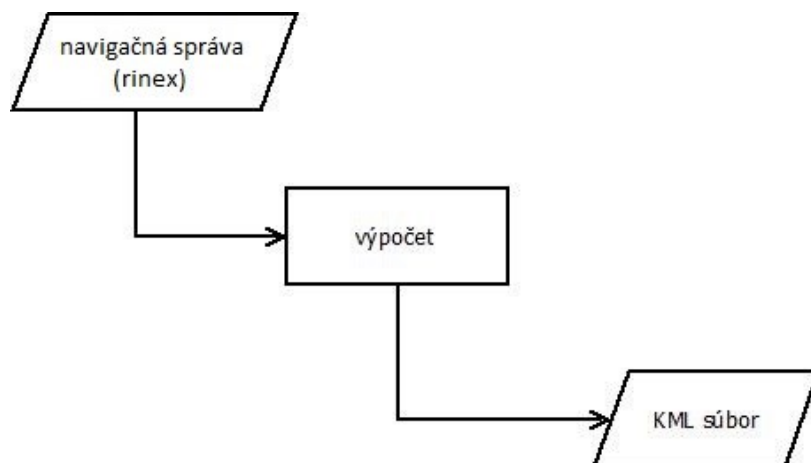


1 Tvorba aplikácie

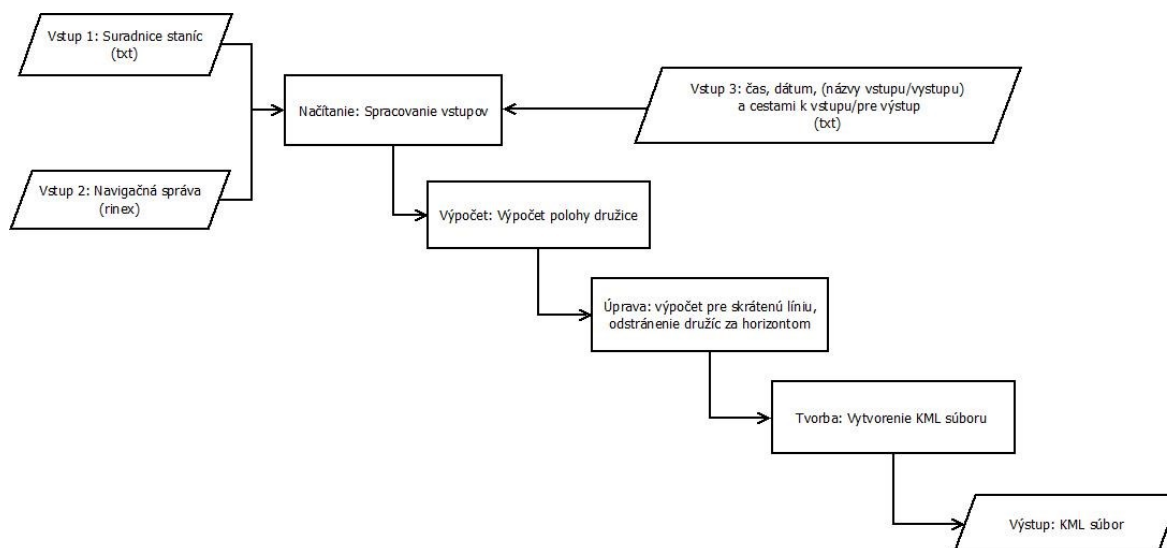
Cieľom práce je vytvorenie aplikácie, do ktorej vstupuje navigačná správa a výstupom je KML súbor, ktorý zobrazuje spojnice stanice – družice.

Vytvorenie aplikácie prebiehalo v programovom jazyku Python v programe PyScripter.



Obrázok 1 Počiatočný diagram

Ešte pred programovaním som si vytvoril diagram (Obrázok 1), v ktorom som si zobrazil postup práce. Tento diagram som postupne prepracovával a dopĺňal o ďalšie vstupy a procesy, ktoré boli pre aplikáciu potrebné. Vo finálnom diagrame (Obrázok 2) sa nachádzajú vstupy a procesy podľa ktorých som postupoval pri programovaní.



