

GNSS Remote Sensing – alternatívne využitie družicových meraní

Peter Špánik, Ľubomíra Gerháťová, Ján Hefty¹

¹Katedra geodetických základov, Stavebná fakulta,
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
email✉: peter.spanik@stuba.sk, lubomira.gerhatova@stuba.sk,
jan.hefty@stuba.sk

**Družicové metody v geodezii a katastru
Fakulta stavební VUT v Brně, 2. 2. 2017**

Obsah prezentácie

- Metódy diaľkového prieskumu Zeme pomocou GNSS,
- Sondovanie atmosféry pomocou ohybu signálov GNSS,
 - Fyzikálna podstata a geometria GNSS RO,
 - Výpočet ohybového uhla z meraní (geometrická optika),
 - Inverzia ohybového uhla na parametre neutrálnej atmosféry
- Súčasné a plánované misie využívajúce GNSS RO,
- Organizácie aktívne v GNSS RO.

Diaľkový prieskum Zeme pomocou GNSS

Diaľkový prieskum Zeme (ang. Remote Sensing)

- všeobecne rozumieme optické, radarové, či laserové merania, ktorými sa získavajú informácie o stave Zemského telesa,

Diaľkový prieskum Zeme pomocou GNSS

Diaľkový prieskum Zeme (ang. Remote Sensing)

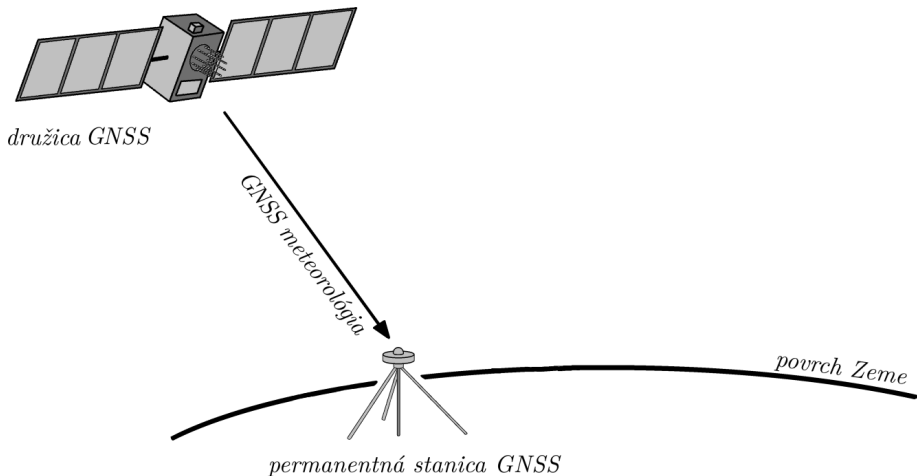
- všeobecne rozumieme optické, radarové, či laserové merania, ktorými sa získavajú informácie o stave Zemského telesa,
- v súvislosti s GNSS pod týmto termínom rozumieme také metódy, ktoré slúžia na určovanie parametrov prostredia s ktorým GNSS signál interaguje, t.j. prechádza ním alebo sa od neho odráža

Diaľkový prieskum Zeme pomocou GNSS

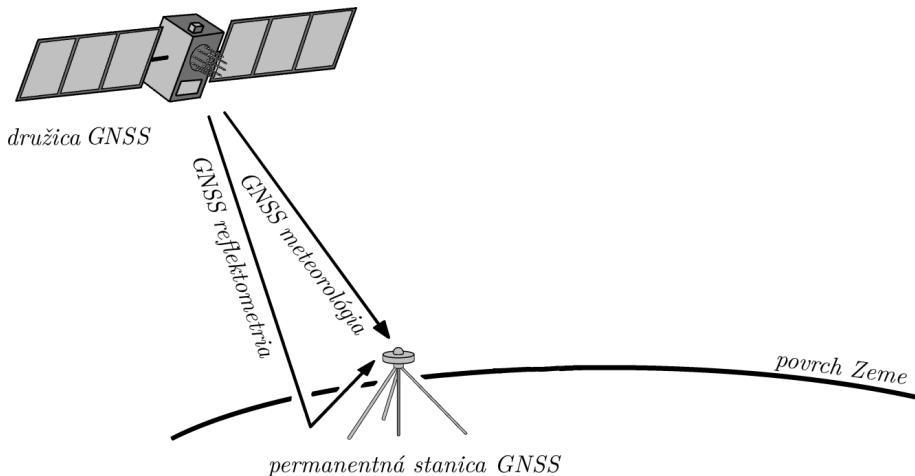
Diaľkový prieskum Zeme (ang. Remote Sensing)

