natančnostjo 2–5 %, pri čemer uporabljamo na površini Zemlje izmerjene vrednosti temperature in tlaka. Čeprav ima največji vpliv na vrednost zakasnitve GNSS-signalov (90 %), se jo da modelirati do relativne točnosti 0.1 ppm (Ali Yilmaz, 2012). Mokra zenitna komponenta pa je zaradi neenakomerne porazdelitve v zraku težavna za modeliranje. Troposferska refrakcija je odvisna od višinskega kota sprejetega signala, temperature, zračnega tlaka, vlage in položaja antene GNSS (Rizos, 1999), kar upoštevajo modeli, ki jih uporabljamo za izračun.

Za izračun troposferske refrakcije uporabljamo več modelov: Saastamoinen; ki je bolj primeren za geografske širine v bližini polov, Hopfield; primeren za srednje geografske širine, Goad-Goodman ...

V obravnavanem primeru smo uporabili Saastamoinenov model.

3.2.1.1 Saastamoinenov model troposferske refrakcije

Saastamoinen (Hofmann-Wellenhof in sod., 2001) je leta 1972 troposfersko refrakcijo modeliral kot:

$$\Delta^{Trop} = \frac{0,002277}{\cos z} \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - B \tan^2 z \right] + \delta R \quad (11)$$

z – zenitna razdalja satelita v točki opazovališča

p – zračni tlak na nivoju morske gladine v milibarjih

T – temperatura na nivoju morske gladine v stopinjah Kelvina

e – delni tlak vodne pare na nivoju morske gladine v milibarjih

B – korekcijski člen, dan tabelarično

δR – korekcijski člen, dan tabelarično

Prav tako obstaja več modelov za izračun projekcijske komponente: Niell, Marini, Marini in Murray, Chao, Davis Ifadis, Herring (Ifadis, 2000).

Modeli za izračun projekcijske komponente so se skozi čas razvijali, vendar ne zagotavljajo vsi enako kakovostnih rezultatov v vseh primerih. Za izračun mokre komponente vpliva troposfere smo uporabili Niellov model.

3.2.1.2 Niellov model projekcijske komponente troposferske refrakcije

Niell je projekcijsko komponento definiral za višinske kote do 3° na podlagi primerjav Herringove projekcijske komponente in podatkov, pridobljenih z radiosondami v časovnem intervalu enega leta ali več, na različnih geografskih širinah in na različnih ortometričnih višinah. Ohranil je obliko Herringove komponente in dodal korekcijski člen zaradi višine. Predpostavlja, da je projekcijska komponenta za vpliv suhe troposfere odvisna le od geografskih parametrov (geografske širine in ortometrične višine) in dneva v letu (glej Preglednico 1), vpliv mokre troposfere pa le od geografske širine (glej Preglednico 2) (Niell, 1996).

Oblika Niellove projekcijske komponente:

$$m(e) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{1 + c} \cdot \frac{a}{\sin(e) + \frac{b}{\sin(e) + c}} + \Delta m(e) \quad (12)$$

Pri čemer so e višinski kot satelita, a , b in c so konstante, dane tabelarično za geografske širine $\varphi = 15^\circ$, $\varphi = 30^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi = 60^\circ$, $\varphi = 75^\circ$ (glej Preglednico 1 in Preglednico 2) in $\Delta m(e)$ korekcijski člen zaradi višine točke.

Za suho projekcijsko komponento vrednost koeficienta a za točko na geografski širini φ_i v času t izračunamo z enačbo:

$$a_h(\varphi_i, t) = a_{povp}(\varphi_i) - a_{amp}(\varphi_i) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365,25}\right) \quad (13)$$

a_{povp} – tabelarično dana vrednost

a_{amp} – tabelarično dana vrednost

t – zaporedni dan v letu

T_0 – 28. dan v letu za točke na severni polobli in 211. dan za točke, ki se nahajajo na južni zemeljski polobli (Schüler 2000)

Podobno izračunamo tudi vrednosti koeficientov b in c .

Z interpolacijo med dvema znanima sosednjima koeficientoma lahko izračunamo vrednost projekcijske komponente za točko na katerikoli geografski širini.

Vrednost projekcijske komponente se spreminja. Za severno poloblo je največja na dan, ko je t.i. zimski maksimum, to je 28. januarja.

Preglednica 1: Vrednosti koeficientov Niellove suhe projekcijske komponente (Niell, 1996: str 24.)

Koeficient	Geografska širina				
	15°	30°	45°	60°	75°
Povprečje					
a_{povp}	$1,2769934 \cdot 10^{-3}$	$1,2683230 \cdot 10^{-3}$	$1,2465397 \cdot 10^{-3}$	$1,2196049 \cdot 10^{-3}$	$1,2045996 \cdot 10^{-3}$
b_{povp}	$2,9153695 \cdot 10^{-3}$	$2,9152299 \cdot 10^{-3}$	$2,9288445 \cdot 10^{-3}$	$2,9022565 \cdot 10^{-3}$	$2,9024912 \cdot 10^{-3}$
c_{povp}	$62,610505 \cdot 10^{-3}$	$62,837393 \cdot 10^{-3}$	$63,721774 \cdot 10^{-3}$	$63,824265 \cdot 10^{-3}$	$62,258455 \cdot 10^{-3}$
Amplituda					
a_{amp}	0,0	$1,2709626 \cdot 10^{-5}$	$2,6523662 \cdot 10^{-5}$	$3,4000452 \cdot 10^{-5}$	$4,1202191 \cdot 10^{-5}$
b_{amp}	0,0	$2,1414979 \cdot 10^{-5}$	$3,0160779 \cdot 10^{-5}$	$7,2562722 \cdot 10^{-5}$	$11,723375 \cdot 10^{-5}$
c_{amp}	0,0	$9,0128400 \cdot 10^{-5}$	$4,3497037 \cdot 10^{-5}$	$84,795348 \cdot 10^{-5}$	$170,37206 \cdot 10^{-5}$

Mokra projekcijska komponenta je časovno neodvisna, odvisna je le od geografske širine. Vrednosti koeficientov so podane v Preglednici 2.

Preglednica 2: Vrednosti koeficientov Niellove mokre projekcijske komponente (Niell, 1996: str 24.)

Koeficient	Geografska širina				
	15°	30°	45°	60°	75°
a	$5,8021897 \cdot 10^{-4}$	$5,6794847 \cdot 10^{-4}$	$5,8118019 \cdot 10^{-4}$	$5,9727542 \cdot 10^{-4}$	$6,1641693 \cdot 10^{-4}$
b	$1,4275268 \cdot 10^{-3}$	$1,5138625 \cdot 10^{-3}$	$1,4572752 \cdot 10^{-3}$	$1,5007428 \cdot 10^{-3}$	$1,7599082 \cdot 10^{-3}$
c	$4,3472961 \cdot 10^{-2}$	$4,6729510 \cdot 10^{-2}$	$4,3908931 \cdot 10^{-2}$	$4,4626982 \cdot 10^{-2}$	$5,4736038 \cdot 10^{-2}$

Nenatančnost mokre komponente zenitne troposferske refrakcije navadno predstavlja celotno nenatančnost troposferske refrakcije (Pavlovčič Prešeren, Stopar 2011).

3.3 O radarskih meritvah

Meteorologija oz. vremenoslovje je veda, ki se ukvarja z ozračjem in njegovimi pojavi (MKO, ARSO, 2012b). Proučuje nastanek, značilnosti in razvoj meteoroloških elementov (zračni pritisk, temperatura zraka, veter, vlažnost in gostota zraka) (Pučnik, 1974). V Sloveniji strokovne, analitične in upravne naloge s področja meteorologije na državni ravni opravlja Agencija RS za okolje (ARSO). Z ustrezno merilno mrežo spremlja in zagotavlja kakovostne javne okoljske podatke (MKO, ARSO, 2012c). Vremenske opazovalnice se nahajajo na vseh kontinentih in morjih. Merijo meteorološke količine: temperaturo zraka in tal, zračni pritisk, zračno vlago, smer in hitrost vetra, količino oblakov, količino padavin. Podatke zagotavljajo tudi meteorološki sateliti. Satelitske slike omogočajo hiter pregled

dogajanja nad velikim geografskim območjem, predvsem porazdelitev in nekatere lastnosti oblačnosti (MKO, ARSO 2012e). Poleg tega z radiosondo vsakodnevno opazujejo tudi vertikalno porazdeljenost temperature, zračnega tlaka in vodne pare.

Ključnega pomena za vremenske napovedi je mednarodna in prosta izmenjava podatkov (Reynolds, 2004). Z obdelavo podatkov o meteoroloških elementih nastajajo vremenske napovedi. Ko poznamo podatke o stanju atmosfere in vzročno povezavo med pojavi, lahko napovedujemo vrednosti meteoroloških spremenljivk v prihodnosti. Meteorologija ima svoje osnove v fizikalnih zakonih. Če poznamo stanje ozračja in enačbe, ki podajajo časovne spremembe meteoroloških spremenljivk, lahko izračunamo, kakšno vrednost bodo imele v prihodnjem času.

Ker je nemogoče hkrati zbrati podatke o meteoroloških parametrih na vsaki točki, meteorologi rešujejo sisteme enačb v mrežah točk, ki so razporejene po celi Zemlji in skozi vso atmosfero. Evropski center za srednjeročne vremenske napovedi (ECMWF), ki je vodilna organizacija za napovedovanje vremena na globalni ravni na svetu, je leta 2005 za vsakodnevno napovedovanje vremena uporabljal model IFS/ARPEGE-računsko mrežo, v kateri so točke na Zemlji razporejene na vsakih 40 km. Ozračje je v navpični smer razdeljeno na 60 plasti. V modelski mreži je tako več kot 13 milijonov točk, za katere računalniški program meteorološke spremenljivke (temperatura, veter in vlaga) preračunava v 15 minutnih korakih za deset dni naprej. Računalniški programi rešujejo enačbe, ki opisujejo spreminjanje temperature, vlage in vetra v teh točkah. Vsak izračun velja le za kratek časovni interval, zato izračunavajo parametre v več korakih za več časovnih intervalov (Vehovar 2005; Reynolds 2004, 112–115).

Poleg merjenih meteoroloških parametrov morajo upoštevati tudi spreminjanje sončnega sevanja čez dan in čez leto, sevanje zemeljske površine, vpliv oblakov in drugih delcev na sevanje in drugo. Računalniški modeli vsebujejo veliko različnih povezav med spremenljivkami in se dopolnjujejo skladno z izboljševanjem znanja meteorologov (Reynolds, 2004). ARSO za vremenske napovedi v Sloveniji uporablja model ALADIN/SI, katerega programska koda izhaja iz modela IFS, in se uporablja za simulacijo dogajanj v ozračju nad večjim delom Evrope (MKO, ARSO, 2012h).

Voda na Zemlji se giblje v zaključenem krogotoku. Voda iz odprtih vodnih površin in iz vlažnih tal izhlapeva v zrak in se spreminja v vodno paro. Zrak pri določeni temperaturi lahko sprejme le določeno množino vodne pare. Ko se zrak ohlaja, se vodna para utekočini in se iz oblakov izloči v obliki padavin, ki na površje padejo v tekočem ali trdnem stanju, lahko pa izpari še preden pride do zemeljskega površja. Del vode odteče po površinskih vodah proti jezerom in morjem, del pa jo skozi tla pride do globoke talne vode, od koder odteka v skladu z geološkimi pogoji. Ta voda spet izhlapeva v zrak, s tem pa je vodni krogotok zaključen (Pučnik, 1974; Roth, 1992).

Porazdelitev vodne pare je tesno povezana z razporeditvijo oblakov in padavin, in ima ključno vlogo pri stabilnosti atmosfere ter strukturi atmosferskih nevihtnih sistemov (Bevis in sod., 1992). Za meteorološke modele in vremenske napovedi je ključnega pomena (Bar Sever, 1996).

