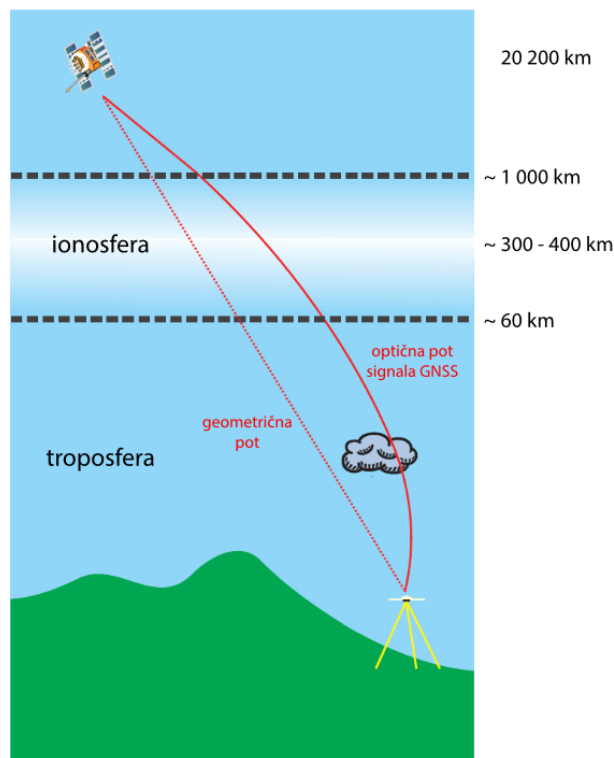


VAJA 3 – 1. DEL: VPLIV TROPOSFERE NA GNSS OPAZOVANJA

2024/2025

1 UVOD

Troposfersko refrakcijo definiramo kot zakasnitev GNSS signala pri širjenju skozi troposfero v primerjavi s širjenjem GNSS signala v vakuumu oziroma kot razliko med dolžino optične in geometrične poti GNSS signala skozi troposfero (slika 1).



Slika 1: Razlika med geometrično in optično potjo GNSS signala

Troposfersko refrakcijo razdelimo na hidrostatsko in mokro komponento. Hidrostatska komponenta je v največji meri posledica prisotnosti suhih plinov v troposferi, mokra komponenta pa posledica prisotnosti vodne pare. Hidrostatska komponenta predstavlja 90 % celotne troposferske refrakcije in jo lahko ob znanem zračnem tlaku na zemeljskem površju modeliramo z milimetrsko točnostjo. Mokra komponenta predstavlja zgolj 10 % celotne troposferske refrakcije, vendar jo zaradi velike prostorske in časovne variabilnosti prisotnosti vodne pare lahko modeliramo le s točnostjo nekaj centimetrov. Posledično mokro komponento troposferske refrakcije v primeru dolgih baznih vektorjev in/ali velikih višinskih razlik med krajišči baznih vektorjev ter v primeru določitve položaja z metodo PPP ocenimo kot neznanko v postopku obdelave (izravnave) GNSS opazovanj. Za namen modeliranja hidrostatsko/mokro komponento razdelimo na zenitno hidrostatsko/mokro komponento in pripadajočo projekcijsko komponento:

$$\tau(z) = \tau_h^z m_h(z) + \tau_w^z m_w(z) \quad (1)$$

kjer je:

- $\tau(z)$... troposferska refrakcija pri zenitni razdalji satelita z , [m],
- τ_h^z ... hidrostatska komponenta zenitne troposferske refrakcije, [m],
- $m_h(z)$... hidrostatska projekcijska komponenta, [-],
- τ_w^z ... mokra komponenta zenitne troposferske refrakcije, [m],
- $m_w(z)$... mokra projekcijska komponenta, [-].

2 MODELI TROPOSFERSKE REFRAKCIJE

2.1 Model Saastamoinen

Hidrostatsko komponento zenitne troposferske refrakcije τ_h^z modeliramo kot:

$$\tau_h^z = 0,002277 p_s \quad (2)$$

kjer je:

p_s ... zračni tlak na zemeljskem površju oziroma na višini GNSS antene, [hPa].

Mokro komponento zenitne troposferske refrakcije τ_w^z modeliramo kot:

$$\tau_w^z = 0,002277 \left(\frac{1255}{T_s} + 0,05 \right) e_s \quad (3)$$

kjer je:

T_s ... temperatura na zemeljskem površju oziroma na višini GNSS antene, [K].

e_s ... delni tlak vodne pare na zemeljskem površju oziroma na višini GNSS antene, [hPa].

Celotno troposfersko refrakcijo pri poljubni zenitni razdalji z izračunamo kot:

$$\tau(z) = \frac{0,002277}{\cos z} \left[p_s + \left(\frac{1255}{T_s} + 0,05 \right) e_s - \tan^2 z \right] \quad (4)$$

2.2 Model Hopfield

Hidrostatsko komponento zenitne troposferske refrakcije τ_h^z modeliramo kot:

$$\tau_h^z = 10^{-6} \cdot 77,6 \frac{p_s}{T_s} \frac{h_h}{5} \quad (5)$$

kjer je:

h_h ... efektivna višina hidrostatske refraktivnosti, [m], $h_h = 40\,136 + 148,72 (T_s - 273,15)$.