- všeobecne rozumieme optické, radarové, či laserové merania, ktorými sa získavajú informácie o stave Zemského telesa,
- v súvislosti s GNSS pod týmto termínom rozumieme také metódy, ktoré slúžia na určovanie parametrov prostredia s ktorým GNSS signál interaguje, t.j. prechádza ním alebo sa od neho odráža
- štyri rôzne geometrie diaľkového prieskumu pomocou GNSS – dané možným umiestnením prijímača (na Zemi, na nízkej obežnej dráhe) a typom interakcie s prostredím (spomaľovanie atmosférou, odraz)

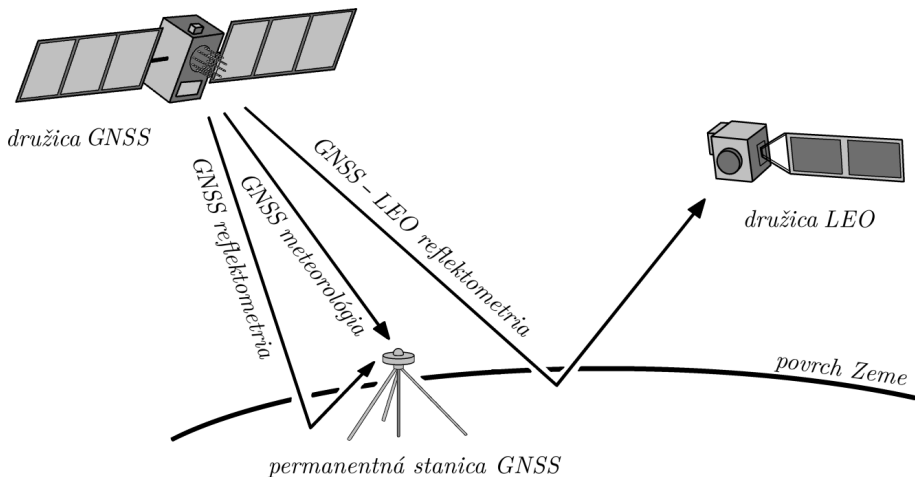
Geometrie diaľkového prieskumu Zeme pomocou GNSS



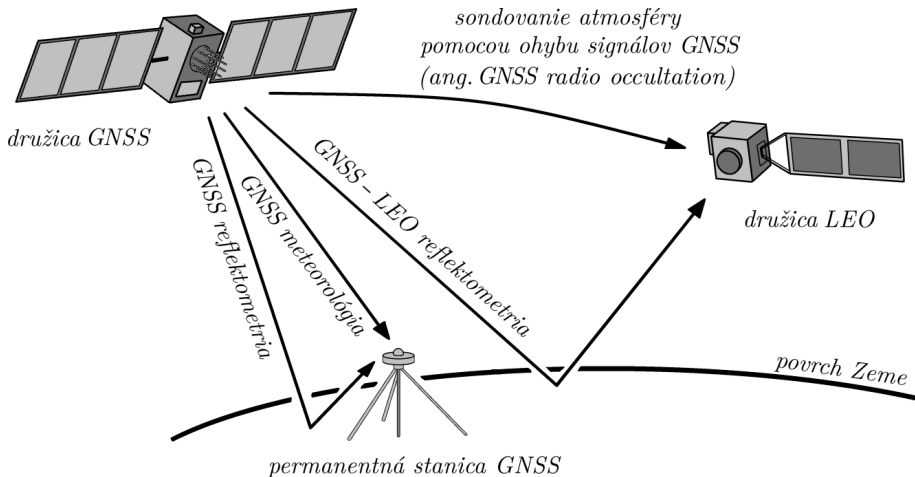
Geometrie diaľkového prieskumu Zeme pomocou GNSS



