

## POKROČILÉ METODY LOKALIZACE A NAVIGACE 02 JEVY A FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU GNSS MĚŘENÍ

doc. Ing. Michal Kačmařík, Ph.D.



Financováno  
Evropskou unií  
NextGenerationEU



Národní  
plán  
obnovy



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

- Aktuální stav kosmického segmentu a řízení přístupu k signálům, technika měření, použitý přijímač
- Efemeridy družic
- Chyby hodin
- Relativistické efekty
- Atmosféra
- Slapové síly
- Vícecestné šíření signálu (multipath)
- Fázová centra přijímače
- Šum, hardwarová zpoždění

- výslednou přesnost určení polohy přijímače můžeme z pozice uživatele ovlivnit primárně volbou vhodné techniky měření – viz prezentace č. 1. *Úvod*
- výběr techniky měření je vázaný na typ přijímače, který máme k dispozici (jedno-frekvenční přijímač pouze pro kódová měření pro systém GPS a dvou-frekvenční přijímač s kombinací kódových a fázových měření pro všechny 4 systémy GNSS mají zcela odlišný potenciál)
- výběr přijímače a techniky měření můžeme (jednoduše) ovlivnit sami

# Vlivy na straně kosmického segmentu

- Řízení přístupu k signálům družic
- Efemeridy družic
- Chyby hodin na družicích

- Všechny systémy GNSS mají zabudovány mechanismy pro znepřístupnění či zneřesnění některých služeb neautorizovaným uživatelům
- Např.:
  - GPS: Selektivní dostupnost (SA) = záměrné zavádění proměnlivých chyb do signálů družic (znehodnocování palubních efemerid a hodin družic), deaktivována 5. května 2000
  - GPS: Anti-Spoofing (A/S) = šifrování přesného P-kódu přidáváním W-kódu, vzniká tak šifrovaný P(Y)-kód (P(Y)-kód = P-kód + W-kód), přesný kód je tak dostupný pouze autorizovaným uživatelům, důvodem pro A/S je zamezení možnosti nepříteli generovat umělé signály stejné struktury jako má GPS a znehodnocovat tím přesnost určení polohy přijímače
  - Galileo: Veřejná regulovaná služba (PRS) = přístup k šifrovaným signálům je zajištěn pouze vybraným organizacím (primárně složky integrovaného záchranného systému), signály jsou odolnější vůči interferencím, snižují možnost spoofingu a jammingu

- Age of Data (AOD) = stáří navigační zprávy od jejího posledního nahrání na družici
- s rostoucím stářím dat klesá jejich přesnost
- interval aktualizace je odlišný:
  - obecně 1 x den
  - efemeridy a korekce chyb hodin družic jsou obvykle aktualizovány každé cca 2 hodiny (závisí na konkrétním systému GNSS)
  - almanach minimálně co 6 dní
- AOD má vliv na přesnost měření pokud používáme palubní produkty pro určení polohy, NE pokud provádíme post-processing dat s využitím tzv. přesných produktů

# Efemeridy družic

- Efemeridy družic = parametry oběžných drah družic = údaje o poloze družice (angl. ephemeris, orbits)
- efemeridy jsou obsaženy v:
  - almanachu v navigační zprávě (přibližné polohy všech družic systému)
  - navigační zprávě (přesná poloha družice, která danou navigační zprávu vysílá)
  - tzv. **přesných produktech** (pro zpřesnění určení polohy při měření -> v reálném čase či post-processingu)
- chyba určení polohy družice přímo ovlivňuje chybu určení polohy přijímače (polohu přijímače určujeme na základě polohy družic)