Obrázok 2 Finálny diagram

Po vytvorení programového kódu som pomocou knižnice py2exe v príkazovom riadku vytvoril z kódu spustiteľný exe súbor. Súbor sa spúšťa v príkazovom riadku.

Aplikácia pozostáva z *temp* priečinka, kde sa nachádza exe súbor, ďalšie priečinky sú *geoid_2008* (neoddeliteľná súčasť apl.), *vstup_stanice*, *vstup_rinex* a *vystup_kml*. Ďalej sa tam nachádza *vstup.txt* a *run.bat*, to je súbor cez ktorý sa aplikácia spúšťa. Exe súbor sa nesmie premenovať, inak nebude fungovať. V textovom súbore *vstup.txt* stačí zmeniť čas a dátum, názov výstupu. Do vstupných zložiek nahráť potrebné dáta a spustiť aplikáciu. Na príkazovom riadku sa zobrazí v prípade chybnnej cesty varovná hláška o chýbajúcom vstupnom súbore. Po skončení výpočtu sa zobrazí počet vygenerovaných línií a bodov (staníc).

1.2 Formát vstupných textových súborov

Do aplikácie vstupujú 3 súbory. Prvým je súbor s navigačnými správami vo formáte RINEX. Druhým vstupom je súbor *vstup.txt*, kde sú údaje o dátume, rozsahu času pre výpočet polohy družice, interval po akom čase sa výpočet polohy bude opakovať, cesty k vstupným a výstupným súborom. Tretím je súbor so súradnicami staníc.

Navigačné dáta, inak nazvané aj navigačná správa, je súbor vysielaný družicami. Z týchto dát si užívateľ dokáže spočítať polohu družice. Súbor vo formáte RINEX je rozdelený na hlavičku a telo, kde sa nachádzajú navigačné správy pre jednotlivé družice. Ukážka navigačnej správy je na Obrázok 3.

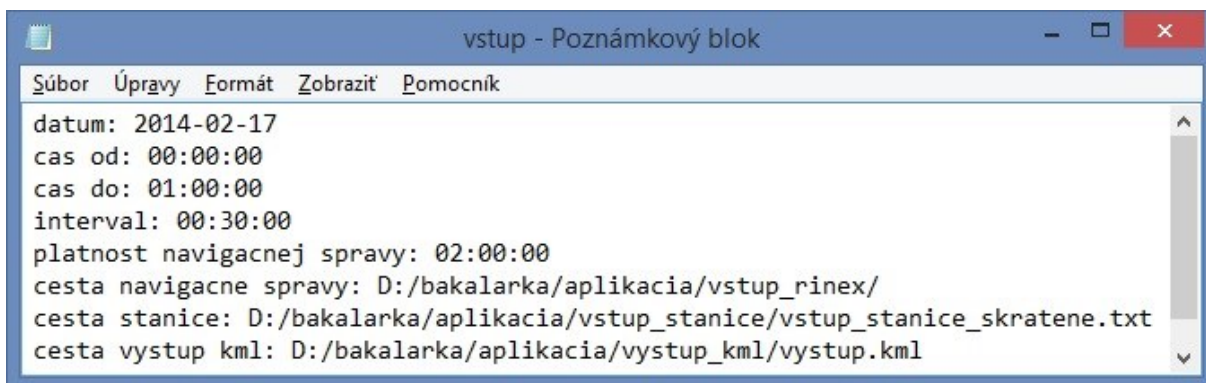
```

2.10          N: GPS NAV DATA          RINEX VERSION / TYPE
TPS2RIN 7.12  RIGTC, GO PECNY          20140218 000210 UTC PGM / RUN BY / DATE
NAVSTAR NAVIGATION DATA FROM STATION GOPE (RIGTC, GO PECNY) COMMENT
.2049D-007 .0000D+000 -.1192D-006 .1192D-006 ION ALPHA
.1311D+006 -.6554D+005 .6554D+005 -.5898D+006 ION BETA
-.931322574615D-09 .000000000000D+00 319488 1780 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
16 LEAP SECONDS
END OF HEADER
2 14 2 17 0 0 0.0 .479062553495D-03 .216004991671D-11 .000000000000D+00
.200000000000D+02 -.610312500000D+02 .458590530708D-08 -.187245326194D+01
-.324845314026D-05 .132059709867D-01 .113006681204D-04 .515356349182D+04
.864000000000D+05 .949949026108D-07 .324696628004D-01 -.191852450371D-06
.939740200317D+00 .149593750000D+03 -.248274688554D+01 -.787282793488D-08
-.403588239642D-10 .100000000000D+01 .178000000000D+04 .000000000000D+00
.200000000000D+01 .000000000000D+00 -.200234353542D-07 .200000000000D+02
.863990000000D+05
5 14 2 17 0 0 0.0 -.388228800148D-03 .159161572810D-11 .000000000000D+00
.270000000000D+02 .731562500000D+02 .484305887570D-08 .388456524179D+00
.387243926525D-05 .353592622560D-02 .782683491707D-05 .515379774666D+04
.864000000000D+05 .763684511185D-07 .109916587171D+01 .106170773506D-06
.947430706532D+00 .221218750000D+03 .371781799164D+00 -.829641700764D-08
.596810573842D-09 .100000000000D+01 .178000000000D+04 .000000000000D+00
.200000000000D+01 .000000000000D+00 -.102445483208D-07 .270000000000D+02
.863990000000D+05