Geometrie diaľkového prieskumu Zeme pomocou GNSS



Geometrie diaľkového prieskumu Zeme pomocou GNSS

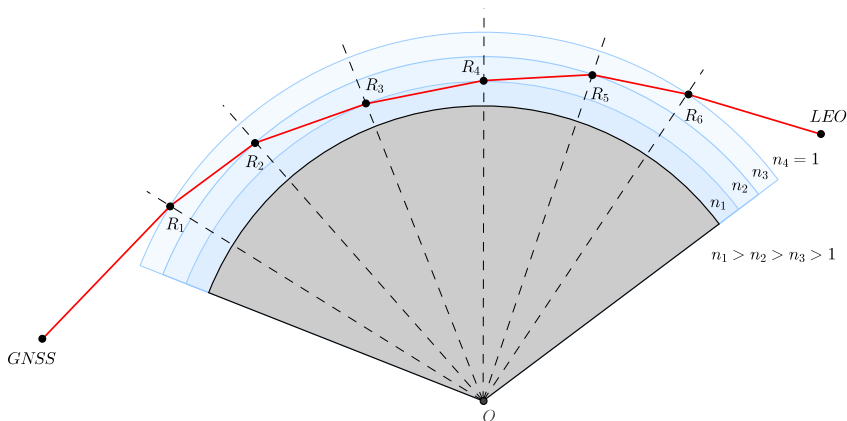


Historické využitie metódy

- prvé využitie pri prieskumných misiách na planéty slnečnej sústavy: Mars (Mariner IV, 1965) a Venuša (Mariner V, 1967),
- rádiový signál vysielaný družicou sa ohýbal v dôsledku prechodu atmosférou planéty a prijímal sa rádioteleskopmi na Zemi,
- odvodené parametre a vlastnosti neutrálnych a ionizovaných častí atmosféry planéty (refrakčné číslo, teplota, tlak) a ich vertikálna štruktúra.

Fyzikálna podstata GNSS RO

Prechod GNSS signálu vrstvami atmosféry s rôznym indexom lomu má za následok jeho odklon od priameho smeru v súlade s Fermatovým princípom, ktorý sa lokálne vyjadruje pomocou Snellovho zákona lomu.

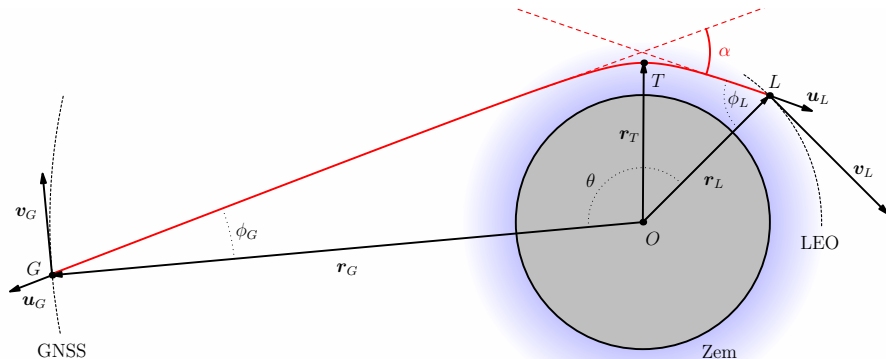


Geometria GNSS RO

Vstupné veličiny: r_G , r_L , v_G , v_L

Odhadované veličiny: α , r_T (poloha bodu T)

Pre sféricky symetrickú funkciu platí: $p = n(r) \cdot r \cdot \sin \phi = \text{const.}$



Ohybová udalosť (ang. occultation event):

- sled po sebe idúcich ohybov, kedy sa pre každé meranie určí impaktný parameter p a ohybový uhol α , ktoré sa ďalej využijú na inverziu na parametre atmosféry,

Ohybová udalosť (ang. occultation event):