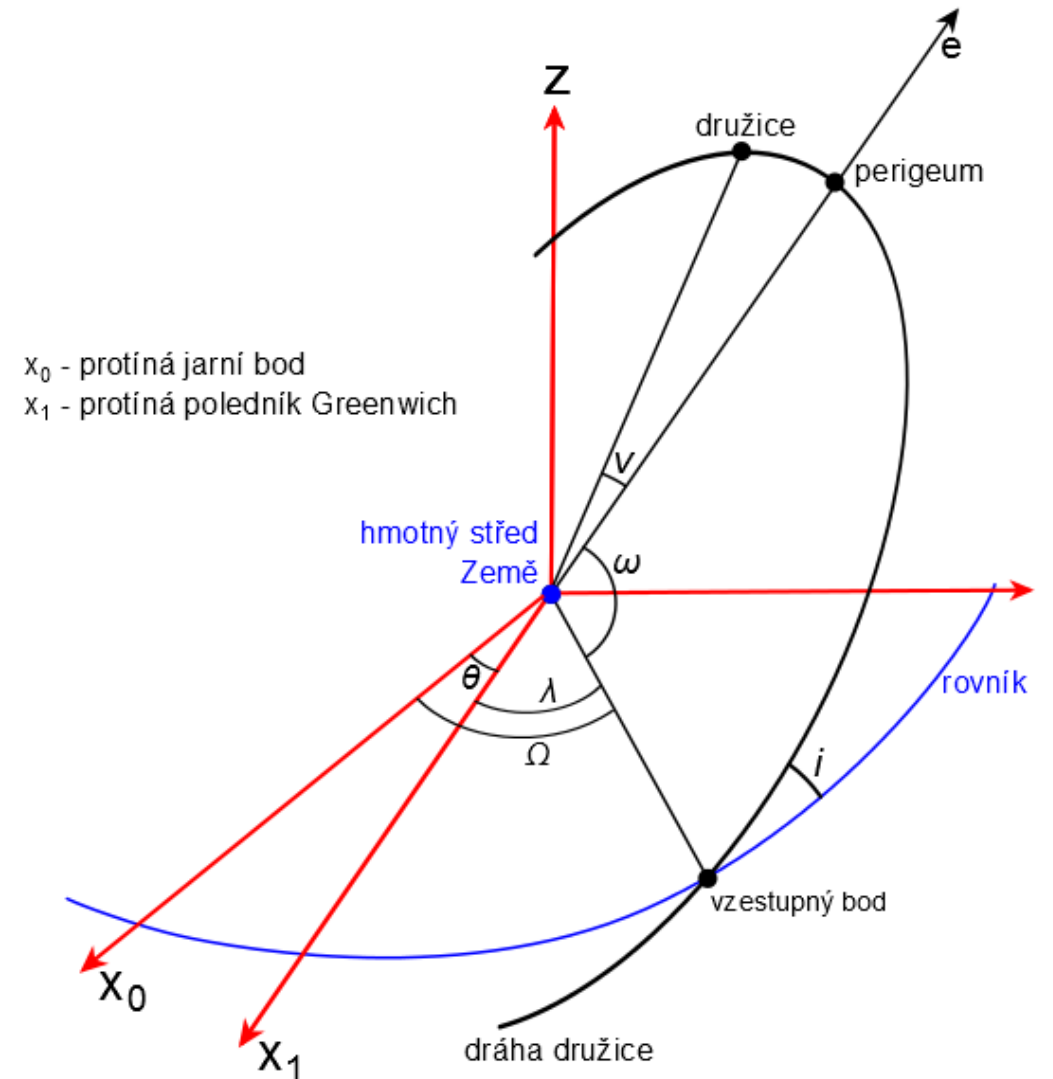
# Efemeridy družic

- Efemeridy jsou určovány na základě již provedených observací ke družicím, pro predikci vývoje jsou modelovány do budoucna
- efemeridy jsou určovány:
  - palubní produkty: správcem systému GNSS s využitím monitorovacích stanic pozemního segmentu
  - přesné produkty: analytickými centry, které zpracovávají data z celosvětové sítě GNSS referenčních stanic (standardně cca 100 stanic)
- efemeridy mohou být vyjádřeny:
  - souřadnicemi v referenčním systému používaném daným GNSS či v ITRF (almanach, efemeridy vysílané družicemi či přesné efemeridy pro zpřesnění určení polohy)
  - Keplerovskými elementy



- určují tvar, velikost a polohu dráhy družice

Parametr	Popis
$\Omega$	délka vzestupného uzlu
$i$	sklon dráhy k ekliptice (inklinační úhel, úhel mezi rovinou dráhy a rovníkem)
$\omega$	argument perigea (perigeum = bod dráhy s nejmenší vzdáleností mezi družicí a středem Země)
$a$	hlavní poloosa elipsy dráhy
$e$	numerická excentricita (vzdálenost ohniska elipsy od jejího středu, $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$ )
$T_0$	čas průchodu perigeem



- Aktuální polohu družice na její dráze určíme pomocí tzv. anomálií (úhlové veličiny):
  - $M(t)$  – střední anomálie
  - $E(t)$  – excentrická anomálie
  - $v(t)$  – skutečná anomálie
- Platí vztahy:
  - $M(t) = n * (t - T_0)$
  - $E(t) = M(t) + e * \sin E(t)$
  - $v(t) = 2 * \arctan \left[ \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \tan \frac{E(t)}{2} \right]$
- kde:
  - $n = \frac{2\pi}{P} = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}$ , úhlová rychlost družice
  - $P$  = perioda oběhu družice (v případě GPS 11.97 hodin)
  - $\mu$  = gravitační konstanta

# Vlivy působící na pohyb družice

- Dráha družice vyjádřená Keplerovskými elementy je pouze teoretická a neuvažuje vlivy reálně na družici působící způsobující časové změny v její dráze,
- tyto vlivy je potřeba pro stanovení přesných efemerid družice uvažovat
- jedná se zejména o:
  - nepravidelnosti gravitačního pole Země (zejména vlivem zploštění Země)
  - gravitační vliv Slunce a Měsíce (přímý x nepřímý = přílivy a odlivy)
  - tlak slunečního záření
  - rezonance
  - odpor atmosféry
  - relativistické efekty

- Hlavní poskytovatelé přesných produktů (standardně efemeridy družic, korekce chyb hodin družic, parametry rotace Země):
  1. IGS (International GNSS Service) – poskytuje tzv. kombinované produkty vzniklé váženou kombinací přesných produktů dodaných jednotlivými analytickými centry
  2. Samostatná analytická centra, např.:
    - CODE (Center for Orbit Determination in Europe), Švýcarsko
    - GFZ (GeoForschungsZentrum Potsdam), Německo
    - ESA (European Space Agency), Evropa
    - WUM (Wuhan University), Čína
    - JPL (Jet Propulsion Laboratory), USA
    - ...

- Existuje několik variant přesných produktů:
  - final = nejpřesnější, dostupné cca 2 týdny po observacích
  - rapid = dostupné cca 1 až 2 dny po observacích
  - ultra-rapid = dostupné několik hodin po observacích, respektive soubor je složen z části již observovaných a části predikovaných produktů)
  - predicted = predikované efemeridy, dostupné v reálném čase

# Přesné produkty s efemeridami družic poskytované IGS a CODE (formát SP3)

Produkt (délka řešení)	Přesnost	Dostupnost po observaci	Systémy
Almanach	~ několik km	v reálném čase	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
Palubní efemeridy	~ 100 cm	v reálném čase	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
IGS Ultra Rapid (predikovaná část, 24 h)	~ 5 cm	v reálném čase (soubory jsou publikovány co 6 hodin)	GPS, GLONASS
IGS Ultra Rapid (observovaná část, 24 h)	~ 3 cm	3 – 9 hodin (soubory jsou publikovány co 6 hodin)	GPS, GLONASS
IGS Rapid (24 h)	~ 2.5 cm	17 – 41 hodin	GPS
IGS Final (7 dní)	~ 2 cm	12 – 18 dní	GPS, GLONASS
CODE Ultra Rapid (predikovaná část, 0-24 h = "P", 24-48 h = "P2", 0-120 h = "5D")		v reálném čase (soubory jsou publikovány co 6 hodin)	GPS, GLONASS, Galileo
CODE Ultra Rapid (observovaná část, 24 h, "U")		(soubory jsou publikovány co 6 hodin)	GPS, GLONASS, Galileo
CODE Rapid Early (24 h, "R")		generováno ráno pro předchozí den	GPS, GLONASS, Galileo
CODE Rapid Final (24 h, "M")		zpřesnění Rapid Early	GPS, GLONASS, Galileo
CODE Final (7 dní)			GPS, GLONASS

## Přesné produkty s efemeridami družic (formát SP3) – multi konstelace GNSS

- Vývoj multi-GNSS přesných produktů je v rámci IGS řešen iniciativou MGEX (<https://igs.org/mgex/>)
- Doposud neexistuje žádný kombinovaný přesný produkt poskytovaný IGS pro systémy Galileo a BeiDou
- Některá analytická centra poskytují v různých variantách multi-GNSS přesné produkty zahrnující 3-4 systémy GNSS (např. CODE, WUM, GFZ, ESA, ...) – viz [https://igs.org/mgex/data-products/#orbit\\_clock](https://igs.org/mgex/data-products/#orbit_clock)
- Hodnocení multi-GNSS přesných produktů dostupné např. v: *Li a Kačmařík (2021)*