```

Obrázok 3 Ukážka navigačnej správy pre družice systému GPS vo formáte Rinex 2.10¹

Textový súbor *vstup.txt* má presne stanovený formát (až na pár výnimiek), ktorý musí byť dodržaný, inak aplikácia nebude fungovať. Formát súboru musí zodpovedať Obrázok 4. Hodnota vstupujúca od výpočtu alebo cesta musí byť na riadku umiestnená posledná. Ako oddeľovač slov musí byť použitý medzerník. Na riadkoch sú hodnoty dátumu a času od – do, ďalej interval pre ktorý sa bude výpočet polohy družice opakovať a ďalej cesta k RINEX súborom a cesta pre uloženie výstupu.



Obrázok 4 Ukážka formátovania sedemriadkového vstupného súboru

Súbor zo súradnicami staníc má jednoduché formátovanie. Na jednom riadku sa nachádza názov stanice, pravouhlé súradnice (XYZ) a zemepisné súradnice (φ, λ, h_{el}) vid'. Obrázok 5. Stanicami v práci nazývam referenčné stanice, ktoré sú tvorené GNSS

¹ Špecifikácia Rinex 2.10: <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/pub/data/format/rinex210.txt>

prijímačom trvalo umiestneným na bode z dobrým výhľadom na oblohu (väčšinou na streche budovy). Príkladom takejto stanice je Pecný (GOPE) na rovnomennom geodetickom observatóriu v Ondřejove či VSBO umiestnená na budove rektorátu VŠB-TU Ostrava .

| Súbor | Úpravy | Formát | Zobrazit | Pomocník | | |
|-------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| BUCU | 4093760.745 | 2007793.947 | 4445130.065 | 44.4639457288 | 26.1257428799 | 143.238102105 |
| BZRG | 4312657.373 | 864634.797 | 4603844.535 | 46.4990249813 | 11.3367988706 | 329.137139765 |
| CFRM | 3924572.720 | 1301971.353 | 4840464.769 | 49.6847966325 | 18.3531893257 | 373.593725552 |
| CLIB | 3903195.089 | 1050232.601 | 4917869.916 | 50.7717059618 | 15.0598975873 | 448.355083232 |

Obrázok 5 Ukážka formátovania vstupného súboru staníc

1.3 Výpočty

1.3.1 Výpočet polohy družice

Pre výpočet potrebujeme poznať hodnotu geocentrickej gravitačnej konštanty a uhlovú rýchlosť rotácie Zeme pre súradnicový systém WGS-84.. Ďalším vstupom sú korekčné hodnoty v navigačnej správe.