3.3 Merjenje količine padavin

Padavine v tekočem ali trdnem stanju merimo tako, da določimo, kako visoka plast vode je v določenem časovnem obdobju padla na površino Zemlje. Za to uporabljamo različne instrumente:

- Dežmeter oz. ombrometer; zgoraj odprt valj, s površino 200 cm^2 , v katerem se zbirajo padavine. Za merjenje množine v dežmetru zbranih padavin se uporablja menzura z numerično skalo, s katere se odčita količina padavin v milimetrih.
- Pluviograf ali ombrograf po Helmannu; zgornja odprtina instrumenta, skozi katero padajo padavine, ima površino 200 cm^2 . Zajete padavine tečejo v posodo, v kateri je plavač, na čigar os je pritrjena kratka ročica s peresom, ki na trak – ombrogram izpisuje vrednosti. Ko padavine dvignejo plavač, se z njim dvigne tudi pero, ki tako na trak zabeleži količino padavin.
- Totalizator se uporablja za merjenje padavin v težko dostopnih predelih, kjer padavin ni mogoče meriti z navadnim ombrometrom in se merijo enkrat mesečno ali manj pogosto. Instrument je podoben kot ombrometer, le da je posoda za zbiranje padavin razširjena tako, da lahko sprejme do 100 litrov vode ali več (MKO, ARSO 2012i; Pučnik 1974).
- Vremenski radar; radar, prirejen za merjenje lege, zgradbe in gibanja padavin v atmosferi. Radar tvori zaporedje paketov elektromagnetnih valov, antena pa jih pošilja v ozek prostorski kot. Če valovanje naleti na oviro, se na njej siplje. Del elektromagnetnih valov se siplje nazaj, kjer jih ujame antena radarja, zazna pa jih sprejemnik. Usmeritev antene določa smer ovire, od katere se je elektromagnetno valovanje odbilo, zakasnitev odmeva določa oddaljenost, moč odmeva pa odbojne lastnosti snovi, od katere se je EMV odbilo (Divjak 1992, 316). Osnovna količina, ki jo meri vremenski radar, je moč odmevov. Večja moč pomeni večje število padavinskih delcev na prostorninsko enoto. Antena radarja se lahko obrača, tako da zaznava odmeve iz različnih smeri, ti pa se shranjujejo v računalniški pomnilnik. S predpostavkami o faznem stanju, velikostni porazdelitvi in hitrosti padanja je mogoče izračunati prostornino padavin, ki v časovni enoti pade na tla. Iz odmevov in upoštevanih predpostavk se tvori trodimenzionalno polje odmevov – tj. radarska slika atmosfere (MKO, ARSO, 2012g).

Arso upravlja, vzdržuje in razvija SIRAD – slovensko radarsko omrežje. Sestavljata ga radarska merilna postaja na Lisci pri Sevnici in radarski omrežni center ARSO v Ljubljani. Osnovni namen sistema je radarsko merjenje padavin nad Slovenijo in njeno okolico, sprotno posredovanje opazovanj specialnim uporabnikom in arhiviranje opazovanj. Radar na merilni postaji Lisca je sodoben

vremenski radar, ki meri odmeve iz oddaljenosti do 250 km. Antena s premerom 4 metre seva sevanje z valovno dolžino $\lambda = 5$ cm v prostorski kot 1° . Antena se zavrti trikrat v minuti in zbira podatke. Sistem meri dogajanje v atmosferi vsakih 10 minut, s pričetkom ob polni uri. Podatki se prenašajo v omrežni center, kjer iz njih izdelujejo numerične in grafične produkte (tudi radarske slike), namenjene končnim uporabnikom. Radarske slike prikazujejo največjo izmerjeno jakost padavin v navpični smeri nad talno točko, iz nje pa ni razvidno, na kateri višini je bila izmerjena jakost, zato ni nujno da se ti podatki ujemajo s količino padavin na tleh (MKO, ARSO, 2012g).

3.4 Vodna para v zraku

Vodna para v atmosferi je najmanj raziskana količina, katere karakteristike so najmanj razumljene, in se jo med vsemi meteorološkimi parametri da najslabše opisati, so pa podatki o njeni razporeditvi pomembni za raziskovanje podnebja in vremenske napovedi v meteorologiji (Ali Yilmaz, 2012).

3.5 Opazovanje prisotnosti vodne pare

Za ugotavljanje horizontalne in vertikalne razporeditve vodne pare obstaja več načinov: meteorološki baloni z radiosondo, opazovanje količine vodne pare z radiometrom in opazovanje vodne pare v zraku s pomočjo signala GNSS.

1. Meteorološki baloni z radiosondo. Podatki, ki jih zbirajo, predstavljajo temelj operacijskih analiz v meteoroloških centrih po svetu. Meteorološki baloni ponesejo v atmosfero radiosondo, ki je pripeta na balon in jo sestavljajo vremenski instrumenti in radijski oddajnik. Ko se balon dviga, radiosonda meri temperaturo zraka z majhnim elektročnim termometrom – termistrom. Barometer meri zračni tlak, vlaga pa se meri elektronsko. Zbrane podatke radiosonda na Zemljo pošilja prek radijskih signalov. Z meteorološkimi baloni opazujemo lahko tudi smer vetra na posameznih višinah. Graf, ki prikazuje zbrane podatke na različnih višinah, imenujemo vertikalna sondaža. Balon se na določeni višini zaradi nižjega zračnega pritiska razpoči, radiosonda pa pade nazaj na tla, pri čemer njen padec ublaži padalo (Ahrens, 2007).

Z navadno radijsko sondo lahko temperaturo izmerimo na 0.2°C natančno, tlak pa na 3.5 % natančno (Ali Yilmaz, 2012). Meritve vertikalnega profila temperature in vlažnosti zraka z merilno napravo, ki se dviga skozi ozračje s pomočjo balona, opravljajo tudi v Ljubljani, izračunavajo pa tudi smer in hitrost vetra skozi celotno plast ozračja, v kateri se dogaja vreme in še višje (MKO, ARSO, 2012d.).

Radiosonde navadno v zrak spuščajo dvakrat dnevno, ob polnoči in ob poldne po greenviškem času. Opazovanje ozračja z meteorološkimi baloni je drago, saj se večina opreme uniči po enkratni uporabi (Ahrens, 2007). Zaradi tega je opazovanje ozračja z vremenskim balonom z radiosondo neprimerno za zaznavanje spreminjanja prostorskega in časovnega razporejanja vodne pare. Prav nepoznavanje porazdelitve vodne pare pa je največji vzrok za napake v kratkoročnih (do 24-urnih) vremenskih napovedih.

2. Radiometri za zaznavanje vodne pare so instrumenti na tleh, ki merijo mikrovalovno sevanje, ki ga povzroča vodna para v zraku. Lahko ocenijo količino vodne pare v stolpcu zraka (Bevis in sod., 1992). Radiometri za zaznavanje vodne pare ne delujejo v gosti oblačnosti, zato se uveljavlja nov pristop – uporaba podatkov, pridobljenih z analizo opazovanj GNSS (Ali Yilmaz, 2012).

3. Opazovanja vodne pare s pomočjo modelov omogočajo tudi opazovanja GNSS. Za potrebe preciznega pozicioniranja moramo poleg poznavanja natančnega položaja satelitov, pogreška satelitove in sprejemnikove ure, oceniti in odpraviti vplive atmosfere na signal. Iz znane zakasnitve signala lahko ob poznavanju podatkov o tlaku in temperaturi ocenimo površinsko maso navzoče vodne pare (De Haan, 2006).

V primerjavi z ostalimi metodami je opazovanje prisotnosti vodne pare z opazovanji GNSS bolj ekonomično in natančno, sistem pa je bolj zanesljiv, saj ga lahko uporabljamo v vseh vremenskih pogojih.

3.5 GNSS-meteorologija

GNSS se uporablja na različnih področjih, ki zahtevajo različno kakovost pridobljenih podatkov. Za nekatere naloge v geodeziji zadostuje nekajcentimtrska natančnost (področje evidentiranja nepremičnin, daljinsko zaznavanje, aerofotogrametrija), za izračun koordinat stalnih GNSS-postaj ali za spremljanje tektonike pa potrebujemo točnost, boljšo od centimtrske. Za potrebe preciznega pozicioniranja moramo poznati natančen položaj satelitov, odpraviti pogrešek urinega stanja satelitove ure, poznati moramo urino stanje sprejemnikove ure, vpliv šuma sprejemnika, vpliv odboja signalov od objektov v bližini sprejemnika – t. i. večpotja, oceniti in odpraviti moramo tudi vplive atmosfere na signal (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2011; MZIP, GURS, 2012b).

Zaradi temperature, zračnega pritiska in vodne pare v ozračju na poti od oddajnika do sprejemnika pride do zakasnitve GNSS-signalov. Elektromagnetno valovanje – signal GNSS potuje od satelita do sprejemnika skozi atmosfero po ukrivljenih poteh, opazovanja so zato daljša od geometričnih razdalj (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2011).

Zakasnitev signala lahko meri od nekaj milimetrov v suhih pogojih do več kot 350 mm v vlažnih. Za dosego natančnosti ocene zakasnitve signala, ki omogoča nadaljnjo uporabo podatka, moramo poznati podatke o temperaturi, tlaku in vlagi (Paroscientific, 2012). Ena glavnih nalog geodetov, ki razvijajo geodetsko programsko opremo, je odpraviti vplive v atmosferi, ki povzročajo zakasnitev signala, in torej optične ukrivljene poti spremeniti v ravne (Bevis in sod., 1992).

Vpliv ionosfere lahko modeliramo z modeli ionosferske refrakcije ali uporabljamo dvofrekvenčna opazovanja, iz katerih sestavimo tako linearno kombinacijo, ki je prosta vplivov ionosfere (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2011). Tudi popravke opazovanih razdalj zaradi troposferske refrakcije pridobimo z

modeli. Podaljšanje poti opazovanja se lahko z modeliranjem zelo dobro oceni, a opazovanja vedno ostajajo obremenjena s pogreški neodstranjenega vpliva troposfere (Pavlovčič, 2000).

Zakasnitev signala zaradi mokre komponente troposfere se skoraj enakomerno spreminja s spreminjanjem količine vodne pare v ozračju (Bevis in sod., 1992). Če poznamo položaj opazovališča in odstranimo vpliv ionosfere na razširjanje signala, lahko iz znane zakasnitve signala ob poznavanju podatkov o tlaku in temperaturi ocenimo količino pare v stolpcu zraka (Pavlovčič Prešeren, 2000; De Haan, 2006). V splošnem velja, da je razmerje med zamikom signala in količino vodne pare v zraku $K \sim 0,15$, vendar se lahko glede na lokalne razmere od te vrednosti razlikuje za okrog 15 %.

Enačba (12) opisuje zvezo med količino vodne pare v stolpcu zraka in zenitno moko komponento troposferske refrakcije:

$$PW \text{ (mm)} = K \cdot \Delta Tw^z \quad (14)$$

PW – količina vodne pare v stolpcu zraka, izračuna se iz povprečne vrednosti opazovanj od vseh satelitov (Ware in sod. 1997)

K – faktor brez enote, za pretvorbo zakasnitve signala v količino vodne pare v stolpcu zraka

ΔTw^z – zenitna mokra komponenta troposferske refrakcije

GNSS-meteorologija je pojem, ki označuje daljinsko zaznavanje vodne pare na podlagi opazovanj GNSS. Možnosti uporabe opazovanj GNSS v meteorologiji raziskujejo po vsem svetu (v Evropi, na Japonskem, v Avstraliji, v Ameriki, na Antarktiki). Mreža stalno delujočih GNSS-sprejemnikov omogoča opazovanje višine vodnega stolpca oz. izločene vodne pare na obravnavanem območju v kratkih časovnih intervalih. Podatki, ki jih na ta način zbirajo geofiziki in geodeti, bi bili lahko ob razvoju primernih orodij za bolj natančno opazovanje troposfere, uporabni tudi za meteorologe (Bevis in sod., 1992). Opazovanja bi lahko zagotavljala podatke za vremenske napovedi, za raziskovanje atmosferskih neviht, hidrološkega kroženja in globalnih klimatskih sprememb. Posebej zasnovana, gosta mreža GNSS-postaj bi lahko omogočala tudi opazovanje vertikalne razporeditve vodne pare.