# Chyba hodin družice

- chyba hodin družice = rozdíl mezi časem hodin na družici a systémovým časem
- i přes svou vysokou přesnost a stabilitu jsou atomové hodiny družic zdrojem chyb v určení pseudo-vzdálenosti
- korekce chyb hodin družic jsou obsaženy v:
  - **navigační zprávě** vysílané družicí
  - **přesných produktech** s korekcemi hodin družic
- v případě navigační zprávy a predikovaných přesných produktů klesá kvalita korekcí s časem → v případě nulového stáří navigační zprávy se chyba určení pseudo-vzdálenosti vlivem chyby hodin družice může pohybovat okolo 0.8 m, v případě stáří 24 h pak okolo 1 – 4 m
- chybu hodin družice můžeme zcela eliminovat použitím diferencí observací – chyba hodin jedné družice bude v jednom čase totožná pro jakékoliv 2 přijímače na zemském povrchu
- chybu hodin družice je taktéž možné eliminovat vhodnou kombinací měření k dané družici na 2 frekvencích



# Přesné produkty s korekcemi chyb hodin družic poskytované IGS a CODE (formát CLK)

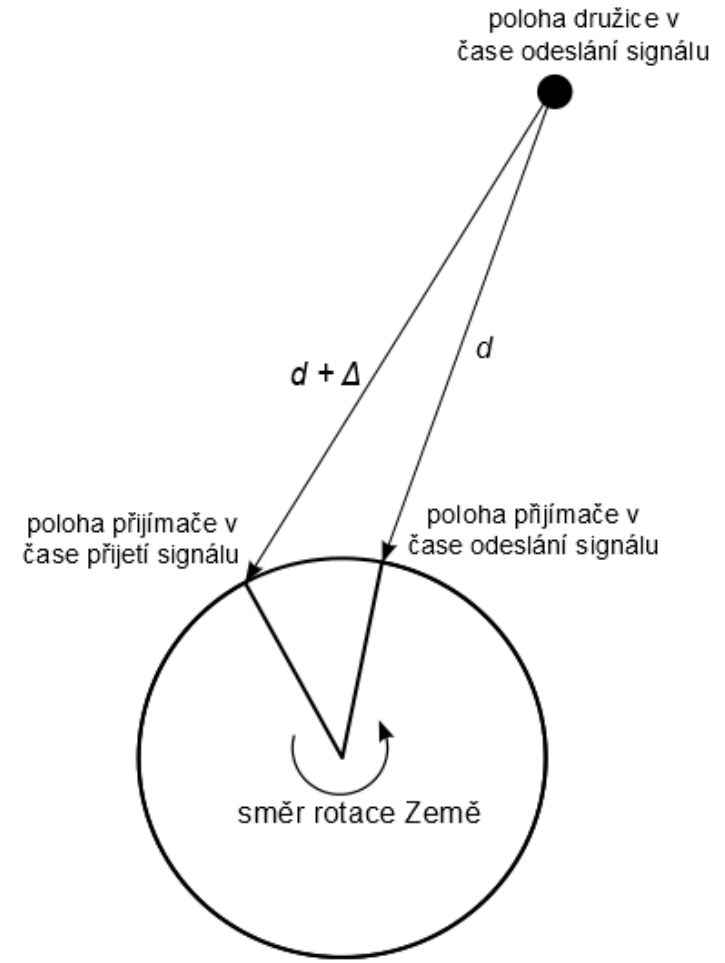
Produkt (platnost řešení)	Přesnost (RMS)	Interval korekcí	Dostupnost po observaci	Systémy
Navigační zpráva (24 h)	~ 5 ns	2 h	v reálném čase	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
IGS Ultra Rapid (predikovaná část, 24 h)	~ 3 ns	15 min	v reálném čase (soubory jsou publikovány co 6 hodin)	GPS, GLONASS
IGS Ultra Rapid (observovaná část, 24 h)	~ 150 ps	15 min	3 – 9 hodin (soubory jsou publikovány co 6 hodin)	GPS, GLONASS
IGS Rapid (24 h)	~ 75 ps	5 min	17 – 41 hodin	GPS
IGS Final (7 dní)	~ 75 ps	verze 30 s, 5 min	12 – 18 dní	GPS, GLONASS
CODE Ultra Rapid (predikovaná část, 0-24 h = "P", 24-48 h = "P2", 0-120 h = "5D")		5 min	v reálném čase (soubory jsou publikovány co 6 hodin)	GPS, GLONASS, Galileo
CODE Ultra Rapid (observovaná část, 24 h, "U")		5 min	(soubory jsou publikovány co 6 hodin)	GPS, GLONASS, Galileo
CODE Rapid Early (24 h, "R")		30 s	generováno ráno pro předchozí den	GPS, GLONASS, Galileo
CODE Rapid Final (24 h, "M")		30 s	zpřesnění Rapid Early	GPS, GLONASS, Galileo
CODE Final (7 dní)		verze 5 s, 30 s		GPS, GLONASS

# Relativistické efekty

- na měření GNSS působí obecná i speciální teorie relativity
- ovlivňují oběžnou dráhu družice, propagaci signálu a zejména hodiny na družici i přijímači
- obecnou teorii relativity musíme uvažovat, jelikož družice a přijímač se nachází v místech s různým gravitačním potenciálem
- speciální teorii relativity musíme uvažovat kvůli rozdílům v rychlosti pohybu družice a přijímače na Zemi

- Vliv na hodiny na družici můžeme rozdělit:
  - **konstantní část** – daná poloměrem osy rotace družice kolem Země, u systému GPS je eliminována nastavením základní frekvence hodin družice na 10.22999999543 MHz, která se pak při příjmu signálu na zemském povrchu jeví jako 10.23 MHz
  - **periodická část** – daná excentricitou oběžné dráhy družice => pokud je družice v perigeu, běží hodiny na družici pomaleji (úhlová rychlost rotace družice je vyšší a družice se nachází v oblasti s nižším gravitačním potenciálem), a naopak, pokud se družice nachází v apogeu, běží její hodiny rychleji; korekci tohoto vlivu musí provádět přijímač, není součástí navigační zprávy

- Vliv na hodiny přijímače:
  - vzniká vlivem rotace Země v průběhu šíření signálu (Sagnacův efekt)
  - úhlová rychlost rotace Země na rovníku je přibližně  $0.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  (úhlová rychlost rotace družice je cca 10 x větší)
  - pokud není korigován, může vést k chybě určení polohy přijímače o velikosti 30 m