Pre výpočet polohy družice som použil nasledujúce kroky²:

1. Pre vstupný čas do výpočtu:

$$\Delta t = t_{obs} - t_{ref} \quad 1$$

Δt je rozdiel času observácie pre ktorý počítame polohu družice (t_{obs}) a času platnosti záznamu navigačnej správy (t_{ref}) v sekundách.

2. Na výpočet uhlovej rýchlosti družice n :

$$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}$$

$$n = n_0 + \Delta n \quad 2$$

- a - je veľkosť hlavnej polosi elipsy dráhy, jej druhá mocnina je uvedená v navigačnej správe na 2. riadku v 4 poli,
- Δn - korekcia je uvedená na 1. riadku v 3.poli.

² Vzťahy podľa: HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H., COLLINS, J. GPS: Theory and Practice, 4. vydání, Springer, Vídeň, 1997

3. Výpočet strednej anomálie M:

$$M = M_0 + n * \Delta t \quad 3$$

- M_0 - stredná anomália platná pre čas záznamu, v navigačnej správe 1. riadok vo 4.poli.

4. Stanovenie excentrické anomálie E interakčným spôsobom:

$$M = E - e * \sin E$$

$$E_0 = M$$

$$E_{i+1} = E_i - \frac{E_i - e * \sin E_i - M}{1 - e * \cos E_i} \quad 4$$

- e – numerická excentricita 2.riadok, 2. pole,

Ako východnú hodnotu E použijeme $E_0 = M$. Pokračujeme iteráciami až pokiaľ sa dve po sebe nasledujúce hodnoty E_i a E_{i+1} rovnajú.

5. Výpočet skutočnej anomálie v :

$$\cos v = \frac{\cos E - e}{1 - e * \cos E} \quad 5$$

6. Stanovenie argumentu zemepisnej šírky u :

$$\delta u = C_{uc} * \cos 2(v + \omega) + C_{us} * \sin 2(v + \omega) \quad 6$$

$$u = v + \omega + \delta u$$

- ω - argument perigea, 4. riadok, 3. pole,
- C_{uc} - korekcia argumentu zemepisnej šírky, 2. riadok, 1. pole,
- C_{us} - korekcia argumentu zemepisnej šírky, 2. riadok, 3. pole.

Pre zjednodušenie výpočtu je dobré si zaviesť výpočet $\cos 2(v+\omega)$ a $\sin 2(v+\omega)$ podľa vzorcov:

$$\cos 2x = \cos^2 x - \sin^2 x, \quad 7$$

$$\sin 2x = 2 * \sin x * \cos x$$

7. Stanovenie rádiusu obežné dráhy r :

$$\delta r = C_{rc} * \cos 2(v + \omega)$$

$$r = a * (1 - e * \cos E) + \delta r \quad 8$$

- C_{rc} - korekcia rádiusu, 4. riadok, 2. pole,
- C_{rs} – korekcia rádiusu, 1. riadok, 2.pole.