Natančnost opazovanja atmosfere je odvisna od konfiguracije omrežja (pokritost neba s sateliti, kalibracija anten, zanesljivost povezave), natančnosti orbit satelitov in metode obdelave. Obstoječa programska oprema za obdelavo GNSS-opazovanj omogoča določitev zakasnitve signala z dobro natančnostjo v skoraj realnem času. Natančnost določitve zakasnitve signala je odvisna od uporabljene metode obdelave in od programske opreme (De Haan, 2006). Raziskave kažejo, da so podatki o količini vodne pare, pridobljeni z opazovanji GNSS, v primeru, da imamo podatke o temperaturi in tlaku, primerljivi z radiosondažnimi meritvami, od njih se razlikujejo od 5 do 10 odstotkov (Suparta 2012). Če podatkov o tlaku in temperaturi nimamo, se tej natančnosti lahko približamo z uporabo primernega klimatskega modela (Bar Sever, 1996).

Visoka kvaliteta z GNSS določene vsebnosti vodne pare v stolpcu zraka dovoljuje uporabo te metode v namen klimatskih študij (Suparta, 2012).

Faktor $K \sim 0,15$, je približen, in se ga da z meritvami temperature oceniti z natančnostjo do 2 %.

Čeprav ta način opazovanja ne prinaša informacij o vertikalni razporeditvi vodne pare, je v primerjavi z drugimi bolj ekonomičen, natančen in zanesljiv sistem, ki se ga lahko uporablja v vseh vremenskih pogojih (Ali Yilmaz, 2012). Prednost opazovanja vodne pare z GNSS pred radiosondažnimi meritvami je predvsem v večji časovni in prostorski resoluciji, hkrati pa je omrežje GNSS-sprejemnikov bolj gosto kot omrežje radiosond. Zagotavljajo podobno časovno resolucijo kot radiometri za zaznavanje vodne pare, in podatke zbirajo skoraj v realnem času, zato se jih lahko ažurno vključi v vremenske modele. V primerjavi z drugimi metodami opazovanja prisotnosti vodne pare so stroški za opazovanja GNSS znatno manjši (Bar Sever, 1996).

3.6 Praktična uporaba GNSS-meteorologije

Področje GNSS-meteorologije se razvija, študije o tem področju še nastajajo. Na Japonskem so projekt GPS-meteorologije GPS/MET začeli razvijati z namenom zagotoviti podatke o razporeditvi vodne pare za izboljšanje numeričnih vremenskih napovedi že leta 1997 (Tsuda in sod., 1998).

Ugotovili so, da lahko z GPS-opazovanji vodne pare zaznamo pojav katabatskega vetra na Antarktiki (Suparta, 2012), v Pekingu in okolici imajo vzpostavljeno GPS-omrežje za zaznavanje vodne pare, s katerimi zbirajo meteorološke podatke za vremenske napovedi in za znanstvene raziskave (Zhang in sod. 2008), na Olimpijskih igrah v Pekingu 2008 so za vremenske napovedi uporabljali poskusni projekt, ki ga je sestavljalo 14 stalnih referenčnih GPS-postaj.

Možnost uporabe opazovanj GPS za namen modeliranja vremena so v letih 2000 in 2001 raziskovali tudi v Švici, saj so želeli podatke o zakasnitvi signala uporabiti za modeliranje kompleksne vremenske situacije v Alpah (Brockmann, Troller, 2002).

Študije primerjajo podatke opazovanj GNSS s podatki radiosond. Za izračun zakasnitve signala uporabljajo GNSS-opazovanja, kombinirana z meteorološkimi opazovanji meteoroloških postaj v okolici. Te se navadno nahajajo na drugih mestih. Podatke o temperaturi in tlaku na kraju GNSS-postaj pridobijo tako, da meteorološke podatke z vremenskih postaj najprej interpolirajo, in tako postajam GNSS dodelijo vrednosti temperature in tlaka.

S temi podatki faktor K , ki podaja razmerje med količino vodne pare in zakasnitvijo GNSS-signala, ocenijo, kar se da natančno.

Tako pridobijo podatke o količini vodne pare nad vsemi postajami. Z interpolacijo teh vrednosti pa pridobijo vrednosti o količini vodne pare na celotnem obravnavanem območju.

GNSS-meteorologija ni več le znanstveni pojem, ampak se že uporablja v napovedovanju dežnih padavin, v študijah lokalnega kroženja vodne pare, za opazovanje klimatskih sprememb, za meritve vodne pare nad oceani, tropskimi in polarnimi območji (Nakamura, 2003).

Če poznamo vrednost zakasnitve GNSS-signalov v zenitu sprejemnika GNSS, ter temperaturo in tlak, lahko ocenimo količino vodne pare v zraku z veliko natančnostjo. Da bi to lahko praktično uporabljali za vremenske napovedi, bi morali te podatke izračunavati čim hitreje (Kačmařík, Skřivánková, 2011). Rezultati študij kažejo, da je izračun vsebnosti vodne pare v stolpcu zraka s podatkov GNSS zelo natančen. Začasno stabiliziran GNSS-sprejemnik lahko zagotovi enako natančne podatke o zakasnitvi GNSS-signalov, in posredno vodni pari, kot sprejemnik na stalni referenčni postaji (Kačmařík, Skřivánková, 2011).

K je brezdimenzijska konstanta, dana z enačbo (Bevis in sod., 1992):

$$\frac{1}{K} = 10^{-6} \cdot \left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right) \cdot R_v \quad (15)$$

$$T_m = \frac{\int \left(\frac{P_v}{T} \right) dz}{\int \left(\frac{P_v}{T^2} \right) dz} \quad (16)$$

$$k'_2 = k_2 - mk_1 \quad (17)$$

$$m = \frac{M_w}{M_d} \quad (18)$$

$R_v = 461,5$ J/kgK specifična plinska konstanta za vodno paro,

T_m – utežena povprečna temperatura v troposferi,

m – razmerje molskih mas vodne vlage in suhega zraka

P_v – delni tlak vodne pare (v hPa)

T – absolutna temperatura v stopinjah Kelvina

k_1, k_2, k_3 – fizične konstante, prevzete iz formule (Smith, 1953) za določitev atmosferske refrakcije:

$$k_1 = 77,607 \text{ Kmb}^{-1}$$

$$k_2 = 71,6 \text{ Kmb}^{-1}$$

$$k_3 = 3,747 \text{ Kmb}^{-1}$$

V splošnem velja, da je razmerje med zamikom signala in količino vodne pare v zraku $K \sim 0,15$.

4 OPIS PRIMERA

V nam dostopnih virih v Sloveniji še nismo zasledili poročil o raziskavah, ki bi obravnavale količino vodne pare, izračunane iz opazovanj GNSS in jo primerjale z absolutno vlažnostjo oz. padavinami. Z radisondo podatke o stanju v ozračju zbirajo le enkrat dnevno v Ljubljani. Preveriti želimo, ali obstaja povezava med prisotnostjo vodne pare, zaznane z GNSS-opazovanji in radarsko sliko padavin oz. podatki o gostoti vodne pare.

Podatke o vrednosti mokre troposferske refrakcije, pridobljene z opazovanji GNSS, bomo primerjali tudi z meteorološkimi podatki o gostoti vodne pare.

Izračunano mokro komponento troposferske refrakcije iz opazovanj GNSS, pridobljenih na 25 permanentnih GNSS-postajah na območju Slovenije, vzhodne Italije in južne Avstrije bomo interpolirali nad celotnim obravnavanim območjem, jo prikazali v grafični obliki ter primerjali z radarsko sliko padavin.

Podatke o vrednosti mokre troposferske refrakcije, pridobljene z opazovanji GNSS, bomo primerjali tudi z meteorološkimi podatki o količini vodne pare v atmosferi.

4.1 Primerjava radarske slike padavin in izrisa porazdelitve vodne pare

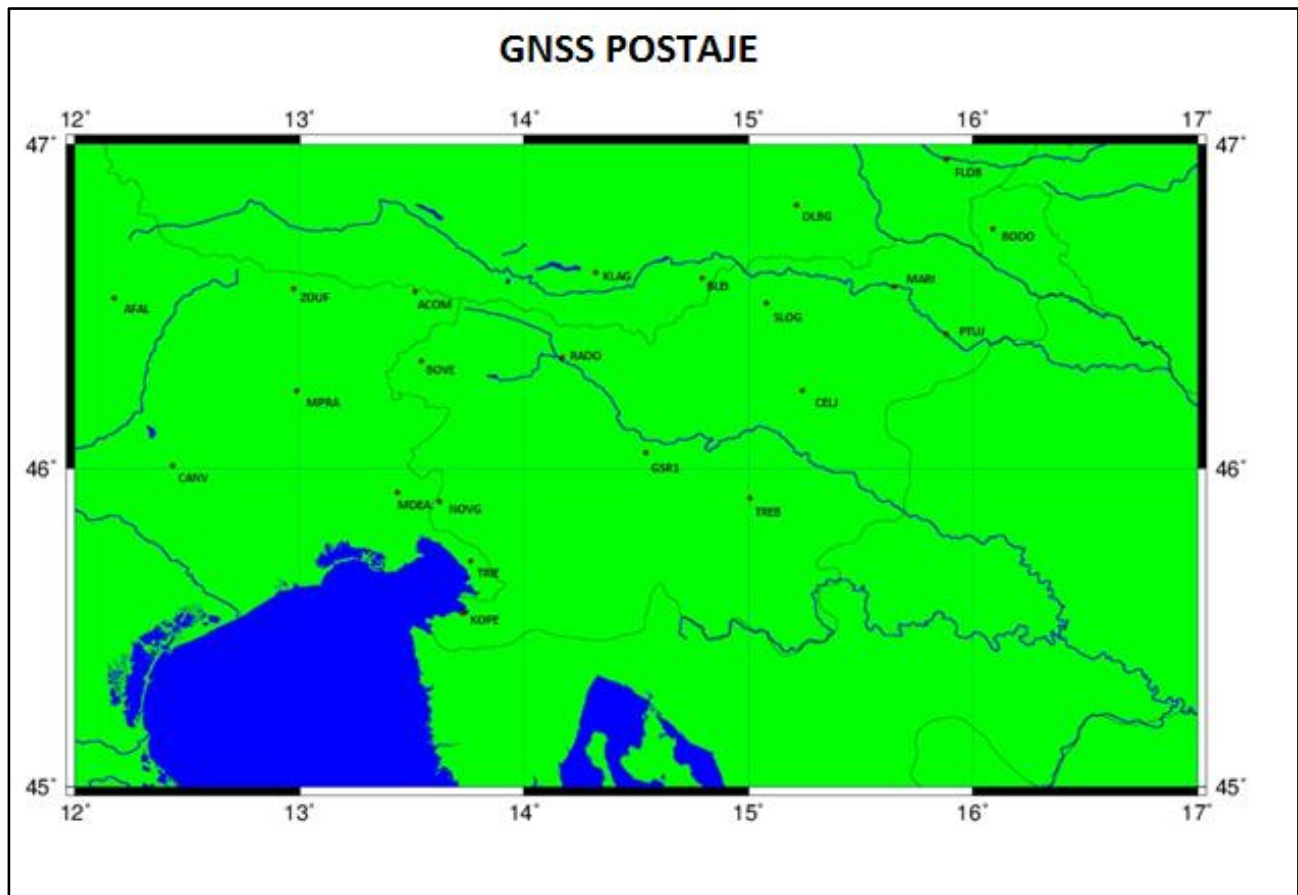
Izračunano mokro komponento troposferske refrakcije iz opazovanj GNSS bomo interpolirali nad celotnim obravnavanim področjem, jo izrisali in sliko primerjali z radarskimi slikami padavin.

4.1.1 Meteorološki podatki

Vremenski radar na Lisci meri padavine nad Slovenije in njeno bližnjo okolico. Radarske slike, ki so dostopne v arhivu ARSO, prikazujejo razporeditev in jakost padavin na vsakih 10 minut. Čas meritve je podan v univerzalnem koordiniranem času UTC. Jakost padavin je na karti z različnimi barvami predstavljena s štirimi razredi: šibka (zelena), zmerna (rumena), močna (oranžna) in ekstremna (rdeča) z možno točo (MKO, ARSO, 2012f).