- signály vysílané družicí nejsou perfektně časově synchronizovány, existují rozdíly mezi frekvencemi i složkami signálu = kódy
- dáno generováním různých složek signálu v samostatných částech vysílače družice, jejich kompletováním a vysíláním anténou

- Příklad pro rozdíly mezi standardními kódy systému GPS:

$$B_{P1-P2} = B_{P1} - B_{P2}$$

$$B_{P1-C1} = B_{P1} - B_{C1}$$

$$B_{P2-C2} = B_{P2} - B_{C2}$$

- $B_{P1-P2}$ ,  $B_{P1-C1}$ ,  $B_{P2-C2}$  označujeme jako diferenční kódové bias (DCB)

- hodnoty  $B_{P1-P2}$  dosahují řádu ns či prvních desítek ns

- hodnoty  $B_{P1-C1}$  dosahují řádu ns

- situace popsaná výše pro standardní kódy GPS platí samozřejmě i pro modernizované kódy GPS a další systémy GNSS

# Diferenční kódové bias

- hodnoty DCB jsou v čase stabilní (změny mezi dny s RMS okolo 0.05 ns)
- v navigačních zprávách systémů GPS, Galileo, BeiDou jsou obsaženy tzv.  $T_{GD}$  korekce, neboli diferenční kódové bias (differential code biases, DCB), neboli inter-signal corrections (ISC), které vyjadřují časový rozdíl ve vysílání dvou kódů (signálů)
- např. standardní navigační zpráva GPS obsahuje časovou korekci pro P1 a P2

- Geodetické GNSS přijímače mohou poskytovat tato kódová měření:
  - C/A (C1)
  - P1
  - P2
  - $X2 = C1 + (P2 - P1)$
  - L2C (C2)
- v současnosti existují tři skupiny přijímačů v závislosti na tom, jaká kódová měření poskytují:
  - P1/P2 = poskytují C1, P1, P2
  - C1/X2 = poskytují C1 a lineární kombinaci X2, staré typy přijímačů Rogue, Trimble
  - C1/P2 = poskytují C1 a P2, moderní generace přijímačů Leica, Novatel, Trimble
- některé přijímače jsou hybridní = pro signály GPS spadají do jedné skupiny, pro GLONASS do jiné

# Diferenční kódové bias

- korekce chyb hodin družic v přesných produktech i ty vysílané družicemi jsou časově vztaženy k lineární kombinaci signálů prosté ionosféry (viz dále v prezentaci)
  - pokud používáme jedno-frekvenční měření nebo jinou kombinaci signálů, musíme korekci chyb hodin družice opravit o DCB
  - pokud zpracováváme data z přijímače spadajícího do skupiny C1/X2 či C1/P2, musíme jejich observace opravit o DCB, aby byly plně konzistentní s P1/P2
- DCB soubory jsou taktéž publikovány vybranými analytickými centry GNSS (např. CODE)
- aktuální DCB soubory jsou typicky distribuovány s 30 denním plovoucím oknem (korekce jsou platné vždy pro posledních 30 dní)



- DCB jsou potřebné pro:
  - výpočet polohy pouze na základě C/A kódových měření (obecně jedno-frekvenčních měření)
  - přesné stanovení času při využití kódových měření
  - zjišťování parametrů ionosféry s využitím kódových měření
  - řešení ambiguit fázových měření s využitím kódových měření (Melbourne-Wubbena lineární kombinace) pokud každý z přijímačů základny náleží do jiné skupiny přijímačů
- obecně: DCB jsou potřeba pouze ve velmi přesných aplikacích, jelikož jejich vliv na přesnost určení souřadnic je na úrovni několika mm

# Wind-up efekt

- signály GNSS jsou pravo-točivě kruhově polarizovány (tento druh polarizace napomáhá snižovat efekt multipath)
- družice v průběhu letu rotuje, aby její vysílající antény směřovaly ke středu Země a zároveň bylo možné získávat energii solárními panely (kolem poledne či půlnoci rotuje družice v průběhu cca 30 minut kolem celé své osy)
- rotace družice (případně přijímače při kinematických měřeních) kolem svislé osy vede ke změně fázového měření (až o jednu vlnovou délku), kterou přijímač nesprávně interpretuje jako změnu vzdálenosti ke družici
- kódová měření nejsou tímto efektem dotčena
- vliv je prakticky eliminován při použití diferenčních technik měření, při použití přesných technik využívajících nediferencované observace (typicky PPP) je potřeba jej eliminovat použitím modelu

- Viz prezentace č. 5: *Změny souřadnic v čase, časové řady*

# Vliv atmosféry na šíření signálu GNSS

- Ionosféra
- Troposféra

- Atmosféra = plynný obal Země
- signál GNSS ovlivňují její dvě složky – troposféra a ionosféra
- troposféra = přízemní vrstva atmosféry zasahující v našich zeměpisných šířkách do výšky přibližně 11 km (nad rovníkem 16-18 km, nad póly 6-8 km)
- ionosféra = část atmosféry obsahující elektricky nabitě (ionizované) částice, jejichž počet a distribuce je v čase proměnlivá; ionosféra je dělena do několika vrstev v rozsahu 50-1 000 km nad zemským povrchem.

- dochází ke **zpoždění signálu** (dálkoměrného kódu i fázové vlny)
- typická hodnota zpoždění je 2,3 m/8 ns pro zenitový směr nad GNSS přijímačem umístěným v nulové nadmořské výšce
- vliv troposféry není závislý na použité frekvenci GNSS měření = troposféra není disperzivním médiem pro frekvence používané GNSS
- mapovací funkce - čím nižší je elevační úhel observace, tím větší vzdálenost signál v troposféře urazí a tím více je jí ovlivněn; mapovací funkce umožňují přepočítání zpoždění signálu vlivem troposféry pro zenitový směr nad přijímačem na libovolný elevační úhel a naopak; jejich základem je  $1/\sin(\text{el. úhel})$ ; používané map. funkce = VMF, GMF, Niell

- **Celkové zpoždění signálu (Zenith Total Delay, ZTD):**

$$\mathbf{ZTD = ZHD + ZWD}$$

- **ZHD** = hydrostatická složka vlivu atmosféry - závisí převážně na atmosférickém tlaku a teplotě vzduchu, tvoří zhruba 90 % ZTD
- **ZWD** = nehydrostatická (mokrá) složka vlivu atmosféry - závisí převážně na vodní páře v troposféře (voda v jiných skupenstvích – déšť, sníh, mlha nemá vliv na šíření GNSS signálu vzhledem k jeho vlnové délce)