- sled po sebe idúcich ohybov, kedy sa pre každé meranie určí impaktný parameter p a ohybový uhol α , ktoré sa ďalej využijú na inverziu na parametre atmosféry,
- družica GNSS môže pri pohľade z družice LEO zapadať alebo vychádzať (zapadajúca geometria je vhodnejšia),

Ohybová udalosť (ang. occultation event):

- sled po sebe idúcich ohybov, kedy sa pre každé meranie určí impaktný parameter p a ohybový uhol α , ktoré sa ďalej využijú na inverziu na parametre atmosféry,
- družica GNSS môže pri pohľade z družice LEO zapadať alebo vychádzať (zapadajúca geometria je vhodnejšia),
- jedna ohybová udalosť trvá do 100 sekúnd, pričom ohybový uhol pre najnižšie vrstvy atmosféry je do 1° ,

Ohybová udalosť (ang. occultation event):

- sled po sebe idúcich ohybov, kedy sa pre každé meranie určí impaktný parameter p a ohybový uhol α , ktoré sa ďalej využijú na inverziu na parametre atmosféry,
- družica GNSS môže pri pohľade z družice LEO zapadať alebo vychádzať (zapadajúca geometria je vhodnejšia),
- jedna ohybová udalosť trvá do 100 sekúnd, pričom ohybový uhol pre najnižšie vrstvy atmosféry je do 1° ,
- výsledkom je „sken“ atmosféry s horizontálnym rozlíšením zhruba 150 – 200 km a vertikálnym rozlíšením až do 100 m,

Výpočet pomocných veličín (rel. Dopplerov posun)

Dodatočná fáza a jej zmena:

$$\Delta s(t) = \Psi(t) - \Psi_0(t)$$

$$\Delta s(t) = \frac{c}{f_G} \int_{t_0}^t (f_L^0(t') - f_L(t')) dt'$$

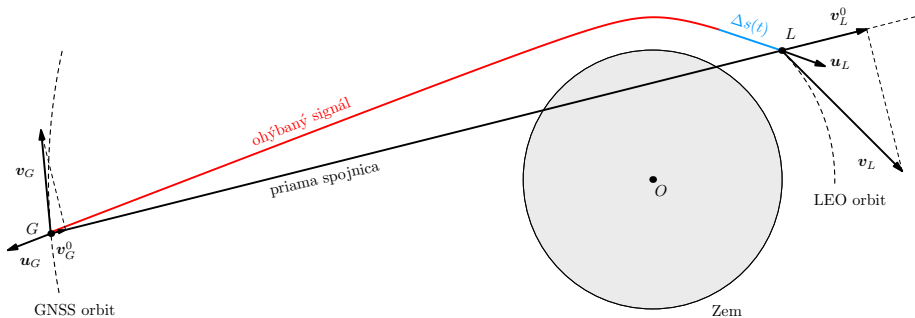
$$f_L(t) = f_L^0(t) - \frac{f_G}{c} \frac{d\Delta s(t)}{dt}$$

Relatívny Dopplerov posun:

$$d = \frac{f_L - f_G}{f_G} = \frac{c - \mathbf{v}_L \cdot \mathbf{u}_L}{c - \mathbf{v}_G \cdot \mathbf{u}_G} - 1$$

$$d = \frac{f_L - f_G}{f_G} = \frac{f_L}{f_G} - 1$$

$$d = \frac{f_L^0}{f_G} - \frac{1}{c} \frac{d\Delta s}{dt} - 1$$



Výpočet ohybového uhla α (geometrická optika)

Pre neznáme vektory $\mathbf{u}_G, \mathbf{u}_L$ platia nasledovné vzťahy:

$$\frac{c - \mathbf{v}_L \cdot \mathbf{u}_L}{c - \mathbf{v}_G \cdot \mathbf{u}_G} - 1 = d \quad (1)$$

$$\mathbf{r}_L \times \mathbf{u}_L - \mathbf{r}_G \times \mathbf{u}_G = \mathbf{0} \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_L \cdot \mathbf{u}_L = 1 \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_G \cdot \mathbf{u}_G = 1 \quad (4)$$