Mokro komponento zenitne troposferske refrakcije τ_w^z modeliramo kot:

$$\tau_w^z = 10^{-6} \cdot 3,73 \cdot 10^5 \frac{e_s}{T_s^2} \frac{h_w}{5} \quad (6)$$

kjer je:

h_w ... efektivna višina mokre refraktivnosti, [m], $h_w = 11\,000$ m.

Hidrostatična oziroma mokra projekcijska komponenta sta dani z enačbo:

$$m_i(z) = \frac{5}{h_i} \int_{-h_i}^0 \frac{(r_{trop_i} + x) x^4}{(r_{trop_i} + x)^2 - (r_s \sin z)^2} dx \quad (7)$$

kjer je:

x ... $x = h - h_i$,
 i ... indeks, ki označuje hidrostatično/mokro komponento, $i = h, w$,
 r_{trop_i} ... efektivni geocentrični radij hidrostatične/mokre refraktivnosti, [m],
 r_s ... geocentrični radij GNSS antene, [m].

Celotno troposfersko refrakcijo pri poljubni zenitni razdalji z izračunamo po enačbi (1).

Opomba: Integral enačbe (7) se lahko izračuna analitično, vendar je rešitev za velike višinske kote (majhne zenitne razdalje) numerično nestabilna, zato se priporoča izračun integrala po metodi, predlagani v Yionoulis (1970)¹.

3 MODELI METEOROLOŠKIH PARAMETROV

3.1 Modeliranje meteoroloških parametrov na podlagi standardne atmosfere

Pogosto so vrednosti meteoroloških parametrov na nadmorski višini zemeljskega površja H_s izpeljane iz modela standardne atmosfere:

$$p_s = p_0 [1 - 0,0000226 (H_s - H_0)] \quad (8)$$

$$T_s = T_0 - 0,0065 (H_s - H_0) \quad (9)$$

$$rh_s = rh_0 \exp [-0,0006396 (H_s - H_0)] \quad (10)$$

kjer je:

rh_s ... relativna vlažnost na zemeljskem površju, [-].

¹Yionoulis, S. M. 1970. Algorithm to compute tropospheric refraction effects on range measurements. Journal of Geophysical Research 75, 36: 7636–7637. doi:[10.1029/JC075i036p07636](https://doi.org/10.1029/JC075i036p07636).

Referenčne vrednosti meteoroloških parametrov standardne atmosfere p_0 , T_0 in rh_0 se nanašajo na referenčno nadmorsko višino H_0 :

$$\begin{aligned} H_0 &= 0 \text{ m} & p_0 &= 1013,25 \text{ hPa} \\ T_0 &= 291,15 \text{ K} & rh_0 &= 0,5 \end{aligned}$$

Delni tlak vodne pare, ki je vhodni parameter v modele troposferske refrakcije, izračunamo na podlagi relativne vlažnosti in temperature:

$$e_s = rh_s \exp(-37,2465 + 0,213166 T_s - 0,000256908 T_s^2) \quad (11)$$

3.2 Empirični model GPT2

Model GPT2 (Lagler in sod., 2013)² je globalni empirični model za modeliranje meteoroloških parametrov na zemeljskem površju. Izračunan je bil na podlagi empiričnih podatkov za obdobje 2001–2010. Pri modeliranju meteoroloških parametrov se upoštevajo variacije posameznega parametra na letni in polletni ravni. Izbran meteorološki parameter lahko izračunamo po enačbi:

$$r(t) = A_0 + A_1 \cos\left(\frac{DOY}{365,25} 2\pi\right) + B_1 \sin\left(\frac{DOY}{365,25} 2\pi\right) + A_2 \cos\left(\frac{DOY}{365,25} 4\pi\right) + B_2 \sin\left(\frac{DOY}{365,25} 4\pi\right) \quad (12)$$

kjer je:

- $r(t)$... izbran meteorološki parameter,
- A_0 ... povprečna vrednost izbranega parametra za obdobje 2001–2010,
- A_1, B_1 ... koeficienta, ki modelirata variiranje izbranega parametra na letni ravni,
- A_2, B_2 ... koeficienta, ki modelirata variiranje izbranega parametra na polletni ravni,
- DOY ... zaporedni dan v letu.

Koeficienti A_0, A_1, A_2, B_1 in B_2 so podani v obliki globalnega grida ločljivosti $1^\circ \times 1^\circ$ in se nanašajo na srednjo višino digitalnega modela višin ETOPO5. Za poljubno lokacijo se vrednosti parametrov izračunajo z bilinearno interpolacijo, pri čemer je potrebno pri določenih parametri upoštevati višinske korekcije, opisane v Lagler in sod. (2013).