4.1.2 Podatki GNSS

V naših analizah smo uporabili opazovanja 25 permanentnih postaj GNSS slovenskega državnega omrežja SIGNAL, dela avstrijskega omrežja APOS, regionalnega omrežja Furlanije FreDNet (CRS 2012) in na permanentni postaji podjetja Harpha Sea d.o.o v Kopru.



Slika 2: Prostorska razporeditev permanentnih postaj GNSS v raziskavi.

Seznam opazovalnih postaj:

ACOM (omrežje FredNet), Malborghetto, Italija.

AFAL (omrežje FredNet), Cortina D'Ampezzo, Italija.

BLEI (omrežje APOS), Pliberk, Avstrija.

BODO (omrežje SIGNAL), Bodonci, Slovenija.

BOVE (omrežje SIGNAL), Bovec, Slovenija.

CANV (omrežje FredNet), Caneva, Italija.

CELJ (omrežje SIGNAL), Celje, Slovenija.

DLBG (omrežje APOS), Deutschlandsberg, Avstrija.

FLDB (omrežje APOS), Feldbach, Avstrija.

Graz (omrežje EUREF), Gradec, Avstrija.

GSR1 (omrežje SIGNAL), Ljubljana, Slovenija.

KLAG (omrežje APOS), Celovec, Avstrija.

KOPE (omrežje SIGNAL), Koper, Slovenija.

KOPR (permanentna postaja podjetja Harpha Sea d.o.o.), Koper, Slovenija.

MARI (omrežje SIGNAL), Maribor, Slovenija.

MDEA (omrežje FredNet), Medea, Italija.
MPRA (omrežje FredNet), Forgaria del Friuli, Italija.
NOVG (omrežje SIGNAL), Nova Gorica, Slovenija.
PADO (omrežje EUREF), Padova, Italija.
PTUJ (omrežje SIGNAL), Ptuj, Slovenija.
RADO (omrežje SIGNAL), Radovljica, Slovenija.
SLOG (omrežje SIGNAL), Slovenj Gradec, Slovenija.
TREB (omrežje SIGNAL), Trebnje, Slovenija.
TRIE (omrežje FredNet), Trst, Italija.
ZOUF (omrežje FredNet), Cercivento, Italija.

4.1.3 Metoda dela, izračun

Podatki o parametrih troposferske refrakcije, uporabljeni v nalogi, so bili pridobljeni na osnovi obdelave opazovanj, pridobljenih na 25 permanentnih postajah GNSS, ki so bila obdelana s programskim paketom Bernese GPS Software, Version 5.0 (Dach in sod., 2007). Obdelava podatkov opazovanj GNSS je del obsežne obdelave vseh razpoložljivih opazovanj permanentnih postaj GNSS na območju Slovenije in v njeni okolici, ki poteka na Katedri za matematično in fizikalno geodezijo ter navigacijo UL FGG, ki pa v celotni še ni končana.

Programski paket Bernese GPS Software, Version 5.0, je namenjen za oobdelavo opazovanj GNSS z največjo natančnostjo in točnostjo. Poleg koordinat točk omogoča ocenjevanje tudi številnih drugih količin, kot so npr. vektorji hitrosti sprememb koordinat točk, koordinate satelitov, parametri vrtenja Zemlje in tudi parametri troposfere. Program je namenjen za naknadno obdelavo statičnih opazovanj GPS in GLONASS, kjer obdelava poteka po naslednjih korakih (Dach in sod., 2007):

1. Uvoz vseh opazovanj in podatkov, pomembnih za obdelavo. Poleg datotek z opazovanji RINEX (angl. Receiver INdependent Exchange format) uvozimo tudi datoteke preciznih efemerid, datoteke parametrov vrtenja Zemlje, modelov ionosfere, kodnih zakasnitev in podobno.
2. Sinhronizacija ur sprejemnikov, kjer se na osnovi kodnih opazovanj GNSS oceni pogreške ure sprejemnikov. Na ta način se ure sprejemnikov uskladijo/sinhronizirajo z časom GNSS, ki ga določajo sateliti GNSS.
3. Predobdelava faznih opazovanj, kjer se iščemo izpade signala in grobe pogreške. Izpade signala poskušamo odpraviti, grobe pogreške eliminiramo iz niza opazovanj.
4. Prva obdelava opazovanj, kjer je cilj poiskati še najmanjše možne grobe pogreške v faznih opazovanjih, ki jih je še možno odpraviti. Cilj obdelave je dobiti nabor opazovanj visoke kakovosti brez sistematičnih oz. grobih pogreškov.

5. Druga obdelava opazovanj, s katero pridobimo prve vrednosti koordinat točk in parametre troposfere.
6. Tretja obdelava opazovanj, kjer fazne nedoločenosti oz. neznana števila celih valov ocenimo v domeni celih števil. Vhodni podatek so poleg opazovanj še ocenjene koordinate in parametri troposfere iz prejšnjega koraka.
7. Četrta obdelava opazovanj, kjer pridobimo ocenjene koordinate in parametre troposfere na osnovi faznih nedoločenosti v domeni celih števil. Rezultati predstavljajo končno rešitev položajev točk in parametrov troposfere, ki so določeni z najvišjo natančnostjo in točnostjo.
8. Zagotovitev geodetskega datuma, kjer se ocenjene položaje točk v obdelavi transformira na znane položaje niza danih točk.

Parametri troposfere, ki so uporabljeni v diplomski nalogi so rezultat koraka 7. Predstavljajo podaljšanje razdalje satelit-sprejemnik, če bi bil satelit točno v zenitu glede na sprejemnik. Ker je vpliv troposfere časovno spremenljiv in ocenjen le za določena časovna obdobja, se vpliv troposfere modelira kot kosoma zvezna linearna funkcija.

Pri ocenjevanju parametrov troposfere s programom Bernese GPS Software, Version 5.0 se suha komponenta troposferske refrakcije modelira z modelom Saastamoinena, za projekcijsko komponento je uporabljena Niellova suha projekcijska komponenta. Po drugi strani pa se mokro komponento troposferske refrakcije oceni po metodi najmanjših kvadratov (korak 7. v obdelavi) na osnovi Niellove mokre projekcijske komponente troposferske refrakcije.

Rezultat obdelave je tako podaljšanje kodne oz. fazne psevdorazdalje zaradi vpliva mokrega zraka v zenitu na vsako uro za vsak dan opazovanj.

Med zakasnitvijo signala in vsebnostjo vodne pare v stolpcu zraka obstaja povezava:

$$PW \text{ (mm)} = K \cdot \Delta T w^z \quad (19)$$

PW – vsebnost vodne pare v stolpcu zraka

K – faktor brez enote, za pretvorbo zakasnitve signala v količino vodne pare v stolpcu zraka

$\Delta T w^z$ – zenitna mokra komponenta troposferske refrakcije

Za vsako uro dneva za opazovalne postaje torej poznamo $\Delta T w^z$, zanima pa nas količina vodne pare v stolpcu zraka. Ker poznamo zvezo med zakasnitvijo GNSS-signala zaradi vodne pare v zraku, lahko izračunamo vrednost le-te.

Z uporabo izraza $PW \text{ (mm)} = K \cdot \Delta T w^z$, pri čemer za K uporabimo približno vrednost $K \sim 0.15$ (Hogg in sod., 1981 cit. po Ware in sod., 1997), izračunamo vrednosti količine vodne pare v stolpcu zraka nad opazovalnimi postajami za vse ure, za vseh 17 dni, torej za 408 časovnih trenutkov.

4.1.4 Izris in interpolacija količine vodne pare v stolpcu zraka

Permanentne postaje GNSS so na obravnavanem območju razporejene neenakomerno. Ker analiziramo prisotnost vodne pare nad območjem Slovenije, in te vrednosti želimo primerjati s podatki radarske slike padavin, moramo iz vrednosti opazovanj pridobiti tudi vrednosti za območja, kjer opazovanja niso bila izvedena. Metoda za določitev iskane vrednosti na nepoznani legi na podlagi poznanih vrednosti v okolici je interpolacija. Načelo prostorske interpolacije izhaja iz predpostavke, da se vrednosti v točkah, ki so med seboj manj oddaljene, razlikuje manj kot v točkah, ki so med seboj bolj oddaljene. Prostorska interpolacija iz naključno razporejenih točkovnih podatkov sestavi zvezno ploskev (Šumrada, 2011).

Za izris vrednosti uporabimo odprtokodno zbirko GMT, ki vsebuje 65 funkcij za izris geografskih podatkov in več kot 70 specializiranih orodij. Podpira več kot 30 kartografskih projekcij in transformacij (GMT, 2012). Na podlagi točkovnih podatkov želimo tvoriti funkcionalno površino, pri čemer dobimo ploskev, ki predstavlja podatke o količini vodne pare.

Za končni izris uporabimo niz programskih kod. Najprej pa pripravimo vhodne podatke: 408 datotek v obliki x, y, z, pri čemer sta x in y koordinati točk opazovališč, z pa količina vrednosti vodne pare v stolpcu zraka. Za primer vzorčne vhodne datoteke glej Prilogo A.

4.1.5 Interpolacija z metodo minimalne ukrivljenosti

Vrednosti interpoliramo z interpolacijsko metodo minimalne ukrivljenosti (Smith, Wessel, 1990). To je globalna deterministična metoda za modeliranje zemeljskega površja – vsak naslednji procesni korak temelji na že doseženem stanju, potek ploskve pa se določi skozi vse podane točke (Šumrada, 2011). Ta metoda se pogosto uporablja za interpoliranje geofizikalnih podatkov. Nizu nepravilno razporejenih točk z znanim položajem in s tretjo dimenzijo – višino, oz. v konkretnem primeru s podatkom o vrednosti vodne pare v stolpcu zraka, prilagodi potek gladke ploskve z dvorazsežno funkcijo zlepkov. Končna ploskev se prilagodi tako, da je oblika površine čim bolj gladka in čim manj ukrivljena, pod pogojem, da zadosti biharmonični diferencialni enačbi, in da čim bolj ohranja dane vrednosti (Fomel, 2000). Izračun ploskve je iterativen postopek (Šumrada, 2011). Ploskev, pridobljena s to metodo, je ploskev, napeta čez vse vrednosti tako, da je polmer ukrivljenosti ploskve čim manjši (Aš, 2008; Smith, Wessel, 1990).

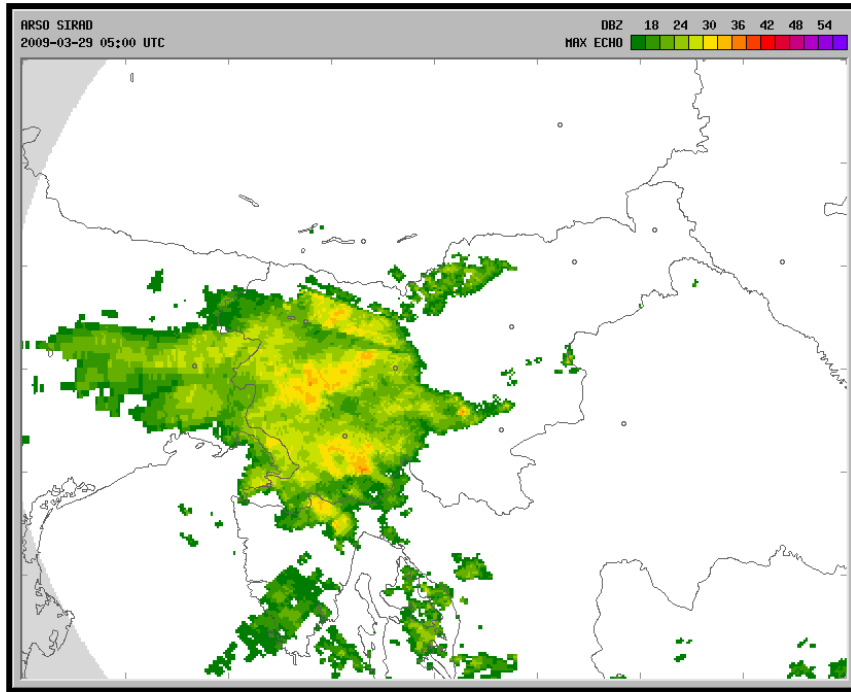
4.1.6 Primerjava izrisanih vrednosti višine vodnega stolpca in radarskih slik

Izris izvedemo za vse trenutke, v katerih imamo opravljene meritve. Tako dobimo izris za 408 različnih časovnih trenutkov. Prikaze razporeditve vodne pare, določene na osnovi meritev GNSS lahko primerjamo z radarskimi slikami padavin, ki jih zagotavlja ARSO.