8. Stanovenie súradníc v rovine obežnej dráhy x, y :

$$x = r * \cos u$$

$$y = r * \sin u$$

9

$$\sqrt{x^2 + y^2} = r \text{ kontrolný výpočet}$$

9. Stanovenie inklináčného uhlu i :

$$\delta i = C_{ic} * \cos 2(v + \omega) + C_{is} * \sin 2(v + \omega)$$

10

$$i = i_0 + i_{dot} * \Delta t + \delta i$$

- C_{ic} - korekcia inklináčného uhlu, 3. riadok, 2. pole,
- C_{is} - korekcia inklináčného uhlu, 3. riadok, 4. pole,
- i_0 - inklináčny uhol pre čas záznamu, 4. riadok, 1. pole,
- i_{dot} - rýchlosť zmeny inklináčného uhlu, 5. riadok, 4. pole

10. Stanovenie uhlu zemepisnej dĺžky vzostupného uzlu Ω :

$$\Omega = \Omega_0 + (\Omega_{dot} - \omega_e) * \Delta t - \omega_e * T_{0e}$$

11

- Ω_0 - zemepisná dĺžka vzostupného uzlu platná pre čas záznamu, 3. riadok, 3. pole,
- Ω_{dot} - rýchlosť zmeny Ω , 4.riadok, 4.pole,
- T_{0e} – referenčný čas efemeríd vyjadrený v sekundách od počiatku daného GPS týždňa, 3.riadok, 1.pole.

11. Stanovenie X, Y, Z súradníc v systéme WGS 84 pre čas t_{obs} :

$$X = x * \cos \Omega - y * \sin \Omega * \cos i$$

$$Y = x * \sin \Omega + y * \cos \Omega * \cos i$$

$$Z = y * \sin i$$

12

$$\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = r - \text{kontrolný výpočet}$$

Prvý testovací výpočet som urobil v prostredí MS Excel. Výpočet som prevádzal pre družicu 5, stanicu Pecný (GOPE). Aplikovaním vyššie uvedených vzťahov som sa snažil vypočítať polohu družice, pre čas observácie $t_{obs} = 0$ a 3600 sekúnd (1 hodina). Na Obrázok 9 a Obrázok 7 sa dá sledovať zhoršenie presnosti pri „starnutí“ navigačnej správy.

| | PG05 | PG05 - presné efemeridy | ROZDIEL |
|---|----------------|-------------------------|---------|
| X | -443 117,691 | -443 118,027 | 0,336 |
| Y | 21 910 494,379 | 21 910 494,374 | 0,005 |
| Z | 14 854 326,589 | 14 854 326,520 | 0,069 |

Obrázok 6 Výsledok výpočtu pre $t_{obs} = 0$ sekúnd a porovnanie z presnými efemeridami

| | PG05 | PG05 - presné efemeridy | ROZDIEL |
|--|----------------|-------------------------|---------|
| | -5 868 243,966 | -5 868 244,547 | 0,581 |
| | 15 501 569,634 | 15 501 569,553 | 0,081 |
| | 20 681 959,547 | 20 681 959,423 | 0,124 |

Obrázok 7 Výsledok výpočtu pre $t = 3600$ sekúnd a porovnanie s presnými efemeridami

1.3.2 Transformácia zemepisných súradníc na pravouhlé³

Ako prvé si musíme vypočítať prierečny polomere krivosti N:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - \sin^2 \varphi}} \quad 13$$

$$X = (N + H_{el}) * \cos \varphi * \cos \lambda$$

$$Y = (N + H_{el}) * \cos \varphi * \sin \lambda$$

$$Z = [N * (1 - e^2) + H_{el}] * \sin \varphi$$

14

Z toho spočítame X, Y, Z, čo sú pravouhlé priestorové súradnice. φ je zemepisná šírka, λ je zemepisná dĺžka, H_{el} je elipsoidická výška a N je prierečny polomer krivosti.