4 VPLIV POGREŠKA TROPOSFERSKE REFRAKCIJE NA DOLOČITEV POLOŽAJA

4.1 Relativna komponenta pogreška troposferske refrakcije

Relativna komponenta pogreška troposferske refrakcije je posledica pogreškov, ki nastanejo pri modeliranju troposferske refrakcije na enem krajišču baznega vektorja, gledano relativno glede na drugo krajišče in

²Lagler, K., Schindelegger, M., Böhm, J., Krásná, H., Nilsson, T. 2013. GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. Geophysical Research Letters 40, 6: 1069–1073. doi:[10.1002/grl.50288](https://doi.org/10.1002/grl.50288).

vpliva predvsem na točnost višinske komponente položaja. Bolj kot se razlikujejo razmere v troposferi nad posameznim krajiščem baznega vektorja, večja bo praviloma relativna komponenta pogreška troposferske refrakcije. Na velikost relativne komponente pogreška troposferske refrakcije tako v največji meri vpliva višinska razlika med krajiščema baznega vektorja, manjši vpliv pa ima tudi dolžina baznega vektorja. Čim manjša velikost relativne komponente pogreška je zlasti pomembna pri lokalnih in manjših regionalnih GNSS mrežah. Približno vrednost pogreška višinske komponente položaja zaradi relativne komponente pogreška troposferske refrakcije lahko izračunamo kot:

$$\Delta h = \frac{\Delta \tau_{rel}^z}{\cos z_{max}} \quad (13)$$

kjer je:

- Δh ... pogrešek določitve višinske komponente položaja, [m],
- $\Delta \tau_{rel}^z$... relativna komponenta pogreška zenitne troposferske refrakcije, [m],
- z_{max} ... največja zenitna razdalja v obravnavani konfiguraciji opazovanj.

Groba ocena je, da se relativna komponenta pogreška zenitne troposferske refrakcije velikosti $\Delta \tau_{rel}^z = 1$ cm pri minimalnem višinskem kotu 15° ($z_{max} = 75^\circ$) odrazi v pogrešku višinske komponente položaja $\Delta h = 4$ cm.

4.2 Absolutna komponenta pogreška troposferske refrakcije

Absolutna komponenta pogreška troposferske refrakcije je posledica pogreškov, ki nastanejo pri modeliranju troposferske refrakcije na obeh krajiščih baznega vektorja in vpliva predvsem na merilo mreže. Čim manjša velikost absolutne komponente pogreška je zlasti pomembna pri globalnih in regionalnih GNSS mrežah, saj se vpliv absolutne komponente pogreška troposferske refrakcije povečuje z naraščanjem dolžine baznega vektorja. Približno vrednost pogreška merila mreže zaradi absolutne komponente pogreška troposferske refrakcije lahko izračunamo kot:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta \tau_{abs}^z}{R_e \cos z_{max}} \quad (14)$$

kjer je:

- l ... dolžina baznega vektorja, [m],
- Δl ... pogrešek dolžine baznega vektorja, [m],
- $\Delta \tau_{abs}^z$... absolutna komponenta pogreška zenitne troposferske refrakcije, [m],
- R_e ... polmer Zemlje, [m],
- z_{max} ... največja zenitna razdalja v obravnavani konfiguraciji opazovanj.

Groba ocena je, da se absolutna komponenta pogreška zenitne troposferske refrakcije velikosti $\Delta \tau_{rel}^z = 10$ cm pri minimalnem višinskem kotu 15° ($z_{max} = 75^\circ$) odrazi v pogrešku merila mreže velikosti 0,06 ppm.

5 NALOGA

Za dodeljeno stalno delujočo postajo omrežja SIGNAL izračunajte hidrostatsko in mokro komponento zenitne troposferske refrakcije ter celotno zenitno troposfersko refrakcijo. Izračun naredite za dneve 18.–24. 1. 2016, in sicer dvakrat – enkrat tako, da modelirate meteorološke parametre na podlagi standardne atmosfere, drugič pa na podlagi empiričnega modela GPT2. Pri izračunu meteoroloških parametrov iz modela GPT2 si pomagajte z MATLAB-ovo skripto `gpt2_1w.m`, ki za izbran položaj in dan iz globalnega grida GPT2 (datoteka `gpt2_1w.grd`) z metodo bilinearne interpolacije izračuna vrednosti meteoroloških parametrov.

Za obravnavano obdobje imate podane tudi vrednosti zenitne troposferske refrakcije iz računskega meteorološkega modela ALADIN/SI ter vrednosti hidrostatske in mokre komponente zenitne troposferske refrakcije, dobljene iz obdelave GNSS opazovanj z metodo PPP (modelirana hidrostatska komponenta in ocenjena mokra komponenta). Naredite primerjavo (tabelarično in grafično) med vašimi izračuni in podatki modela ALADIN/SI oziroma rezultati obdelave GNSS opazovanj z metodo PPP. S poljubno izbrano cenilko opišite skladnost obravnavanih modelov oziroma PPP rešitve z modelom ALADIN/SI.