- *Jednoduchá autonomní technika s kódovými měřeními:* hydrostatická složka je obvykle modelována, nehydrostatická zanedbána, případně taktéž modelována
- *Diferenční techniky:* vliv troposféry je do různé míry eliminován dvojitými diferencemi observací (míra eliminace závisí na horizontální vzdálenosti BASE a ROVER, výškovém rozdílu mezi BASE a ROVER a aktuálních meteorologických podmínkách)
- *Pokročilý diferenční post-processing (síťové řešení), či použití techniky PPP:* hydrostatická složka je obvykle modelována a nehydrostatická složka určována z observací jako neznámý parametr



- Používané modely = GPT3, GPT2, GPT2w, Saastamoinen, Hopfield
- Obě složky troposférické refrakce (hydrostatická/nehydrostatická) se modelují samostatně
- Obrácená úloha = stanovení parametrů troposféry z GNSS měření pro určení obsahu vodních par v atmosféře = obor GNSS meteorologie

- Dochází ke zpoždění šíření dálkoměrného kódu a zrychlení fázové vlny
- typické hodnoty zpoždění dálkoměrného kódu v zenitovém směru jsou 15 m/50 ns přes den a 3 m/10 ns v noci
- velikost vlivu ionosféry je dána aktuální hustotou ionizovaných částic reprezentovanou celkovým počtem elektronů (**TEC**)
- hodnotu v čase proměnlivého TEC ovlivňuje:
  - aktivita slunečního záření
  - denní a sezónní cyklus
  - magnetické pole Země
- **vliv ionosféry je závislý na použité frekvenci měření**

## Jedno-frekvenční měření

- využití ionosférického modelu, korekce jsou obsaženy v navigační zprávě (v případě GPS umožňují odstranit v průměru 50 % vlivu ionosféry ve středních zeměpisných šířkách)
- při post-processingu je možné využít tzv. ionosférických map generovaných lokálními či globálními ionosférickými modely (obvykle vyšší kvalita než ionosférický model v navigační zprávě)
- ionosférické mapy poskytují hodnoty TEC pro určitou oblast a časový interval

## Dvou-frekvenční měření

- vliv ionosféry 1. řádu (až 99,9 % celkového vlivu) lze eliminovat použitím **lineární kombinace signálů na dvou frekvencích**, tzv. ionosphere-free linear combination:

$$R_c = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} * (f_1^2 * R_1 - f_2^2 * R_2)$$

- kde:

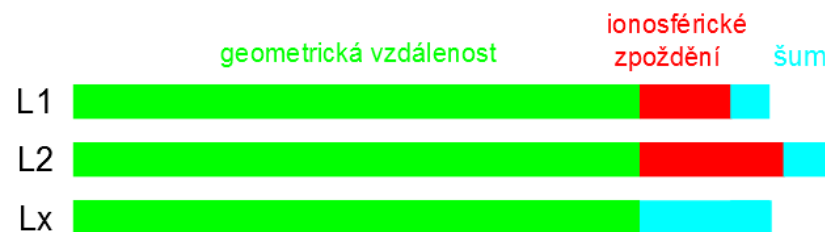
$R_i$  = dálkoměrné měření na frekvenci  $i$

$f_i$  = frekvence signálu

Příklad pro signály L1+L2 systému GPS:

$$R_c = 2.546 * R_1 - 1.984 * R_2$$

- velmi hojně používaná při post-processingu i RT měření
- nevýhoda = výrazný nárůst šumu měření oproti originálním observacím



# Vlivy na straně přijímače a jeho okolí

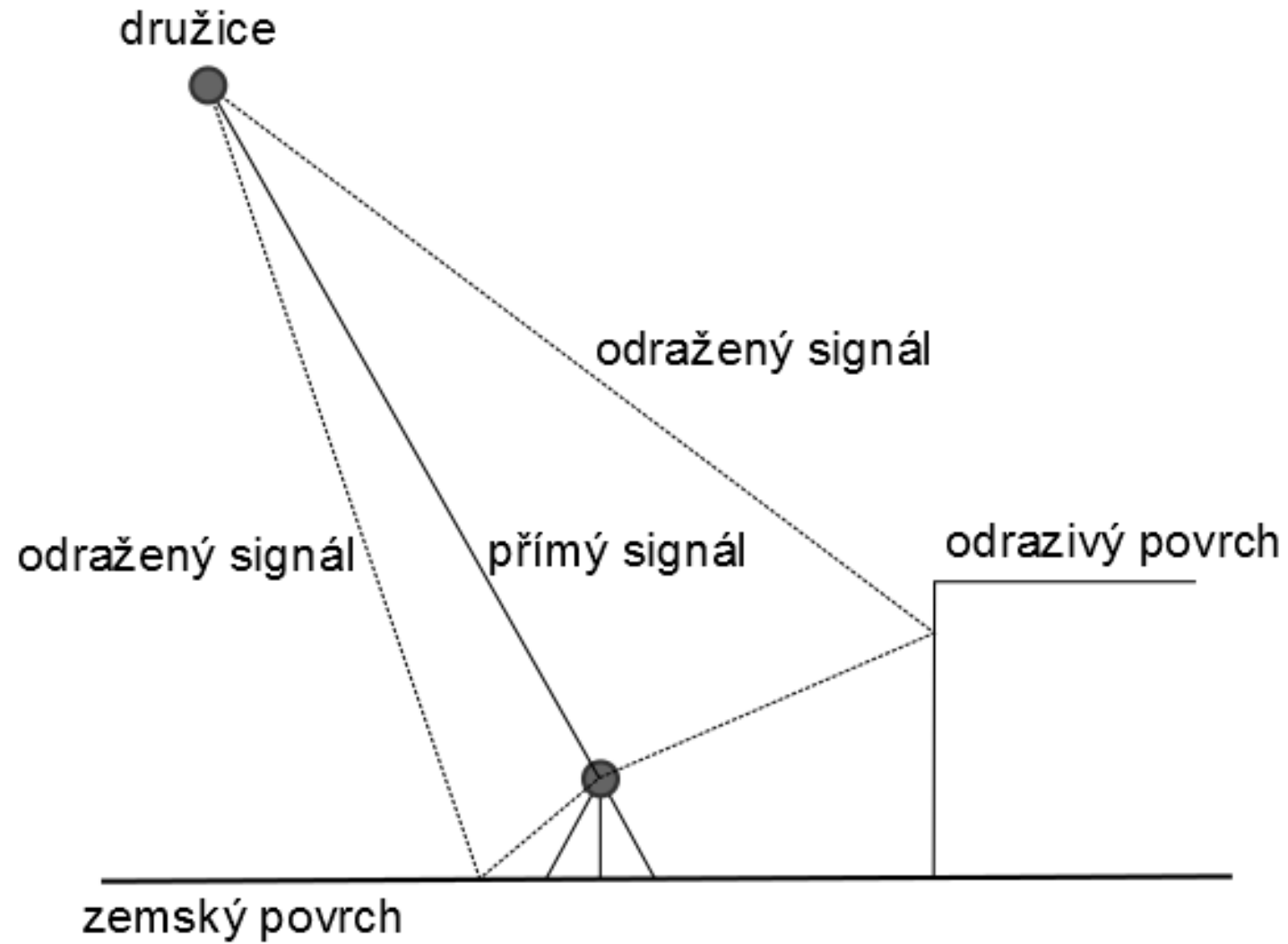
- Chyba hodin přijímače
- Vícenásobné šíření signálu (multipath)
- Fázová centra antény přijímače
- Šum, hardwarová zpoždění