³ Vzťahy podľa: VEJRAŽKA, F., HRDINA, Z., PÁNEK., P: Rádiové určovanie polohy (družicový systém gps), ČVUT Praha, 259 s

1.3.3 Transformácia pravouhlých súradníc na zemepisné súradnice³

Pre inverznú metódu prepočtu súradníc v kapitole 1.3.2

$$\lambda = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$$

$$\varphi_0 = \arctan\left[\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left(1 + \frac{e^2}{1 - e^2}\right)\right] \quad 15$$

ďalej pokračujeme iteráciami:

$$N_i = \frac{a}{1 - \sin \varphi_{i-1}}$$

$$H_{el_i} = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos \varphi_{i-1}} - N_i \quad 16$$

$$\varphi_i = \arctan\left[\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left(1 - \frac{N_i e^2}{N_i + H_{el_i}}\right)^{-1}\right]$$

Vo svojom výpočte používam okrem počiatočného výpočtu ešte dve iterácie. Výsledné súradnice λ a φ sú v radiánoch. Pre prepočet do stupňov ich musíme vynásobiť hodnotou $p = 180/\pi$, prípadne použiť funkciu vo výpočtovom programe na prevod radiánov na stupne.

1.3.4 Výpočet bodu na spojnici stanica - družica

Keďže družica sa nachádza viac ako 20 000 km nad zemou, potreboval som vypočítať pre potreby vizualizácie bod na spojnici stanica – družica, ktorý je o niečo bližšie k Zemi. Výpočet som naprogramoval do funkcie *skratenie*. Vstupom sú súradnice stanice, súradnice družice a vzdialenosť (d) (ktorú je možnosť zmeniť v programovom kóde aplikácie). Na výpočet som použil parametrické vyjadrenie priamky v priestore.

1. Parametrické vyjadrenie priamky v priestore:

$$x = x_1 + t * u_x$$

$$y = y_1 + t * u_y$$

$$z = z_1 + t * u_z$$

- x_1, y_1, z_1 sú súradnice bodu na priamke, v mojom prípade sú to súradnice stanice.
- u_x, u_y, u_z je vektor priamky stanica - družica, t je parameter.

Súradnicu z som určil ako $z_1 + d$. Tak dokážem vypočítať parameter t . Potom dokážem určiť súradnice x, y . Výsledné súradnice x, y, z sa prerátajú do zemepisných súradníc a vypočítaná výška (h') sa porovná z výškou (h) ktorú chcem dosiahnuť pri vizualizácií. Ak je h' menšia ako h , výpočet sa opakuje s tým že d sa zvýši o 10. Výpočet sa opakuje kým nie je splnená podmienka $h' \geq h$.

1.3.5 Odstránenie družíc pod horizontom

Aplikácia vypočíta polohu všetkých družíc v navigačnej správe pre zadaný čas. No stáva sa, že spojnica stanica-družica prechádza cez zem. Je to spôsobené tým že v zadanom rozsahu času pre výpočet polohy je družica pod horizontom a nemôže byť teda prijímačom observovaná. Vzťahom 14 vypočítam uhol priamok. Výsledkom sú len ostré uhly. Prvou priamkou je spojnica stanica – družica (vektor u). Druhou je stanica – stanica', kde stanica' je zo súradníc na elipsoide s nulovou výškou a prepočítané do pravouhlých súradníc.

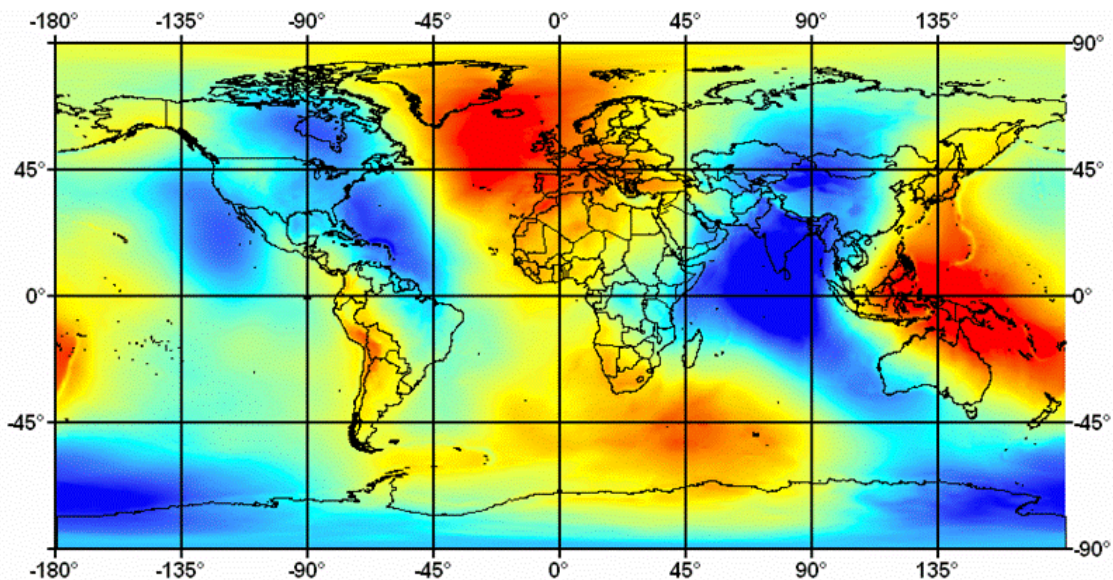
$$\cos \alpha = \frac{|u_1 * v_1 + u_2 * v_2 + u_3 * v_3|}{|u| * |v|} \quad 18$$