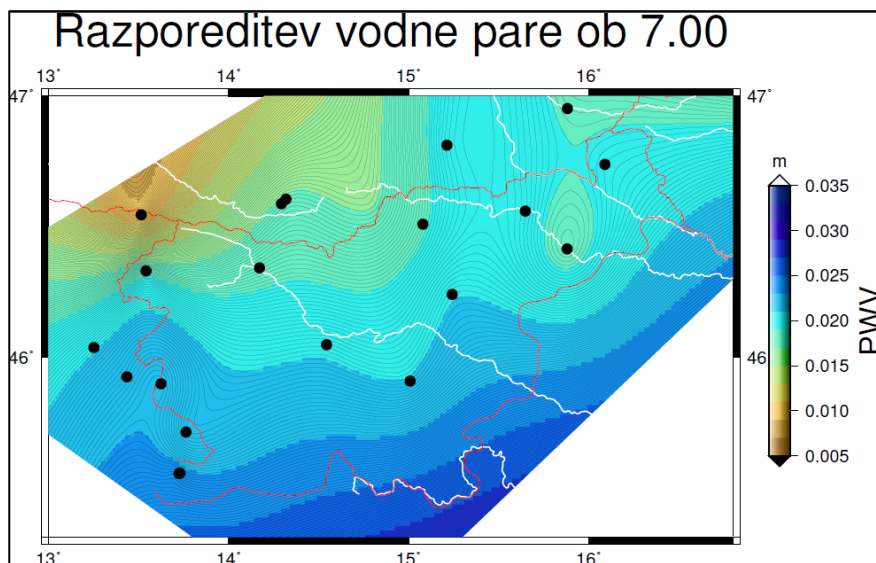
Podatke z geodetsko metodo izmere zbiramo na območju zahodne, severne in vzhodne Slovenije, postaje niso enakomerno razporejene po območju celotne države. Izven zaprtega območja, v katerem opravljamo meritve, je izrazita ekstrapolacija, tako da so za ta (južni) del države izračunani in izrisani podatki neuporabni. Zato smo prikaz temu primerno omejili.

Za primer pogledimo primerjavo med dejanskimi padavinami, zaznanimi z radarsko tehnologijo in izrisom razporeditve vodne pare za 29. marec 2009, ki je bil izmed obravnavanih dni, padavinsko najbolj zanimiv. Zaradi omenjene ekstrapolacije na območju južneje in zahodneje od Slovenije, tega dela ne bomo upoštevali.

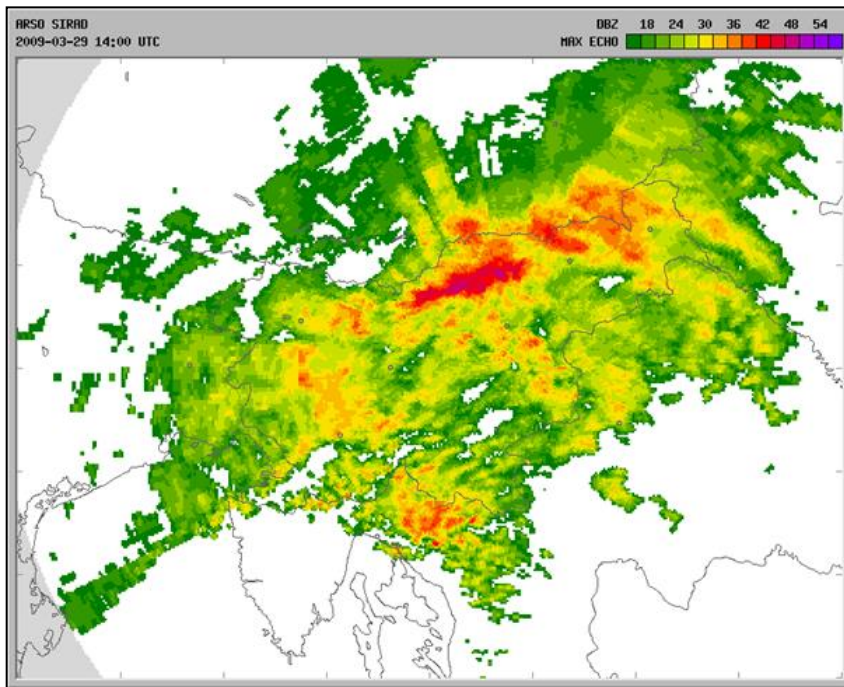
Vzorčni primer primerjave radarske slike padavin in interpoliranih vrednosti troposferske refrakcije*
(ostali izrisi so priloženi na CD-ju):



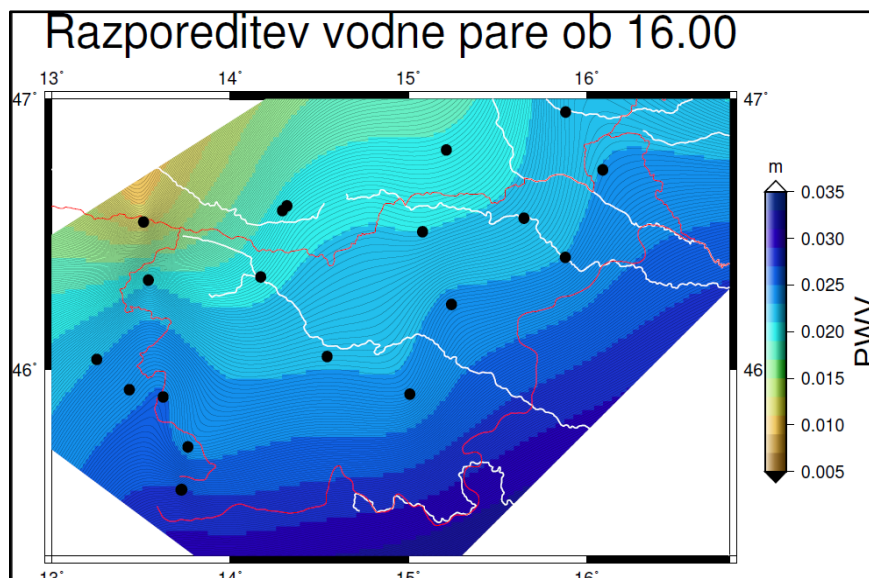
Slika 2: Radarski prikaz padavin za 29. 3. 2009 ob 7:00.



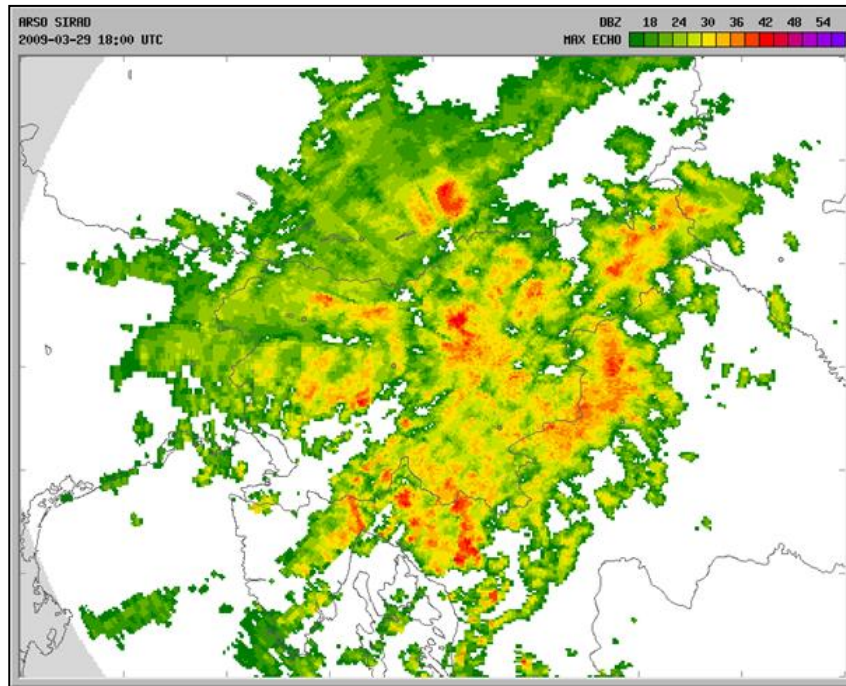
Slika 3: Izris razporedjenosti vodne pare glede na podatke GNSS za 29. 3. 2009 ob 7:00.



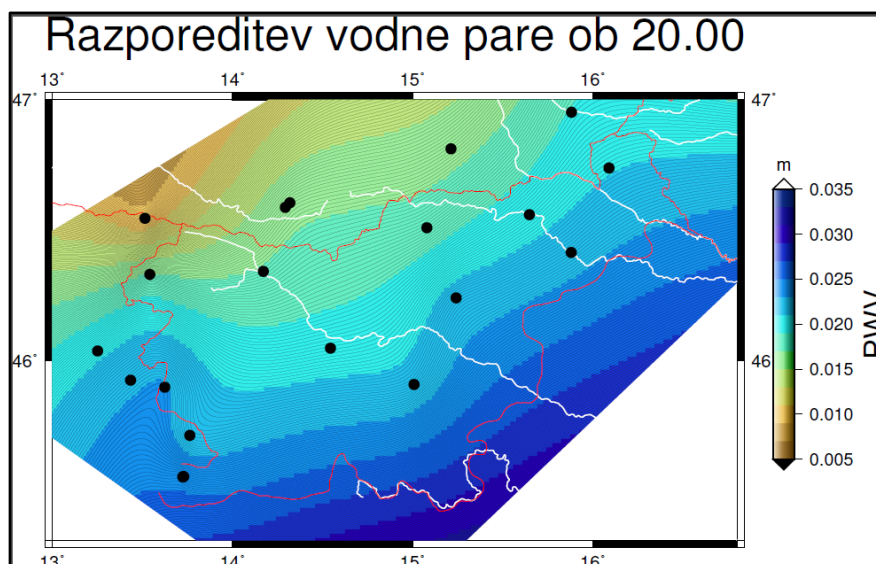
Slika 4: Radarski prikaz padavin za 29. 3. 2009 ob 16:00.



Slika 5: Izris razporeditve vodne pare glede na podatke GNSS za 29. 3. 2009 ob 16:00.



Slika 6: Radarski prikaz padavin za 29. 3. 2009 ob 20:00.



Slika 7: Izris razporeditve vodne pare glede na podatke GNSS za 29. 3. 2009 ob 20:00.

Kljub temu, da iz obravnave izločimo dele, kjer so podatki nepomembni, ne moremo reči, da lahko opazimo povezavo med generirano sliko in radarsko sliko padavin. Do neke mere se sicer generirana slika vsaj v grobem sklada z radarsko, vendar pa v splošnem lahko rečemo le, da ni očitne povezave med obema prikazoma. Del te neskladnosti lahko razložimo s tem, da je opazovan le en meteorološki

parameter, tj. vlažnost, ki pa očitno ne zadostuje za določitev območja padavin. Na postajah GNSS bi morali opazovati še vsaj temperaturo in zračni tlak. Vrednosti vsebnosti vodne pare v stolpcu zraka torej niso tako enostavno (očitno) povezane s količino padavin, da bi jih lahko primerjali na tak način. Kako točno je vsebnost vodne pare v stolpcu zraka povezana s padavinami, pa presega naše področje obravnave in je naloga za strokovnjake s področja meteorologije.