# Chyba hodin přijímače

- chyba hodin přijímače = aktuální rozdíl mezi časem přijímače a systémovým časem, je v čase velice proměnlivá
- přesnost hodin přijímačů je výrazně nižší než přesnost hodin na družicích, chyba hodin přijímače vede k nepřesnému určení pseudo-vzdálenosti
- **určení chyby hodin přijímače je součástí výpočtu polohy přijímače** (kvůli ní potřebujeme pro určení 3d polohy přijímat signály ze 4 družic, i když by geometricky stačily pro vyřešení úlohy družice 3)
- chyba hodin přijímače je zcela eliminována při použití dvojité diferencované observací (diference měření ke dvěma družicím ze dvou přijímačů), případně při využití jednoduchých diferencí při měření ke dvěma družicím z jednoho přijímače

- Způsobeno odrazy signálu od objektů v okolí přijímače (kovové či skleněné plochy, silnice, vodní plochy, zeleň, ...)
- přijímač pak přijímá:
  1. přímý + odražený signál
  2. nebo pouze odražený signál (pokud dojde k zastínění přímého signálu)
- tato situace vede ke špatnému určení pseudo-vzdálenosti mezi přijímačem a družicí (případně k zamezení získání navigační zprávy)
- hodnoty multipath mohou dosahovat 10–20 m u kódových měření (při extrémních situacích až 100 m), u fázových měření se řádově pohybují na úrovni mm až prvních cm
- multipath zatěžuje zejména měření na nízkých elevačních úhlech

# Vícenásobné šíření signálu (multipath)

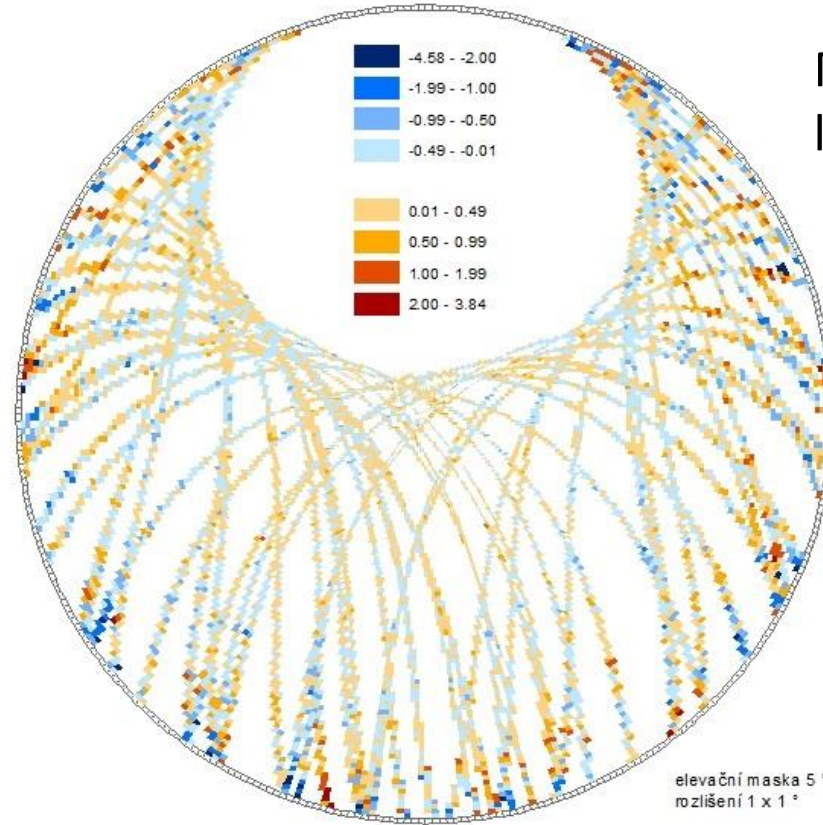




# Možnosti eliminace multipath

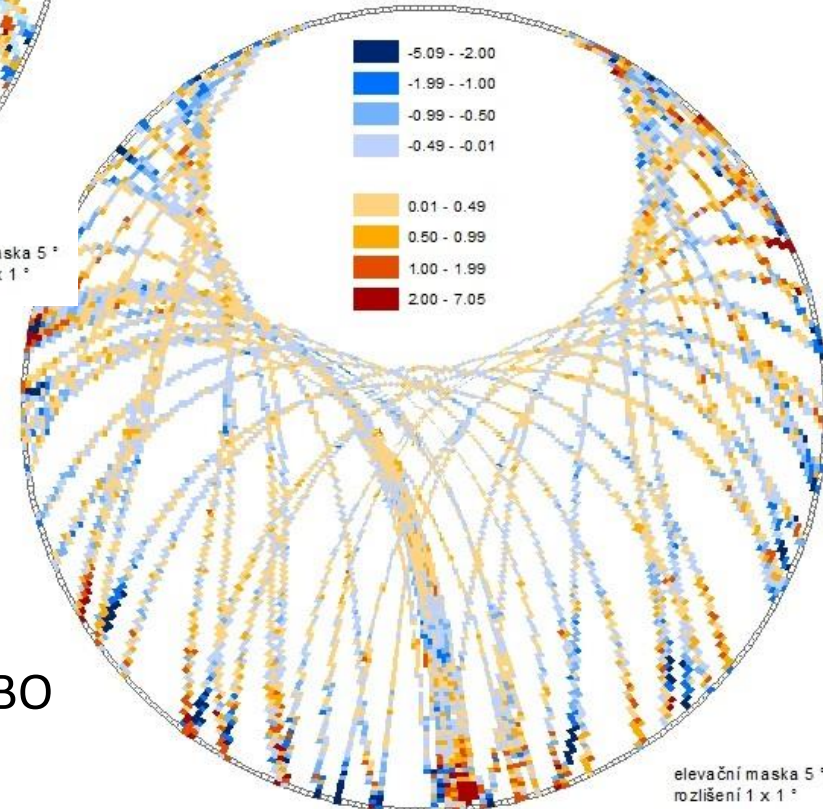
- vhodným výběrem místa měření (multipath je problém zejména v městském prostředí a pod vegetačním krytem)
- konstrukcí antény (nejnáchylnější jsou jednoduché patch antény, možnost využití tzv. ground plane pod anténou pro odclonění signálů přicházejících zespod)
- kontrolními mechanismy v přijímači (pokud je zpoždění signálu vlivem multipath velké, přijímač je schopný jej snadno odhalit a opravit, problémy však způsobují zejména krátká zpoždění v řádech desítek až stovek nanosekund, které není možné odhalit)
- pokročilé: snahou o kvantifikování multipath na základě provedených dlouhodobějších měření a jeho eliminací při zpracování (v případě referenčních stanic je multipath spojen s aktuální konstelací družic – vždy když přijímač přijme signál z určitého azimutu / elevace, bude se hodnota multipath prakticky opakovat, pokud zdrojem multipath bude konstantní zdroj)