Výpočet ohybového uhla pomocou určených vektorov $\mathbf{u}_G, \mathbf{u}_L$:

$$\cos \alpha = -\mathbf{u}_G \cdot \mathbf{u}_L$$

Výpočet impaktného parametra p ako:

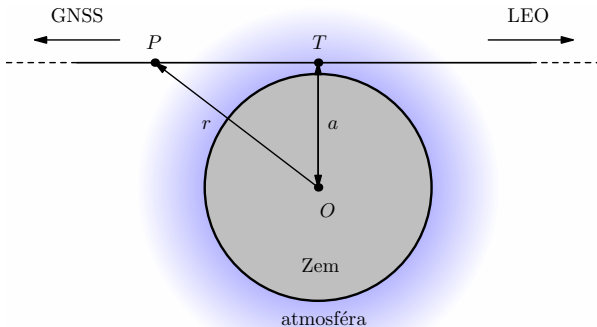
$$p = |\mathbf{r}_G| \cdot \sin \phi_G = |\mathbf{r}_L| \cdot \sin \phi_L$$

Inverzia α na index lomu neutrálnej atmosféry

Použitým matematickým aparátom je **inverzná Abelova transformácia**:

Abelov integrál:
$$\alpha(a) = -2 \int_{r_T}^{\infty} d\alpha = -2a \int_{r_T}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n^2 r^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dr} dr$$

Inverzia:
$$n(r) = \exp \left[\frac{1}{\pi} \int_r^{\infty} \frac{\alpha(p)}{\sqrt{p^2 - r^2}} dp \right]$$



Transformácia n na parametre neutrálnej atmosféry

Index lomu n , resp. refrakčné číslo $N = (n - 1) \times 10^6$ je závislé od:

- termodynamickej teploty T ,
- atmosférického tlaku p ,
- vlhkosti, t.j. parciálneho tlaku vod. pár e ,
- počtu voľných elektrónov v ionosfére n_e

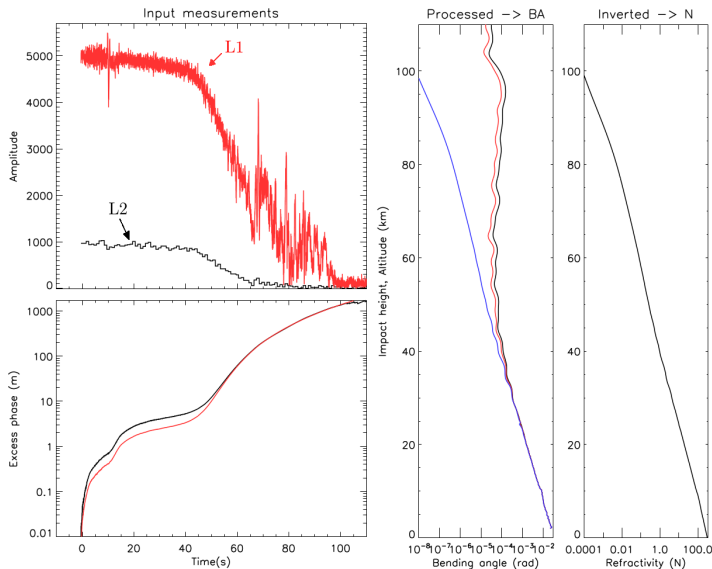
Všeobecné prostredie:
$$N = \kappa_1 \frac{p}{T} + \kappa_2 \frac{e}{T^2} + \kappa_3 \frac{n_e}{f^2}$$

Pri použití dvoch frekvencií je možné určiť hodnoty α , ktoré majú eliminovaný vplyv ionosféry, v takom prípade dostávame:

Nedisperzné prostredie:
$$N = 77.6 \frac{p}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2}$$

Nedisperzné prostredie nad 10 km:
$$N = 77.6 \frac{p}{T_{dry}}$$

Ukážka raw dát a vypočítaných parametrov α, p, N



Zdroj: Danish Meteorological Institute et. al.: The Radio Occultation Processing Package (ROPP), User Guide, Part III: Pre-processor module, Version 8.0, 2014

Misie využívajúce GPS/GNSS RO

GPS/MET (GPS Meteorology) – 1995

- prvá misia dokazujúca použiteľnosť sondovania atmosféry pomocou GPS signálov (predtým využívané signály UDZ prijímané na Zemi),
- umožňovala merania maximálne 500 ohybových udalostí denne,
- proof of concept, misia nemala operatívne využitie.