4.2 Primerjava meteoroloških podatkov o absolutni vlažnosti in podatkov o vsebnosti vodne pare v stolpcu zraka, pridobljenih z geodetskimi opazovanji

Primerjava izrisa interpoliranih vrednosti o količini vodne pare in radarskih slik je zagotovila le opisne rezultate in ni izpolnila predhodnih pričakovanj o uporabnosti metode. Zato smo se preverjanja o možnosti uporabe geodetskih opazovanj za namene meteorologije lotili na drug način. Primerjati želimo podatke o absolutni vlažnosti zraka na določeni merilni postaji, v bližini katere imamo izvedena tudi GNSS-opazovanja. Uporabimo ista GNSS-opazovanja kot v primeru izrisa, torej imamo v istem časovnem obdobju, tj. med 15. in 31. marcem 2009, le da jim bomo opazovali na bolj omejenem območju (oz. naj bi jih opazovali na enem kraju), zato pričakujemo, da bo rezultat zato bolj natančen, saj ne bomo uporabili metod interpolacije.

Primerjava interpoliranih vrednosti količine vodne pare in radarskih slik je zagotovila opisne rezultate in ni izpolnila predhodnih pričakovanj o uporabnosti metode. Zato smo se preverjanja možnosti uporabe opazovanj GNSS za namene meteorologije lotili na drug način. Primerjati želimo podatke o absolutni vlažnosti zraka na določeni merilni postaji, v bližini katere imamo izvedena tudi GNSS-opazovanja. Uporabimo ista GNSS-opazovanja kot v prejšnjih analizah, tj. za čas med 15. in 31. marcem 2009, vendar bomo uporabili samo podatke z ene opazovalne postaje, zato pričakujemo, da bo rezultat bolj natančen, saj izračunanih vrednosti ne bomo interpolirali.

4.2.1 Meteorološki podatki

Iz arhiva ARSO smo pridobili podatke o količini padavin, temperaturi, tlaku in relativni vlažnosti za postajo v Šentvidu, in jih s pomočjo interaktivnega spletnega kalkulatorja preračunali v podatke o absolutni vlažnosti (Vičar, 2013). Preveriti želimo njihovo povezavo s podatki o višini vodnega stolpca, dobljenimi z opazovanji GNSS.

4.2.3 Podatki GNSS

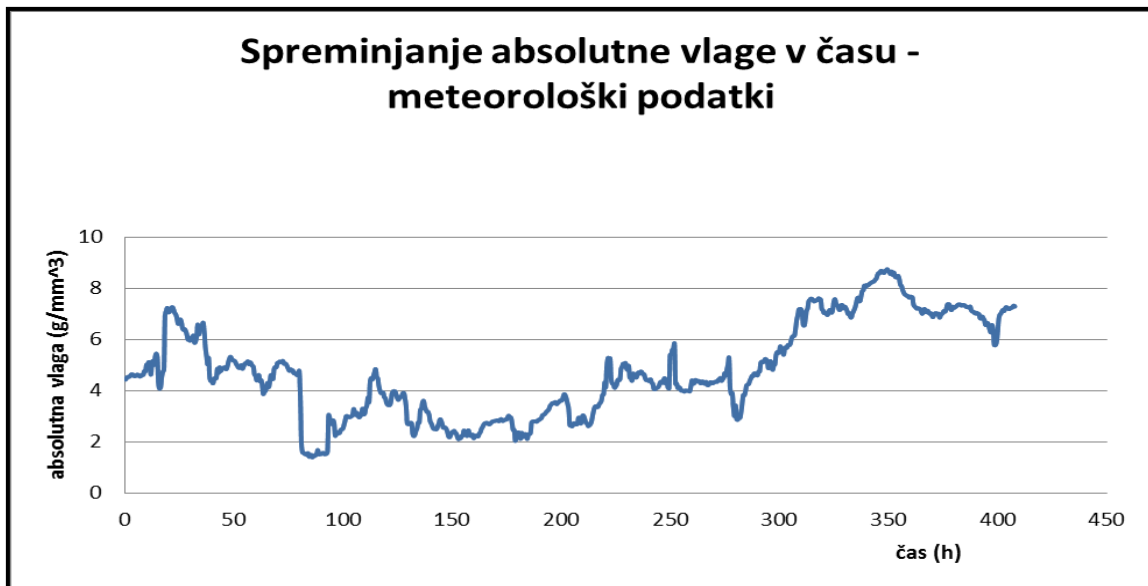
Imamo meteorološke podatke za postajo v Ljubljani, zato jih bomo primerjali s tisto permanentno postajo, ki je temu kraju najbližje, to je postaja GSR1. Permanentna GPS-postaja je od postaje, s katere smo pridobili meteorološka opazovanja, oddaljena približno 5 kilometrov.

4.2.4 Metoda dela, obdelava

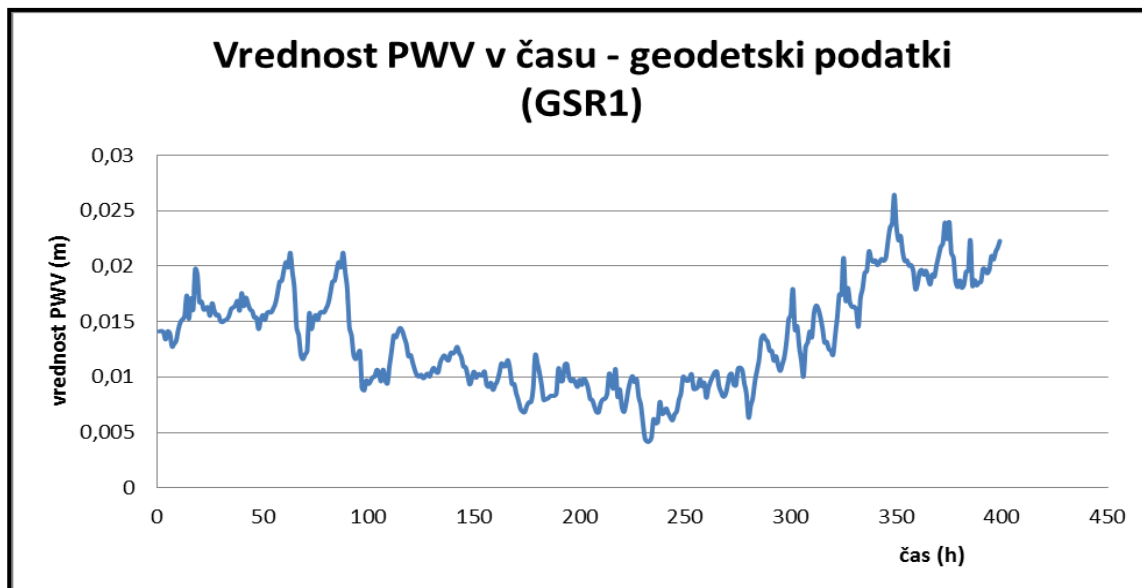
Podatke o količini vodne pare v stolpcu zraka, pridobljene z opazovanji GPS za postajo GSR1, imamo že zbrane, saj smo jih potrebovali za izris vrednosti porazdelitve le-te v prejšnjem postopku preverjanja naše domneve (glej poglavje 8.1.3). Primerjati jih želimo s podatki o absolutni vlažnosti v zraku, ki smo jih pridobili iz arhiva ARSO.

Za obravnavan časovni interval tako dobimo 408 vrednosti (časovna resolucija je ena ura za obravnavano obdobje 17 dni) o z GNSS zaznani višini vodnega stolpca in prav toliko vrednosti o absolutni vlažnosti.

V programu Microsoft Excel izrišemo grafa, ki prikazujeta spreminjanje vrednosti opazovane absolutne vlage v zraku skozi čas (meteorološki podatki) ter spreminjanje izračunane vrednosti višine vodnega stolpca (podatki, pridobljeni z geodetskimi metodami) v istem časovnem obdobju.



Graf 1: Spreminjanje vrednosti absolutne vlage v času (meteorološki podatki z avtomatske meteorološke postaje Šentvid).



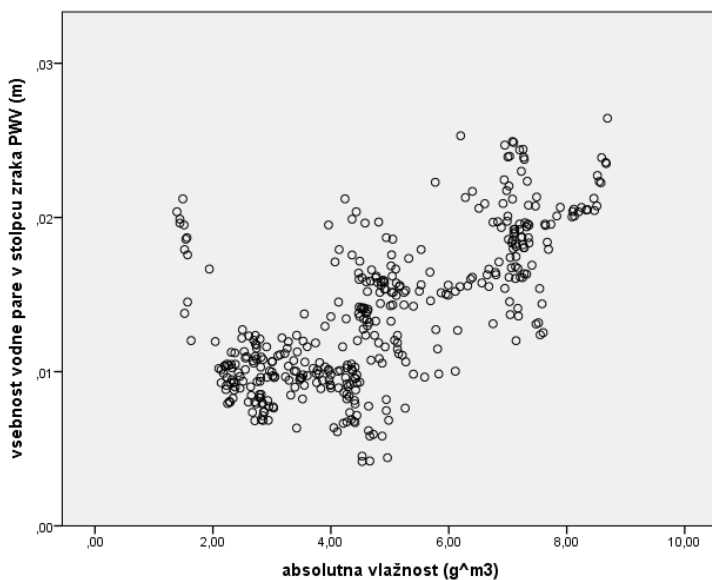
Graf 2: Spreminjanje vrednosti količine vodne pare v stolpcu zraka v času (geodetski podatki s permanentne postaje GSR1).

Zanima nas, ali sta absolutna vlaga in vsebnost vodne pare v stolpcu zraka (PWV) med seboj povezani.

4.2.5 Razsevni grafikon

Če eno od spremenljivk določimo za neodvisno, in drugo za odvisno, lahko povezanost spremenljivk prikažemo z razsevnim diagramom. Neodvisno spremenljivko predstavljajo meteorološki podatki (na osi x), odvisno pa podatki, izračunani iz geodetskih opazovanj (na osi y).

Graf 3: Razsevni grafikon povezanosti med odvisno in neodvisno spremenljivko.



Regresijska premica, ki se prilega opazovanjem, ima obliko:

$$y = 0,0017x + 0,00544 \quad (20)$$

vsebnost vodne pare v stolpcu zraka = $0,0017 \cdot \text{absolutna vlažnost} + 0,00544$,

Podatke o količini vodne pare v stolpcu zraka smo določili tako, da smo za njegov izračun uporabili približno vrednost koeficienta K . Če bi za vsako opazovanje pridobili vse meteorološke parametre, bi koeficient K (in posledično vsebnost vodne pare v stolpcu zraka) lahko izračunali bolj natančno, vrednost pojasnjene variance pa bi se lahko temu primerno zvišala.

Za merjenje linearne povezanosti med dvema številske spremenljivkama, pri katerih je ena odvisna od druge, uporabimo Pearsonov koeficient korelacije. Pri tem za neodvisne privzamemo meteorološke podatke, saj so absolutni in 'pravi', odvisni pa so tisti, izračunani iz opazovanj GNSS.

Pearsonov koeficient korelacije lahko pridobi vrednosti -1 in 1. Vrednost 1 pomeni popolno pozitivno linearno povezanost (odvisnost), kar pomeni, da se z večanjem vrednosti neodvisne spremenljivke večajo tudi vrednosti odvisne spremenljivke, vrednost 0 pomeni, da ni linearne povezanosti, vrednost -1 pa pomeni popolno negativno linearno povezanost, pri čemer se ob povečanju vrednosti neodvisne spremenljivke, vrednosti odvisne spremenljivke manjšajo.

Izračun Pearsonovega koeficienta korelacije na vzorcu (r_{xy}) opravimo v programu Excel po spodnji enačbi:

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x \cdot S_y} \quad (21)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x) \cdot (y_i - \mu_y) \quad (22)$$

$$S_x = \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \quad (23)$$

$$S_y = \sum_{i=1}^N (y_i - \mu_y)^2 \quad (24)$$

r_{xy} – koeficient korelacije na vzorcu

x_i – i -ta enota spremenljivke x v statističnem vzorcu

μ_x – vrednost aritmetične sredine spremenljivke x

y_i – i -ta enota spremenljivke y v statističnem vzorcu

μ_y – vrednost aritmetične sredine spremenljivke y

Pearsonov koeficient korelacije na obravnavanem vzorcu ima vrednost $r_{xy} = 0,669$, kar pomeni da obstaja pozitivna korelacija med meteorološkimi podatki o gostoti vodne pare in geodetskimi podatki o vsebnosti vodne pare v stolpcu zraka.