- u_i a v_i sú súradnice vektorov u a v , $i = 1, 2, 3$. $|u|, |v|$ je veľkosť vektorov.

Vzorec 14 som upravil odstránením absolútnej hodnoty a vynásobením celého vzťahu -1. Tým som dostal kladné uhly ktoré sa nachádzajú nad a záporné pod horizontom.

1.3.6 Úprava výšky pre správne zobrazenie

V špecifikácií KML súboru (<https://developers.google.com/kml/documentation>) sa uvádza niekoľko módov zobrazenia výšky (altitude) v GE. Výška môže byť nastavená na relatívne k zemi (relative to ground), relatívne k dnu mora (relative to sea floor) alebo na absolútnu (absolute) výšku. Absolútna výška sa v GE vzťahuje k hladine mora. Pre vykreslenie línií v GE som použil tento mód.

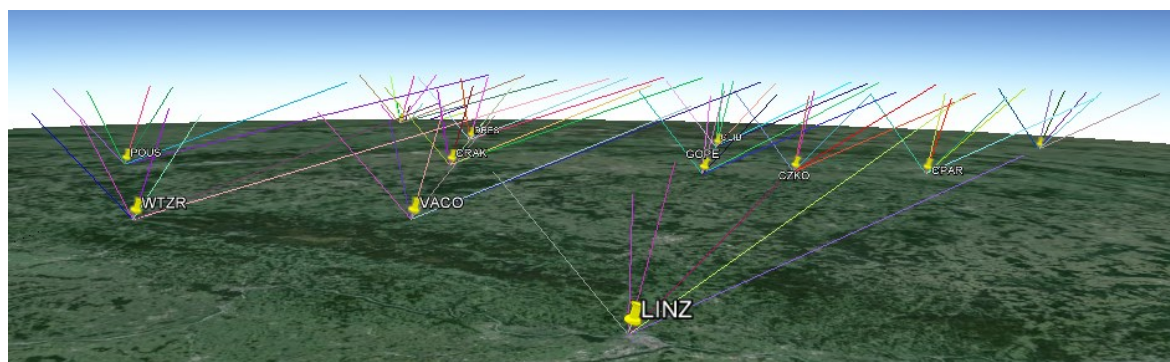


Obrázok 8 Rozdelenie gravitačného modelu po 45°

Na stránkach NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) [11] som získal gravitačný model Zeme (Earth Gravitational Model – EGM2008) (geoid) v rastrovej podobe. Pomocou týchto rastrov je zmenená elipsoidická výška a je korektné zobrazená v Google Earth.

2 Vizualizácia

Výstupom aplikácie je KML súbor, v ktorom sú zobrazené stanice a línie k vypočítaným polohám družíc.



Obrázok 9 Korektný výstup z aplikácie pre skrátané línie