Misie využívajúce GPS/GNSS RO

GPS/MET (GPS Meteorology) – 1995

- prvá misia dokazujúca použiteľnosť sondovania atmosféry pomocou GPS signálov (predtým využívané signály UDG prijímané na Zemi),
- umožňovala merania maximálne 500 ohybových udalostí denne,
- proof of concept, misia nemala operatívne využitie.

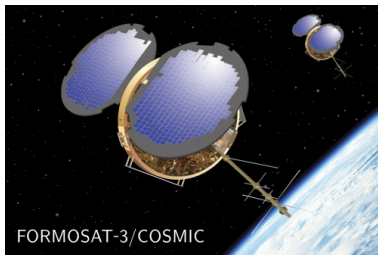
CHAMP (2000), GRACE (2002), SAC-C (2000), Metop-A,B

- družice na výskum tiažového poľa Zeme, meteorologické družice, misie ktoré nemali GPS RO ako svoj primárny experiment,
- vyššie počty ohybových udalostí, už aj s operatívnym použitím pri numerických modeloch počasia,
- niektoré sú stále operatívne (GRACE, Metop).

Misie využívajúce GPS/GNSS RO

FORMOSAT-3/COSMIC (2006)

- konštelácia 6 družíc na LEO so sklonom 72° , vo výške 512 km,
- operatívne využite meraní ohybových uhlov v meteorológii a klimatológii (centrum ECMWF v Európe, UCAR v USA),
- sumárne poskytuje stabilne 1500 – 2000 meraní ohybov denne,
- pokračovanie ako FORMOSAT-7/COSMIC-2 (12 družíc, vybavené aj prijímačom GLONASS, až 12 000 ohybov denne).



Organizácie aktívne v GNSS RO

International Radio Occultation Working Group (IROWG)

- spolupráca Coordination Group for Meteorological Satellites a World Meteorological Organization,
- koordinácia používania dát, návrh výmenných formátov dát získaných z GNSS RO, fórum výskumníkov, referencie, ...

Radio Occultation Meteorology Satellite Application Facilities

- skrátené ROM SAF, samostatné pracovisko pod EUMETSATom, vedúcou organizáciou je Dánsky meteorologický inštitút (DMI),
- operačné stredisko pre spracovanie a publikovanie ohybových uhlov, profilov (N, T, p, e) z dát GPS RO, spracovanie vš. súčasných misií.

COSMIC Data Analysis and Archive Center (CDAAC)

- po zaregistrovaní možný prístup k dátam na rôznej úrovni (level),
- spravuje a archivuje výsledky meraní COSMIC a Metop.

Odkazy na organizácie GNSS RO

- www.irowg.org, www.romsaf.org, www.cosmic.ucar.edu

Dostupný softvér pre GNSS RO

- **ROPP** – Radio Occultation Processing Package
 - vyvíjaný organizáciou ROM SAF,
 - voľne prístupný po registrácii: www.romsaf.org/ropp
- **newroam** – new Radio Occultation Atmospheric Monitoring
 - využívaný v UCAR, autori: Sergey Sokolovskiy, Zhen Zeng

Odkazy na literatúru GNSS RO

- Melbourne, W. et al.: *The application of spaceborne GPS to atmospheric limb sounding and global change monitoring*. JPL 1994.
- Kursinski, E.R. et al.: *Observing the Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System*. Journal of Geophysical Research, Vol. 102. 1997.
- Anthes, R.: *Exploring Earth's atmosphere with radio occultation: Contributions to weather, climate and space weather*. Atmospheric Measurement Techniques, Vol. 4, Issue 6. 2011.
- Danish Meteorological Institute, *The Radio Occultation Processing Package User Guide, Part I – III*. 2014.

Ďakujem za pozornosť!

Kontakty:

peter.spanik@stuba.sk

lubomira.gerhatova@stuba.sk

jan.hefty@stuba.sk