Delež pojasnjene variance (R^2) izračunamo kot kvadrat vrednosti Pearsonovega koeficienta po spodnji enačbi:

$$R^2 = r_{xy}^2 \quad (25)$$

$$R^2 = 0,448$$

Delež pojasnjene variance $R^2 = 0,448$, pomeni da lahko 45 % variance podatkov o količini vodne pare v stolpcu zraka pojasnimo z absolutno vlažnostjo. Torej je delež nepojasnjene variance (zaradi drugih, nepojasnenih oziroma neraziskanih vplivov) relativno velik (55 %).

5 ZAKLJUČKI

Analizirali smo samo en meteorološki parameter – vlago. Za faktor K , ki ga uporabljamo za pretvorbo zakasnitve signala v količino vodne pare v stolpcu zraka, ki ga uporabimo pri izračunu vsebnosti vodne pare v stolpcu zraka, smo vzeli kar privzeto vrednost $K = 0,15$ (Hogg in sod. 1981, cip. po Ware in sod., 1997) nekateri avtorji uporabljajo tudi nekoliko drugačne vrednosti. Prava vrednost tega faktorja se od privzete lahko razlikuje za 20 odstotkov. Z meritvami temperature na opazovališčih z GNSS-postajami, in upoštevanjem le-teh, bi lahko ta faktor ocenili veliko bolj natančno, tako, da bi bila napaka ocene faktorja od prave vrednosti manjša od dveh odstotkov.

Izračunane podatke smo primerjali z meteorološkimi opazovanji na dva različna načina.

Najprej smo primerjali svoje podatke z radarsko sliko padavin, pri čemer smo vrednosti z opazovanj postaj GNSS interpolirali nad območjem celotne države, da smo tako dobili primerljiv prikaz radarskim slikam. Izkazalo se je, da očitne podobnosti med tema dvema prikazoma ni, kar torej pomeni, da zveza med gostoto vodne pare v stolpcu zraka in količino padavin ni enostavna. Radarske slike sicer prikazujejo največjo izmerjeno jakost padavin v navpični smeri nad talno točko, ne vemo pa tudi, na kateri višini je bila jakost izmerjena. Zato se ti podatki ne ujemajo nujno s podatki o izmerjeni količini padavin. Vedeti moramo tudi, da podatki, ki so prikazani na radarski sliki, niso nujno točni. Prave radarske podatke bi dobili tako, da bi primerjali podatke z radarja s podatki z opazovalnih postaj, in izračunali korekcijski faktor, s pomočjo katerega bi popravili količine padavin, ki jih je zaznal meteorološki radar in dobili prave 'radarske' podatke. Za boljše rezultate, ki še vedno ne bi zahtevali prevelikih investicij ali zahtevanih znanj, bi morala biti vsaka GNSS-postaja opremljena z instrumenti za merjenje tlaka, vlažnosti in temperature.

Da bi dobili bolj natančno oceno za primerjavo podatkov o vlagi, dobljenih z geodetskimi metodami z meteorološkimi podatki, smo primerjavo izvedli še na drug način. Za primerjavo smo izbrali dve postaji, na katerih se izvajajo meteorološka opazovanja in opazovanja GNSS. Postaji se nahajata Ljubljani, in sta dokaj blizu skupaj, saj želimo podatke obravnavati kot podatke, ki smo jih pridobili na istem mestu, na dva različna načina. Primerjali smo izračunano vrednost vsebnosti vodne pare v stolpcu zraka z izmerjeno vrednostjo absolutne vlažnosti, in poskušali poiskati povezavo med njima. Vrednost Pearsonovega koeficienta je pokazala, da med njimi obstaja srednje močna do močna povezava. Glede na to, da gre za izračune količin, ki so pridobljene iz javno dostopnih podatkov, ki jih ne zbirajo za posebne namene GNSS-meteorologije, in že rezultati, dobljeni na tak preprost način, nakazujejo povezavo/podobnost med dejanskim stanjem v ozračju in vrednostmi, izračunanimi s pomočjo modelov za troposfersko refrakcijo, lahko rečemo, da se je potrdila naša domneva, da obstaja povezava in možnost uporabe tehnologije GNSS v meteorološke namene. To potrjujejo tudi projekti in raziskave, ki jih na tem področju izvajajo v tujini, kjer rezultate GNSS-opazovanj tudi praktično uporabljajo v meteorologiji. Zanimiv bi bil tudi prikaz interpoliranih izračunanih vrednosti gostote

vlage v stolpcu zraka (ki je prikazan v tej nalogi) v primerjavi z interpoliranimi vrednostmi absolutne vlažnosti, če bi lahko te vrednosti dobili za čim več meteoroloških postaj. Kako točno je gostota vlage v stolpcu zraka povezana s padavinami, pa presega okvir naše raziskave.

Le sodelovanje različnih strok, v tem primeru geodezije in meteorologije lahko pripelje do tega, da bi taka opazovanja dobila pravo praktično vrednost. Gre namreč za področje, ki združuje znanosti iz obeh navedenih področij, saj je za pravilno modeliranje vremenskih situacij treba poznati meteorološke modele, če pa želimo, da so ti tudi uporabni, moramo postaviti aktivno omrežje postaj GNSS, dovolj visoke gostote, ki te podatke zagotavlja. Primeri uporabe te tehnologije v tujini tudi kažejo, da ima GNSS-meteorologija potencial, da postane dodatno orodje za opazovanje vremenskih pojavov po svetu na regionalni oz. globalni ravni. Na podlagi lastne analize in analiz iz tujine lahko zaključimo, da verjamemo, da si v primerjavi z ostalimi metodami opazovanja ozračja, od katerih ima vsaka določene pomanjkljivosti in prednosti, tudi GNSS-meteorologija, ki je natančen, zanesljiv in tudi ekonomičen sistem, svoje mesto v znanosti in posledično tudi našem vsakdanu prihodnosti.

VIRI

- Ahrens, C. D. 2007. *Meteorology today*. Belmont, Thomson Higher Education: 537 str.
- Ali Yilmaz, S. 2012. *GPS Meteorology*. V: International Conference on ecological, environmental and bio-sciences. Pattaya, Tajska, 13–15 April 2012: 92–94.
- Aš, V. 2008. Vplivi metod interpolacije in glajenja na geometrično natančnost ploskev iz lidarskih podatkov. Diplomski naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba V. Aš): 63 str.
- Bar Sever, Y. E. 1996. Strategies for GPS-Based Estimates of Troposphere Delay. <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/27370/1/96-1463.pdf> (Pridobljeno 10. 10. 2012.)
- BBC. 2007. The satellite story. Video posnetek.
- BBC News Technology. 2011. China GPS rival Veidou starts offering navigation data. <http://www.bbc.co.uk/news/technology-16337648> (Pridobljeno 10. 9. 2012.)
- 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* 97, 14: 15787–15801.
- Brockmann, E., Troller, M. 2002. GPS Meteorology in the Swiss Alps: Interpolation Accuracy for different Alpine Areas and Near Real-time Results. <http://www-app2.gfz-potsdam.de/pb1/COST716/abstracts/brockmann.pdf> (Pridobljeno 10. 3. 2012.)
- Clarke, B. 1998. *Aviators guide to GPS*. New York, Mc-Graw Hill Professional: 324 str.
- Collins, M. 1999. *Space Race: the U.S – U.S.S.R. competition to reach the Moon*. Pomegranate Communications, Inc: 112 str.
- CRS. 2012. FReDNet GPS network. <http://www.crs.inogs.it/frednet/ItalianSite/XFReDNetHome.htm> (Pridobljeno 20. 10. 2012.)
- Dach, R., Hugentobler U., Fridez, P., Meindl, M. 2007. *Bernese GPS Software, Version 5.0*. Švica, Bern, Astronomski inštitut Univerze v Bernu.
- Dana H., P. 1994. GPS Overview. <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html> (Pridobljeno 20. 9. 2012.)

- De Haan, S. 2006. National/regional operational precedures of GPS water vapour networks and agreed international procedures. http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-92_GPS-WaterVapour/IOM-92_GPS-Water-Vapour.pdf (Pridobljeno 27. mar. 13. 2013.)
- Divjak, M. 1992. Merjenje padavin z radarjem. *Presek* 19, 5: 316–319.
- ESA. 2012. http://www.esa.int/esaNA/ESA_AZZ6708D_galileo_0.html (Pridobljeno 11. 9. 2012.)
- Florjančič, U. 2012. Poslastice za domače detektive in priložnostne zlikovce. *Moj Mikro* 8. avg. 2012. http://www.mojmikro.si/geekfest/moram_imeti/poslastice_za_domace_detektive_in_priloznostne_zlikovce (Pridobljeno 26. 9. 2012.)
- Fomel, S. 2000. Helical preconditioning and splines in tension. http://sepwww.stanford.edu/public/docs/sep103/sergey1/paper_html/node1.html (Pridobljeno 25. 10. 2012.)
- Geodetic science. 2013. <http://geodeticscience.org/whatis.php> (Pridobljeno 1. 5. 2013.)
- GMT. 2012. <http://gmt.soest.hawaii.edu/> (Pridobljeno 24. 10. 2012.)
- GPS. 2012. <http://www.gps.gov/systems/gps/space/> (Pridobljeno 31. 8. 2012.)
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J. 2001. *GPS Theory and Practice*. Dunaj, Springer Verlag: 383 str.
- Ifadis, M. I. A new approach to mapping the atmospheric effect for GPS observations. *Earth Planets Space* 52: 703–708.
- Janet, K. 2007. Analiza rezultatov obdelave GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj. Diplomaska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Janet): 101 str.
- Kačmařík, M., Skřivánková, P. 2011. Comparison of Satellite Orbit Ephemerides for Use in GPS Meteorology. *Advances in Space Research* 48, 2: 264–269.
- Kowoma.de. 2012. http://www.kowoma.de/en/gps/control_segment.htm (Pridobljeno 20. 9. 2012.)
- Kregar, V. 1954. Nekaj o geodeziji. *Kronika (Ljubljana)* 2, 3: 205-206.
- Krmelj, M. 2012. Pol stoletja satelitskih TV prenosov. *Delo* (23. jul. 2012). <http://www.delo.si/druzba/znanost/pol-stoletja-satelitskih-tv-prenosov.html> (Pridobljeno 6. 10. 2012.)

Kuhar, M. 2009. Predavanja pri predmetu Geodezija.

http://www.fgg.uni-lj.si/~mkuhar/Pouk/Geod/gradivo/Geodezija_3.pdf (Pridobljeno 13. 9. 2012.)

L. Easton, R. 2000. In the beginning of GPS. V: 32nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. Združene države Amerike, 28. – 30. November 2000.

<http://www.pttimeeting.org/archivemeetings/2000papers/keynote.pdf> (Pridobljeno 14. 12. 2012.)

McCormick, J. B., Neal, H. A., Smith, L. T. 2008. Beyond Sputnik: U.S. science policy in twenty-first century. Michigan, The University of Michigan Press: 386 str.

MZIP – Ministrstvo za infrastrukturo in prostor, Geodetska uprava RS. 2012a. http://www.gu-signal.si/index.php?option=com_content&view=article&id=282&Itemid=31 (Pridobljeno 13. 9. 2012.)

MZIP – Ministrstvo za infrastrukturo in prostor, Geodetska uprava RS 2012b. http://www.gu-signal.si/index.php?option=com_content&view=article&id=20&Itemid=34 (Pridobljeno 20. 2. 2013.)

MKO – Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, Agencija RS za okolje. 2012a.

http://kpv.arso.gov.si/kpv/Gemet_search/Gemet_report/report_gemet_term?ID_CONCEPT=8695&L1=302&L2=94 (Pridobljeno 27. 9. 2012.)

MKO – Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, Agencija RS za okolje. 2012b.

http://kpv.arso.gov.si/kpv/Gemet_search/Gemet_report/report_gemet_term?ID_CONCEPT=5197&L1=302&L2=302 (Pridobljeno 5. 10. 2012.)

MKO – Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, Agencija RS za okolje. 2012c.

<http://www.arso.gov.si/o%20agenciji/> (Pridobljeno 10. 10. 2012.)

MKO – Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, Agencija RS za okolje. 2012d.