Multipath GPS L1 [cm] pro stanici VSBO  
vypočtený z post-fit residuí za období 18. - 28. 1. 2011



## Multipath na stanici VSBO leden 2011

Multipath GPS L1 [cm] pro stanici VSBO  
vypočtený z post-fit residuí za období 17. - 27. 10. 2011



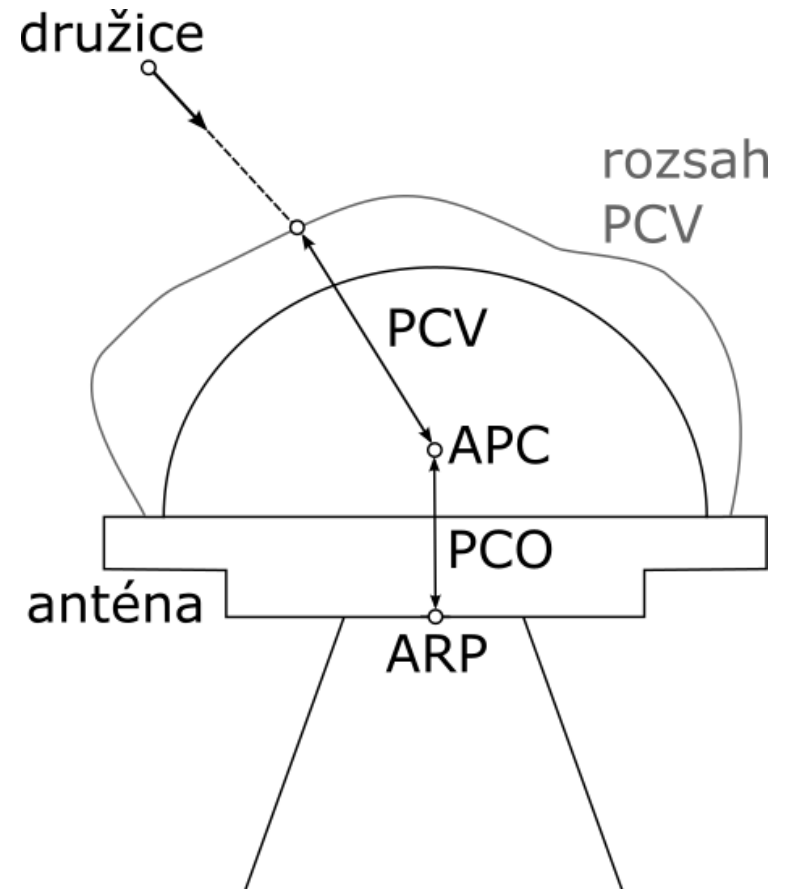
## Multipath na stanici VSBO říjen 2011

elevační maska 5°  
rozdílení 1 x 1°

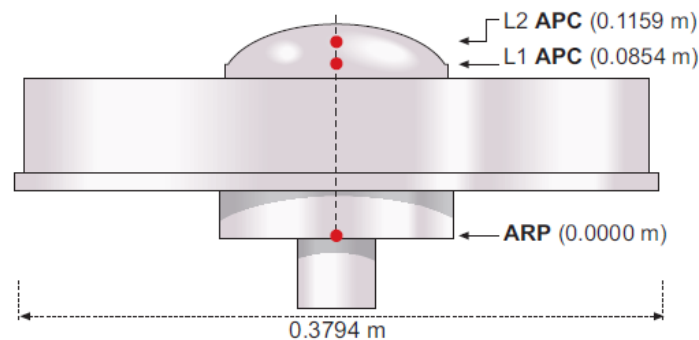
elevační maska 5°  
rozdílení 1 x 1°

# Fázová centra antén přijímačů

- Místo příjmu signálu anténou **není stabilní** = je závislé na frekvenci a směru signálu (azimut + elevace)
- z toho důvodu využíváme **referenční bod antény ARP** (Antenna Reference Point) a vyjadřujeme vzájemnou vzdálenost ARP a „průměrného“ fázového centra přijímače **APC** (Antenna Phase Center), kterou označujeme jako ofset fázového centra antény **PCO** (Phase Center Offset) – ve směru North, East, Up
- variace fázového centra antény přijímače **PCV** (Phase Center Variation) = rozdíl mezi APC a skutečným fázovým centrem aktuální observace



- Celková variace fázového centra pro určitou observaci je dána součtem  $PCO$  pro danou frekvenci signálu a  $PCV$ , které je platné pro kombinaci azimutu a elevace observace
- ofset  $PCO$  je obvykle uveden v dokumentaci přijímače, pro každou frekvenci zvlášť
- velikost  $PCV$  pro určitý azimut/elevaci je systematická, může dosahovat 1-2 cm horizontálně a až 10 cm vertikálně, je možné ji stanovit speciálním testovacím měřením
- zahrnutí variací fázového centra antény přijímače do zpracování GNSS měření je možné pomocí souborů typu *ANTEX*
- tyto soubory jsou výstupem kalibračních modelů fázových center pro konkrétní model antény přijímače (a obsahují také korekce fázových center antén družic)



Zdroj: Subinara et al. (2013)