<http://www.arso.gov.si/vreme/poro%C4%8Dila%20in%20projekti/dr%C5%BEavna%20slu%C5%BEba/dms.html> (Pridobljeno 10. 10. 2012.)

MKO – Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, Agencija RS za okolje. 2012e.

http://www.arso.gov.si/vreme/napovedi%20in%20podatki/satelit_razlaga.html (Pridobljeno 10. 10. 2012.)

MKO – Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, Agencija RS za okolje. 2012f.

<http://www.arso.gov.si/vreme/napovedi%20in%20podatki/radar.html> (Pridobljeno 25. 10. 2012.)

MKO – Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, Agencija RS za okolje. 2012g.

<http://www.arso.gov.si/vreme/napovedi%20in%20podatki/srd.html> (Pridobljeno 10. 10. 2012.)

MKO – Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, Agencija RS za okolje. 2012h. http://www.arso.gov.si/vreme/poro%C4%8Dila%20in%20projekti/dr%C5%BEavna%20slu%C5%BEba/Model_Aladin.pdf (Pridobljeno 25. 10. 2012.)

MKO – Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, Agencija RS za okolje. 2012i. http://www.vreme.si/met/sl/climate/observation_stations/description/ (Pridobljeno 10. 10. 2012.)

Nakamura, H. 2003. Summary of the Workshop. http://dbx.cr.chiba-u.jp/Gps_Met/gpsmet/CD-1_Proceedings_PDF/01_Head/01_08_WsSummary.pdf (Pridobljeno 29. 10. 2012.)

NASA. 2012. http://www.youtube.com/watch?v=_Cj1vgmXr5M (Pridobljeno 10. 9. 2012.)

Niell, A. E. 1996. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. http://www.haystack.mit.edu/geo/pubs/NMF_JGR.pdf (Pridobljeno 19. 11. 2012.)

Nis GLONASS. 2102. http://www.nis-glonass.ru/en/glonass/development_history/ (Pridobljeno 31. 8. 2012.)

Oštir, K. 2006. Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Založba ZRC: 250 str.

Paroscientific. 2012. <http://www.paroscientific.com/gpsmet.htm> (Pridobljeno 29. 10. 2012.)

Pavlovčič, P. 2000. Vpliv troposfere na GPS opazovanja. Magistrska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Pavlovčič): 109 str.

Pavlovčič Prešeren, P. 2011. Vaje pri predmetu Satelitsko podprta geodetska izmera. Neobjavljeno študijsko gradivo: loč. pag.

Pavlovčič Prešeren, P., Stopar, B. 2011. Satelitsko podprta geodetska izmera. Visokošolski študij Tehnično upravljanje nepremičnin, del študijskega gradiva: 61 str.

Pučnik, J. 1974. Vreme in podnebje. Murska Sobota, Pomurska založba: 280 str.

Reynolds, R. 2004. Vremenski vodnik. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 192 str.

Rizos, C. 1999. Tropospheric delay. http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey/chap6/628.htm (Pridobljeno 16. 11. 2012.)

Rojc, Ž. 2008. Vohuni padajo z neba. Večer 6. feb. 2008. <http://web.vecer.com/portali/vecer/v1/default.asp?kaj=3&id=2008020605291717> (Pridobljeno 7. 10. 2012.)

Schüler, T. 2000. On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation. Doktorska dizertacija. München, Universität des Bundeswehr München (samozaložba T. Schüler): 364 str.

Smith, J. R. 1997. Introduction to Geodesy: The History and Concepts of Modern Geodesy. ZDA, Wiley-Interscience publication: 240 str.

Smith, Jr., E. K., Weintraub, S. 1953. The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. Proceedings of the I.R.E 41, 8: 1035-1037.

Smith, W. H. F., Wessel, P. 1990. Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics* 55: 293–305.

Sterle, O., Stopar, B., Pavlovčič Prešeren, P. 2011. Vplivi dogajanj na Soncu na določitev položaja z enofrekvenčnimi kodnimi GNSS-instrumenti: priprava na vrh 24. Sončevega cikla. http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/referati/2012/SZGG_2012_Sterle_Stopar_Pavlovic_Preseren.pdf (Pridobljeno 10. 5. 2012.)

Stopar, B. 2011. Predavanja pri predmetu Satelitsko podprta geodetska izmera: loč. pag.

Suparta, W. 2012. Detection of katabatic wind event with GPS meteorology measurements at Scott Base Antarctica. *Meteorol Atmos* 115: 153–162.

Šumrada, R. 2011. Gradivo pri predmetu Geografski informacijski sistemi: loč. pag.

Tsuda, T., Heki, K., Miyazaki, S., Aonashi, K., Hirahara, K., Nakamura, H., Tobita, M., Kimata, F., Tabei, T., Matsushima, T., Kimura, F., Satomura, M., Kato, T., Naito, I. 1998. GPS meteorology project of Japan – Exploring frontiers of geodesy. *Earth Planets Space* 50, 10: I–V.

Triglav, J. 2010. Natančno satelitsko geolociranje za vsakogar!? *Geodetski vestnik* 54, 2: 320–325.

Vaniček, P. 2001. An Online Tutorial in GEODESY.

<http://gge.unb.ca/Resources/GeodesyTutorial.pdf> (Pridobljeno 13. 9. 2012.)

Vehovar, J. 2005. Simulacija dogajanj v ozračju. Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, Agencija RS za okolje – Urad za Meteorologijo.

http://www.arso.gov.si/vreme/poro%C4%8Dila%20in%20projekti/dr%C5%BEavna%20slu%C5%BEba/Srednjeročna_vremenska_napoved.pdf (Pridobljeno 15. 10. 2012.)

Vičar, Z. 2012. Interaktivni internetni kalkulator.

http://www2.arnes.si/~gljsentvid10/izra_tem_mok_iz_vlage_tem_suh_tlaka.html (Pridobljeno 2. 6. 2013.)

Ware, R., Alber, C., Roken, C. in Solheim, F. 1997. Sensing integrated vapor along GPS ray paths. *Geophysical Research Letters* 24: 417–420.

Zhang, C-L., Kuo, Y-H., Dai, L-J., Chu, Y-L., Braun, J., Zhanga, J-J., Li, Q-C., Chen, M. 2008. The design and application of network of ground-based gps water vapor monitoring stations to improve precipitation prediction in the greater beijing metropolitan area.

V: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVII/B8*: 507–522.

http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/3_WG-VIII-3/07.pdf (Pridobljeno 10. 5. 2013.)

KAZALO PRILOG

PRILOGA A: PRIMER VHODNE DATOTEKE ZA IZRIS INTERPOLIRANIH VREDNOSTI KOLIČINE VODNE PARE V STOLPCU ZRAKA S PROGRAMOM GMT	A
PRILOGA B: PROGRAMSKA KODA ZA IZRIS V PROGRAMU GMT	B

**PRILOGA A: PRIMER VHODNE DATOTEKE ZA IZRIS INTERPOLIRANIH VREDNOSTI
KOLIČINE VODNE PARE V STOLPCU ZRAKA S PROGRAMOM GMT**

λ (°)	φ (°)	z (m)	ime postaje
13.5148993	46.5479346	0.0082260	ACOM
12.1745161	46.5271434	0.0071490	AFAL
14.7939188	46.5896880	0.0138780	BLEI
16.0901683	46.7407502	0.0149010	BODO
13.5420953	46.3326246	0.0146340	BOVE
12.4350205	46.0082943	0.0119745	CANV
15.2415912	46.2417849	0.0143910	CELJ
15.2131554	46.8135182	0.0143055	DLBG
15.8825205	46.9530963	0.0148815	FLDB
15.4934806	47.0671301	0.0136770	GRAZ
14.5437160	46.0481338	0.0141195	GSR1
13.7245555	45.5481087	0.0150795	KOPE
13.7299336	45.5491640	0.0149385	KOPR
15.6487295	46.5621904	0.0136500	MARI
13.4356365	45.9244691	0.0157215	MDEA
12.9876830	46.2407533	0.0128640	MPRA
13.6247090	45.8963480	0.0154170	NOVG
11.8960624	45.4111538	0.0172080	PADO
15.8811036	46.4165024	0.0137190	PTUJ
14.1715517	46.3437838	0.0138390	RADO
15.0800295	46.5117762	0.0138225	SLOG
15.0081482	45.9073243	0.0140565	TREB
13.7635204	45.7097572	0.0141480	TRIE
12.9735522	46.5572205	0.0083070	ZOUF

PRILOGA B: PROGRAMSKA KODA ZA IZRIS V PROGRAMU GMT

Programsko kodo odprotokodnega programa GMT zapišemo v zagonsko .bat datoteko:

```
echo off
set ura=23
set GTRPGPS=GPSTroposfera29_3_%ura%.ps

echo UPORABA SURFACE:
surface 29_3_%ura%.txt -Gtest.grd -I1m -R13/16.8/45.3/47 -V
grdinfo test.grd >test_grd.info
psclip postaje_circ.txt -R13/16.8/45.3/47 -Jm5c -B1/1:."Razporeditev vodne pare ob %ura%.00": -V -
K > %GTRPGPS%
grdimage test.grd -CTropo.cpt -R13/16.8/45.3/47 -Jm5c -V -K -O >> %GTRPGPS%
grdcontour test.grd -C0.0001 -R13/16.8/45.3/47 -Jm5c -O -K >> %GTRPGPS%
psclip -C -O -K >> %GTRPGPS%
pscoast -R13/16.8/45.3/47 -Jm5c -Df -Ia/1p,white -N1/0.5,red -O -K -V >> %GTRPGPS%
psxy postaje.txt -R13/16.8/45.3/47 -Jm5c -G0/0/0 -Sc0.3c -W -O -K -V >> %GTRPGPS%
psscale -D20/6/7.5c/0.6c -O -CTropo.cpt -I -E -B0.005:PWV:/:m: >> %GTRPGPS%
ps2raster -GC:\programs\gs9.05\bin\gswin32c.exe -P -A -Tf -V %GTRPGPS%
del %GTRPGPS%
```

Slika, ki bo nastala, poimenujemo »GPSTroposfera29_3_23.ps«.

Funkcija »surface« niz naključno razporejenih točk v ravnini (opazovališč), zapisanih v datoteki 29_3_10.txt interpolira z metodo najmanjše ukrivljenosti v grid dimenzij 1*1 minuta na obravnavanem območju med $\varphi = 45,3^\circ$ in $\varphi = 47^\circ$ ter $\lambda = 13^\circ$ in $\lambda = 16,8^\circ$.

Funkcija »grdinfo« zapiše podatke o gridu v datoteko, ki jo imenujemo test_grd.info.

S funkcijo pscclip določimo območje prikaza, in iz njega izločimo tiste dele, kjer so vrednosti popačene zaradi ekstrapolacije. Določimo, naj bo nad sliko še napis z njenim imenom (Razporeditev vodne pare ob %ura%.00).

S funkcijo »grdimage« definiramo izris grida in okvir lista. Grid, ki smo ga ustvarili s funkcijo »surface« želimo izrisati na območju med $\varphi = 45,3^\circ$ in $\varphi = 47^\circ$ ter $\lambda = 13^\circ$ in $\lambda = 16,8^\circ$, ki naj bo izrisano v Mercatorjevi projekciji, z barvno paletto »tropo«, pri čemer smo nastavili, da se barve spreminjajo glede na izračunane vrednosti vodne pare v stolpcu zraka, zapisane v datoteki .txt za izbrano uro s korakom 0.002 m. Izrišemo meje in reke s funkcijo »pscoast« na izbranem območju z izbrano projekcijo, želimo izris z najboljšo resolucijo.

Opazovališča, katerih podatke imamo zbrane v datoteki postaje.txt, želimo izrisati s simbolom kroga.

To omogoča funkcija »psxy«.

Slika je pripravljena, želimo še izris plastnic za tretjo koordinato, ki jo predstavlja izračunana vrednost višine vodnega stolpca nad opazovanimi postajami, in z metodo interpolacije določena tudi za točke, razporejene v gridu 1*1 minuta. Izris plastnic omogoča funkcija »grdcontour«. Funkcija »scale« omogoča določitev izrisa barvne skale (legende), s funkcijo »ps2raster« pa nastavimo, da bo izris v formatu .pdf.