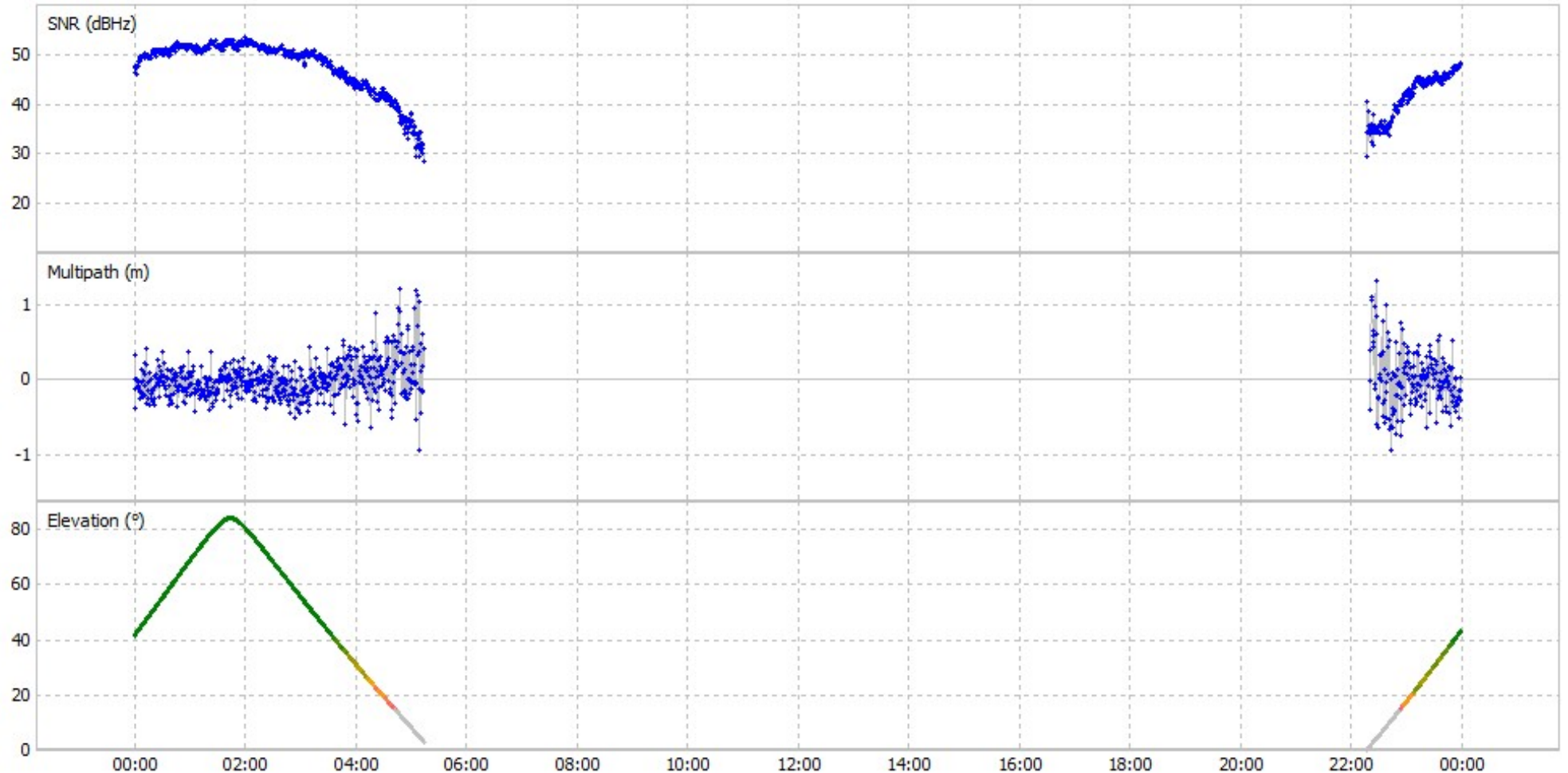
- Šum měření má podobu bílého šumu, pro vyhlazení šumu kódových měření je možné použít low-pass filtr
- přesnost kódových i fázových měření z pohledu vlivu šumu je přibližně 1 % vlnové délky, což představuje:
  - C/A kód = 3 m (po vyhlazení okolo 50 cm)
  - P kód = 60 cm
  - Fázové měření L1, L2 = několik mm
- úroveň šumu je odvislá od síly signálu, která primárně závisí na elevačním úhlu observace
- používaným indikátorem je **poměr síly signálu k síle šumu = S/N** (Signal to Noise Ratio)
- observační RINEX soubory obsahují pro každé měření originální hodnotu S/N v dB-Hz, nebo zjednodušenou hodnotu vyjádřenou na stupnici 1 – 9 (1 = signál minimální síly, 5 = zlomová hodnota pro kvalitní signál, 9 = signál maximální síly)

- Ilustrace pro: GNSS referenční stanice GOPE, 14. 7. 2023, družice GPS 12, frekvence L1

*SNR (poměr  
síly signálu k  
síle šumu)*

*Odhadnutý  
multipath  
kódových  
měření*

*Elevační úhel  
družice*



# Hardwarová zpoždění

- vlivem antény, kabeláže mezi anténou a přijímačem a částí přijímače předzpracovávajícího signál
- velikosti těchto zpoždění jsou minimální
- při zpracování signálů prakticky tvoří součást chyby hodin přijímače
- problematické se však stávají při kombinovaném zpracování signálů z více GNSS systémů najednou, kdy bývají mezi systémy rozdíly (možnost jejich určování jako neznámých parametrů)

- Dach, R. et al. *Bernese GNSS Software, Version 5.2*. AIUB, Switzerland, 2015.
- Hofmann-Wellenhof, B. et al. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems*, Springer, 2008.
- Li, W., Kačmařík, M. *Assesment of multi-GNSS precise orbit and clock products from different analysis centers based on Precise Point Positioning*. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 18, 3, doi:10.13168/AGG.2021.0027, 2021.
- Subinara, J.S. et al. *GNSS Data Processing, Volume 1: Fundamentals and Algorithms*. European Space Agency, ESA TM-23/1, 2013.
- Teunissen, P. J.G., Montenbruck, O. (ed.). *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Springer, 2017.
- <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>
- [ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/0000\\_CODE.ACN](ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/0000_CODE.ACN)



## Děkuji za pozornost

Michal Kačmařík,  
e-mail: [michal.kacmarik@vsb.cz](mailto:michal.kacmarik@vsb.cz)  
<https://www.hgf.vsb.cz/548/cs/>



Financováno  
Evropskou unií  
NextGenerationEU



Národní  
plán  
obnovy

MSMT  
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY