

POKROČILÉ METODY LOKALIZACE A NAVIGACE

01 ÚVOD

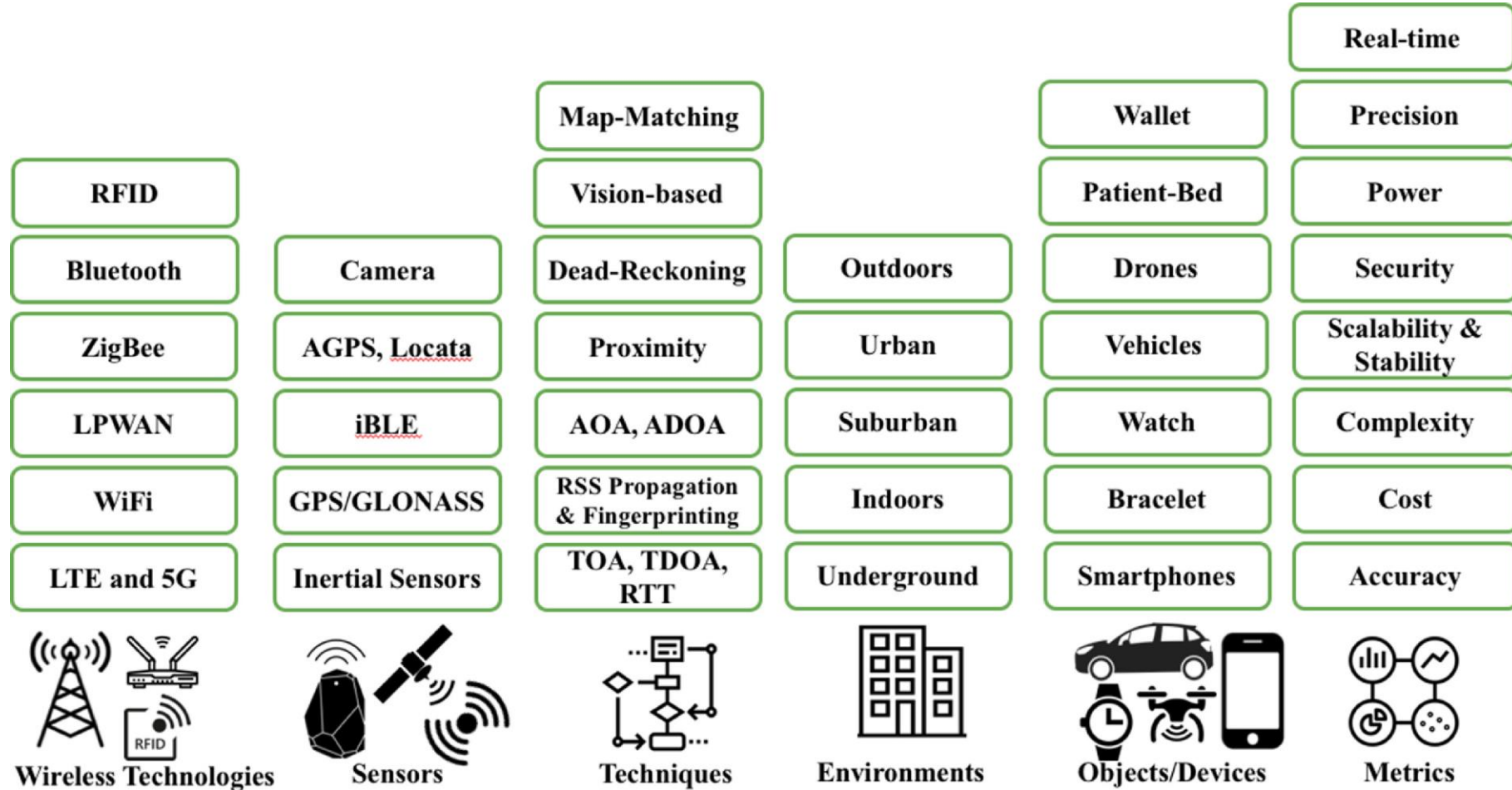
doc. Ing. Michal Kačmařík, Ph.D.

Úkoly

- 1. Vyjmenujte alespoň 10 aktivit lidské činnosti, které se neobejdou bez určování polohy v prostoru (lokalizace).*
- 2. Uveďte jaké technologie pro lokalizaci jsou při nich využívány.*
- 3. Uveďte v jakých prostředích jsou realizovány.*
- 4. Uveďte jaká přesnost určení polohy je při nich standardně potřeba.*

- Globální navigační družicové systémy (GNSS)
- Inerciální navigační systémy (Inertial Navigation System, INS)
- Vizuální lokalizace a navigace (kamery)
- Bezdrátové technologie (sítě mobilních operátorů, Wi-Fi, Bluetooth, UWB, RFID, Loran, ...)
- Odometrie, LiDAR

Problematika lokalizace a navigace



- GNSS – Globální navigační družicový systém (Global Navigation Satellite System)
- slouží k určení 3d polohy, času a rychlosti pohybu přijímače na zemském povrchu a v jeho přilehlém okolí
- v provozu 365/7/24
- pasivní dálkoměrný systém

Globální navigační družicové systémy

Název	Země	Správa	Rok dosažení FOC*
GPS	USA	vojenská	1995
GLONASS	Rusko	vojenská	1995
Galileo	EU	civilní	~2022 (IOC 6/2017)
BeiDou	Čína	vojenská	2021

*FOC: full operational capability (plná operační způsobilost)



- Studijní materiály k předmětu *Globální navigační a polohové systémy*, bakalářský stupeň
- Dostupné na: https://geoinformatika-1.vsb.cz/gnss/gnss_prednasky.html
- Zejména témata:
 - [2, Principy určování polohy metodou GNSS](#)
 - [3, Komponenty obecné architektury GNSS](#)
 - [8, Zpřesňování polohy a času určených metodou GNSS](#)
 - [9, Formáty a komunikační protokoly](#)

Důvody pro pokročilá zpracování GNSS měření

- Za účelem zvýšení dosažené kvality výsledků
- u GNSS měření nejčastěji pro dosažení vyšší přesnosti určení polohy místa měření = souřadnic
- další důvody:
 - monitorování změn souřadnic místa měření v čase (zemětřesení, dlouhodobé změny vlivem pohybu kontinentů, ...)
 - výpočet parametrů troposféry, ionosféry = kvantifikace vlivu atmosféry na GNSS měření a využití této znalosti pro další účel
 - stanovení přesných efemerid družic, korekcí hodin na družicích apod.
 - zpracování statistik o kvalitě provedených měření

Pokročilá zpracování GNSS měření z pohledu času

- Existují dvě základní varianty:
 - **post-processing (PP)** = opětovné zpracování dat uskutečněné až po jejich sběru (hodinu, den, rok, ... po měření)
 - **real-time (RT)** = přesná měření některou z technik prováděná přímo v reálném čase = ihned získáváme přesné souřadnice či jiné produkty
- u některých aplikací je běžná také varianta **near real-time (NRT)**, kdy (v pravidelném intervalu) provádíme post-processing, ale vždy co nejdříve je to možné (obvykle do několika desítek minut od observací – limitujícím faktorem je typicky rychlost získání dat z jiných přijímačů pro výpočet korekcí či síťového řešení)

1. pořízení surových observací pro zájmový bod(y) s různou délkou trvání – sekundy až desítky hodin
2. získání dodatečných dat potřebných pro zpracování surových observací vybranou technikou určování polohy (přesné efemeridy družic, korekce chyb hodin družic, data z jiných přijímačů, apod.)
3. zpracování dat vybranou technikou ve specializovaném software přímo v přijímači či na externím zařízení (RTK, PPP, síťové řešení, ...)

Obecné techniky určování polohy s GNSS

- **Autonomní**

- vyžadují jediný přijímač

- **Diferenční**

- jeden přijímač, který měří
- jeden nebo více referenčních přístrojů, které poskytují korekce

- 1 přijímač
- Nejčastěji jednoduchá technika Single Point Positioning (SPP):
 - využití kódových dálkoměrných měření na 1 frekvenci
 - využití tzv. palubních produktů = navigační zprávy vysílané samotnými družicemi (efemeridy družic, korekce chyb hodin družic, atd.)
- **možnost průměrování** = opakované změření polohy bodu a výpočet výsledné polohy průměrováním jednotlivých měření (běžně 3-10 měření s 1s intervalem)

Precise Point Positioning (PPP)

- pokročilá technika
- 1 přijímač
- využití kódových + fázových měření na 2 či 3 frekvencích (případně na 1 frekvenci)
- využití externích zdrojů dat: zejména tzv. přesné produkty s efemeridami družic a korekcemi chyb hodin družic; dále možné korekce vlivu ionosféry, slapových sil, fázových center antén přijímačů, ...
- stále častěji využívaná metoda!
- v real-time variantě běžně označovaná jako PPP-RTK

Diferenční techniky

- 1 přijímač stabilizován na bodě o známých souřadnicích, umožňuje výpočet korekcí či tvorbu diferenciovaných observací (**BASE**)
- 1 přijímač se pohybuje v terénu a slouží k určování polohy zájmových objektů (**ROVER**)
- princip = měření prováděná ve stejném čase a v relativní vzájemné blízkosti, prováděná ke stejným družicím, jsou zatížena stejnými/podobnými chybami!
- vzdálenost mezi BASE a ROVER výrazně ovlivňuje kvalitu výsledku (v případě použití fázových observací a běžných diferenčních technik by měla být < 30 km, dá se prodloužit využíváním řešení postavených nad sítí stanic, např. Network-RTK, NRTK)

Diference observací

- tvoří základ relativních diferenčních technik
- využíváme kombinace měření realizovaných k dvojicím družic či/a z dvojice přijímačů
- umožňují eliminovat řadu chyb měření
- pro kódová i fázová měření, jedno- i dvou-frekvenční
- používají se u real-time i post processing řešení

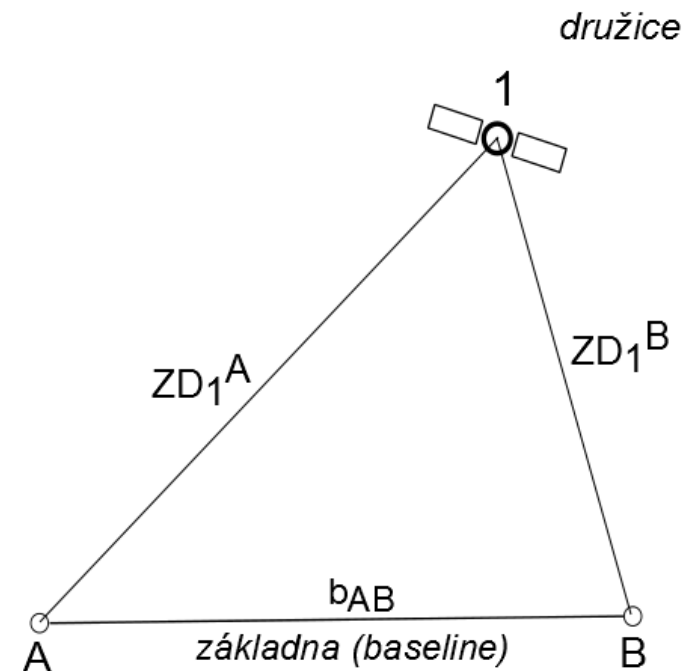
$$ZD_j^i = R - \lambda * N - \Delta_{ion} + \Delta_{trop} + \Delta_{clk_j} + \Delta_{clk_i} + \Delta_{rel} + \Delta_{noi} + \Delta_{pcv} + R$$

ZD_j^i	nediferencovaná observace (zero differenced) fázového měření mezi přijímačem i a družicí j
R	geometrická vzdálenost mezi přijímačem i a družicí j v m
λ	vlnová délka nosné vlny
N	ambiguita (celočíselný počet násobků nosné vlny)
Δ_{ion}	vliv ionosféry
Δ_{trop}	vliv troposféry
Δ_{clk_j}	chyba hodin na družici j
Δ_{clk_i}	chyba hodin přijímače i
Δ_{rel}	vliv relativistických efektů
Δ_{noi}	vliv šumu
Δ_{pcv}	chyba fázového centra přijímače
R	residuum (rozdíl mezi skutečnou a modelovanou observací)

v případě observace kódových měření pouze zaměníme $\lambda * N$ za $c * \Delta t$, kde c představuje rychlost světla a Δt dobu šíření signálu

Jednoduchá diference (single difference)

- kombinace měření ze dvou přijímačů A a B k jedné družici 1 v čase epochy $t \Rightarrow$ eliminují chybu hodin družice (je v dané epoše stejná pro jakékoliv místo měření)
- případně kombinace měření ke dvěma družicím 1 a 2 z jednoho přijímače A \Rightarrow eliminují chybu hodin přijímače
- $SD_1^{AB} = ZD_1^A - ZD_1^B$

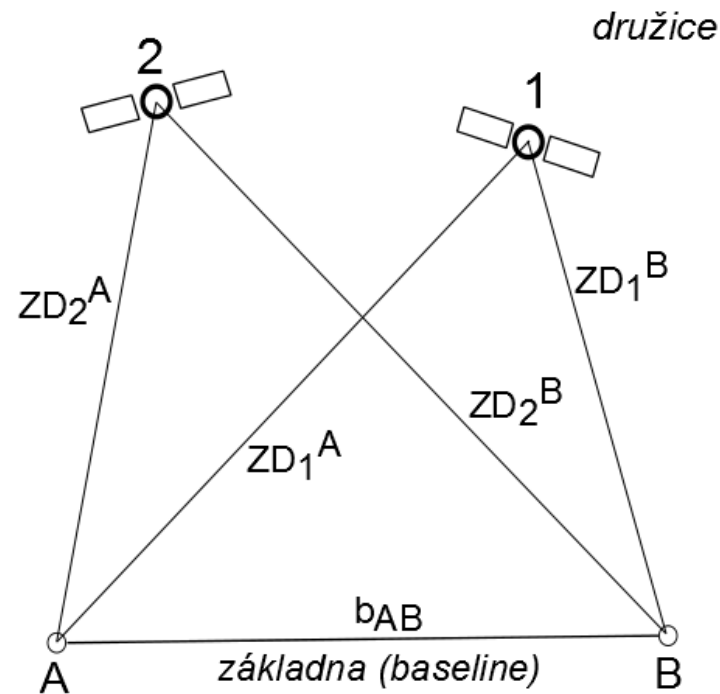


Dvojitá diference (double difference)

- kombinace měření ze dvou přijímačů A a B ke dvěma družicím 1 a 2 v čase epochy t
- eliminují chyby hodin družice, chyby hodin přijímačů
- při omezené vzdálenosti mezi přijímači z velké části eliminují vliv ionosféry
- pokud oba přijímače nejsou příliš vzdáleny, leží v obdobné nadmořské výšce a obě družice jsou observovány na obdobném elevačním úhlu, je redukována i velká část vlivu troposféry
- základní typ observací pro diferenční GNSS měření

Dvojité diference (double differences)

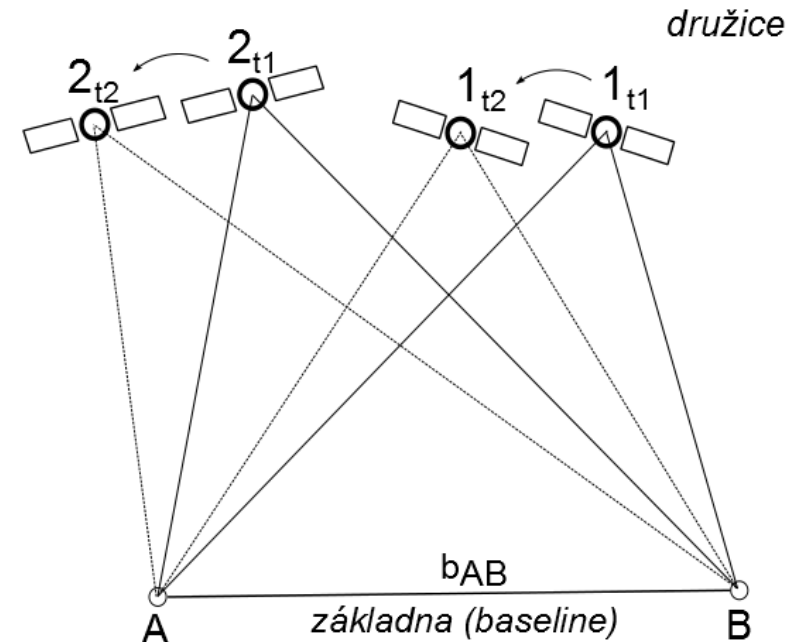
$$DD_{12}^{AB} = SD_1^{AB} - SD_2^{AB} = (ZD_1^A - ZD_1^B) - (ZD_2^A - ZD_2^B)$$



Trojité diference (triple differences)

- kombinace měření ze dvou přijímačů A a B ke dvěma družicím 1 a 2 v čase epochy t_1 a t_2
- eliminují chyby hodin družice, chyby hodin přijímačů, vliv ionosféry a troposféry (pokud předpokládáme, že se jejich vliv mezi dvěma uvažovanými epochami nezměnil) a ambiguitu (pokud mezi epochami nedojde k cycle slip)

$$TD_{12}^{AB} = (DD_{12}^{AB})^{t_1} - (DD_{12}^{AB})^{t_2}$$



Jak je realizovat z pohledu času?

- zpracováním po měření (Post-processing)
 - naměřené souřadnice zpřesňujeme až po měření
 - potřeba software pro zpracování
- v reálném čase (typicky metoda RTK)
 - naměřené souřadnice zpřesňujeme přímo v terénu při měření
 - potřeba spojení se zdrojem korekcí (mobilní internet, případně rádiová komunikace)
 - náročné na infrastrukturu

Řešení BASE

- vlastní BASE
 - dočasně stabilizovaná na známém bodě
 - neplatíme za korekce
 - náročné na vybudování
- permanentní referenční stanice
 - trvale stabilizovaná referenční stanice
 - za korekce platíme
 - v ČR aktuálně 4 komerční sítě referenčních stanic

Permanentní referenční stanice

- Trvale stabilizovaný geodetický GNSS přijímač, jehož souřadnice jsou určeny s vysokou přesností
- provádí kontinuální měření (obvykle v 1s intervalu)
- jejím primárním účelem je možnost stanovení korekcí pro diferenční metodu měření pro geodetickou komunitu
- korekce jsou poskytovány v reálném čase typicky s využitím NTRIP a surová data jsou pro post-processing ukládána ve formátu RINEX či nativním formátu výrobce přijímače

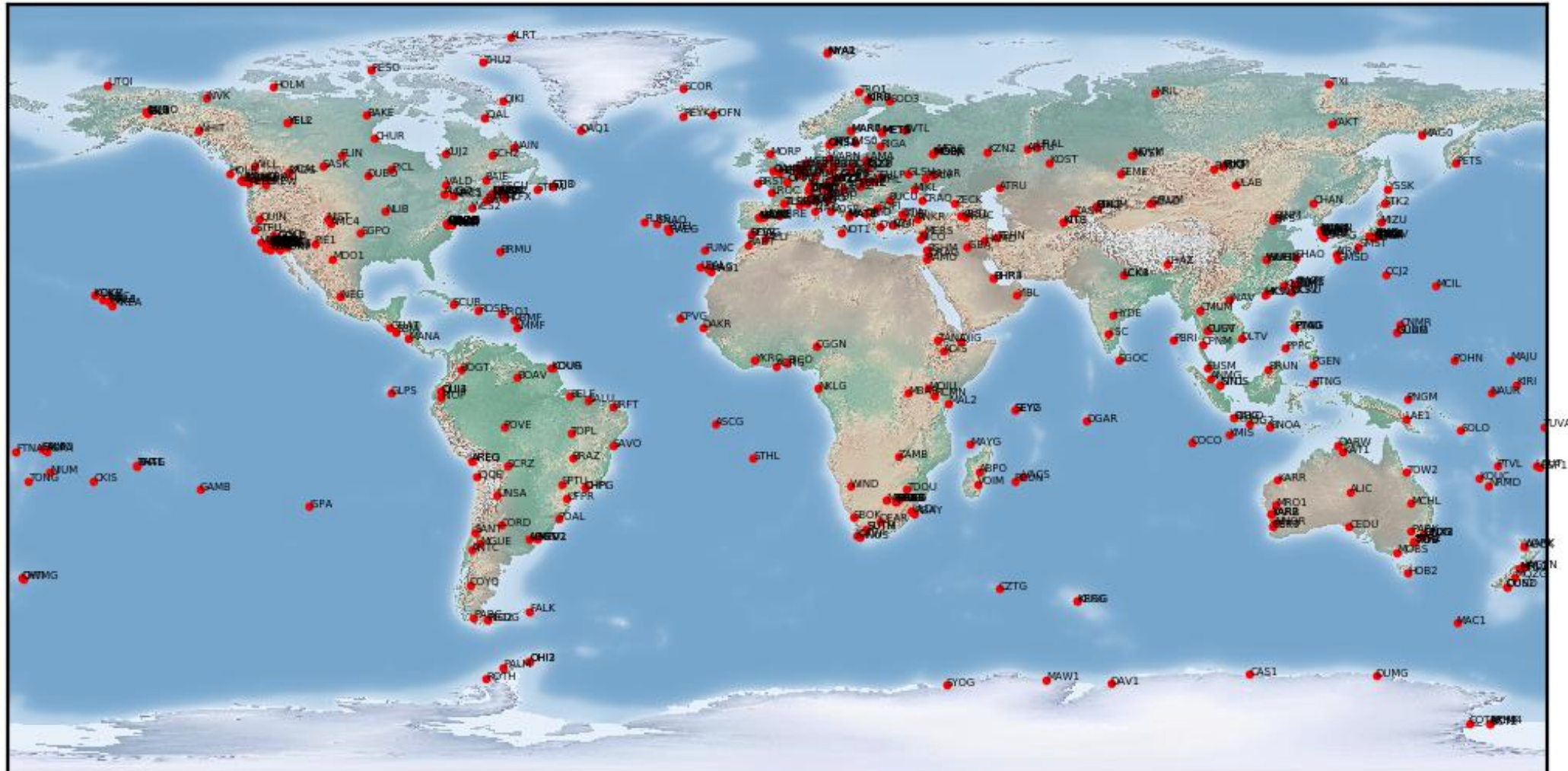
- 6 sítí referenčních stanic (> 120 stanic na území ČR):
 - **VESOG** (Výzkumná a experimentální síť pro observace s GNSS) = vědecká síť, 10 stanic, <http://oko.pecny.cz/vesog/index.html>
 - **GEONAS** (Geodynamická síť Akademie věd České republiky) = vědecká síť, cca 20 stanic, <http://www.geonas.irmsm.cas.cz/>
 - **CZEPOS** (Česká síť permanentních stanic pro určování polohy) = komerční síť provozovaná ČÚZK, 23 vlastních stanic, <http://czepos.cuzk.cz/>
 - **TopNET** = komerční síť provozovaná společností GB-geodezie, 21 vlastních stanic, <http://topnet.gb-geodezie.cz/topnet/>
 - **Trimble VRS Now Czech** = komerční síť provozovaná společností Trimble, 29 stanic, <http://geotronics.cz/produkty/gnss-korekce/o-siti/>
 - **Georbit** = komerční síť provozovaná společností Geoobchod, 31 vlastních stanic, <https://www.georbit.cz/>

- Evropská síť referenčních stanic (<https://www.epncb.oma.be/>)
- 415 aktivních stanic (červenec 2023)
- data ze stanic jsou zdarma k dispozici ve formátu RINEX (část stanic poskytuje data i v reálném čase)
- kromě observačních dat je poskytována i podpora v podobě:
 - přesných souřadnic referenčních stanic (pravidelná týdenní řešení, dlouhodobé souřadnice + velocity, každodenní monitoring stanic)
 - korekce vlivu atmosféry (pravidelná týdenní řešení)
 - korekce palubních efemerid a chyb hodin v reálném čase
 - re-processing řešení souřadnic a korekce vlivu troposféry od roku 1996

- Mezinárodní civilní asociace pro podporu GNSS měření
- tvořená desítkami přispívajících organizací (z ČR pouze VÚGTK Pecný)
- podporuje vývoj a výzkum v oblasti GNSS
- **zdarma poskytuje služby:**
 - přesné produkty (efemeridy družic, korekce chyb hodin družic a chyb hodin přijímačů sítě IGS, parametry rotace Země)
 - observační data z celosvětové sítě 516 stanic (červenec 2023)
 - přesné souřadnice referenčních stanic sítě IGS
 - korekce vlivu ionosféry, troposféry
 - korekce palubních efemerid a chyb hodin družic v reálném čase

Síť referenčních stanic IGS

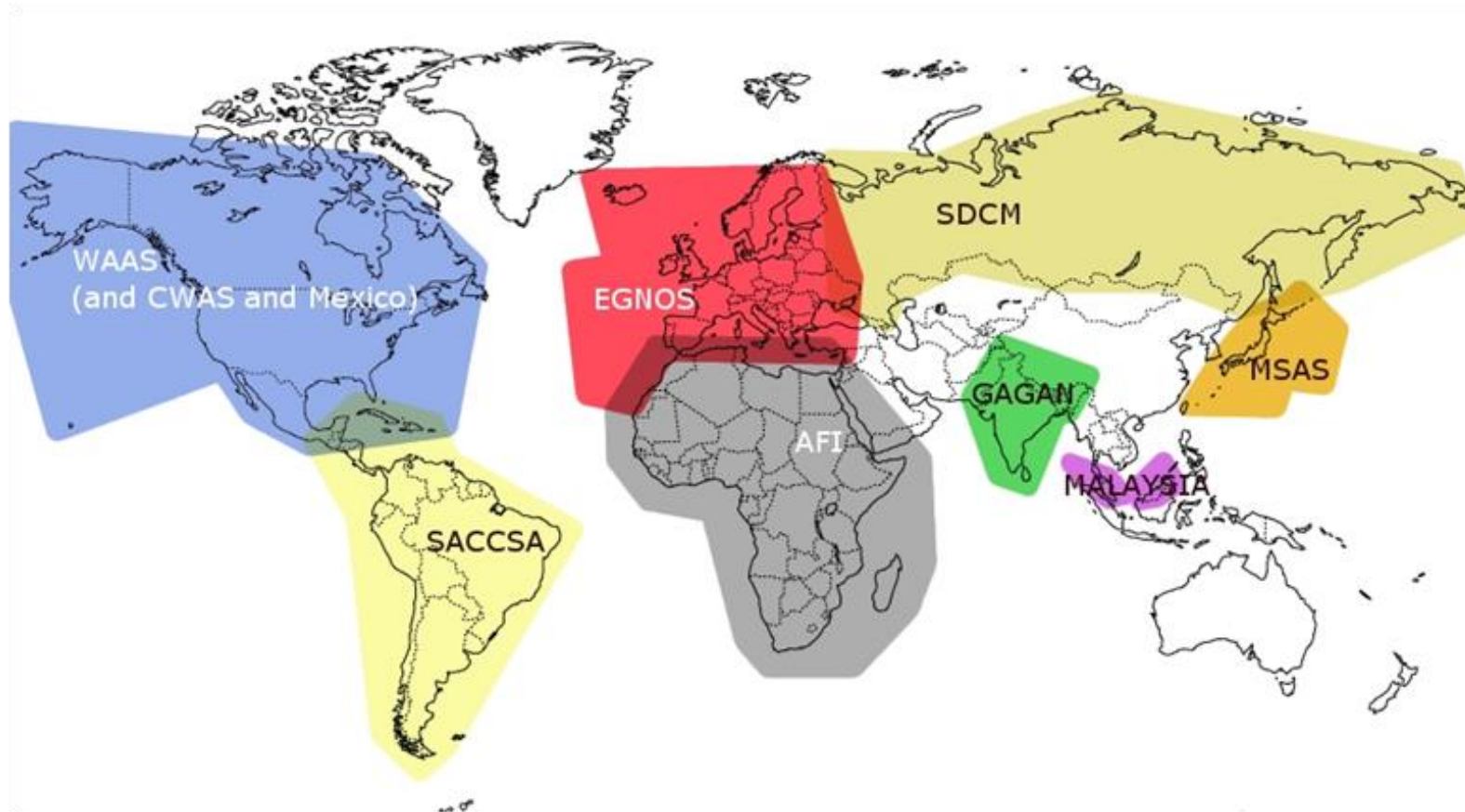
<https://network.igs.org/>



Družicové systémy pro zpřesňování polohy

- Systémy pro regionální zpřesňování určení polohy a času = **Satellite Based Augmentation Systems (SBAS)**
- princip = pozemní síť GNSS referenčních stanic slouží k výpočtu korekcí palubních produktů; korekce jsou přenášeny na geostacionární družice a následně přijímány běžnými GNSS přístroji
- SBAS umí používat velká část low-end zařízení (turistické, automobilové přijímače, mobilní zařízení, nositelná elektronika, apod.)
- přesnost určení polohy = cca 1 m

Družicové systémy pro zpřesňování polohy



V operačním provozu: WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN

Ve vývoji: SACCSA, AFI, SDCM, Malaysian SBAS, SNAS (Čína), SouthPAN (Austrálie, NZ)

Zdroj: https://gssc.esa.int/navipedia/images/8/8c/SBAS_in_the_world.png

Shrnutí technik a jejich řádově dosažitelných přesností

Technika	Standardní přesnost určení polohy	Potřeba korekcí v reálném čase
Autonomní, 1 frekv.	2 – 5 m	Ne
Autonomní, 2 frekv.	1 – 2 m	Ne
Autonomní s SBAS, 1 frekv.	≤ 1 m	Ano (regionální)
DGNSS (kódová měření), 1 frekv.	≤ 1 m	Ano (lokální)
DGNSS (fázová měření), RTK, síťové RTK, 2 frekv.	< 10 cm	Ano (lokální)
PPP post-processing, 2 frekv.	< 10 cm	Ne
PPP-RTK, 2 frekv.	< 10 cm	Ano (regionální)
Síťové řešení, post-processing, NRT, 2 frekv.	< 5 cm	Ne

*V případě techniky PPP a síťového řešení přesnost výrazně závisí na době observace

Programové prostředky pro zpracování GNSS měření

- dva hlavní typy aplikací:
 - **pro geodetickou komunitu** = primárně pro diferenční techniky (umožňují vnášet korekce do měření ROVERu a zpřesnit určení jeho polohy, pokud máme k dispozici surová data z BASE pro čas měření), některé umožňují zpracování technikou PPP či kombinované zpracování GNSS+INS dat; obvykle komerční aplikace vyvíjené výrobcí GNSS přijímačů (Topcon Magnet Office, Applanix POSPac, Novatel GrafNav, SBG Qinertia, ...)
 - **vědecké aplikace** = pro techniku Precise Point Positioning a/nebo diferenční techniky; specializované aplikace pro komplexní zpracování GNSS měření; kromě výpočtu přesných souřadnic některé umožňují výpočet parametrů atmosféry, přesných efemerid družic, apod.; aplikace komerčního charakteru vyvíjené obvykle vědecko-výzkumnými institucemi (Bernese GNSS, Gamit, Gipsy-Oasis, RTKLib, ...)

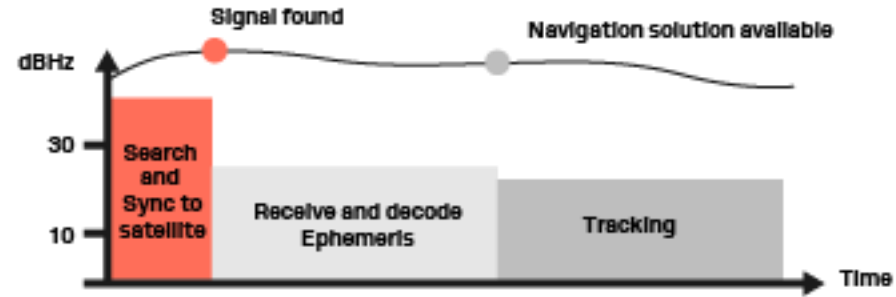
- Assisted GNSS (A-GNSS, A-GPS)
- Techniky pro zrychlení prvotního určení polohy přijímače GNSS dodáním palubních produktů z externího zdroje (internet, sítě mobilních operátorů)
 - Možnost okamžitého zahrnutí nově viditelné družice do určování polohy
- Běžně využívané standardními mobilními zařízeními
- Palubní produkty (navigační zpráva obsahující efemeridy družice, korekce chyb hodin družice, statut družice, almanach, ...) jsou nutné k výpočtu polohy přijímače
 - Jejich platnost je časově omezena (viz Prezentace 2)
 - Jejich stažení trvá nějaký čas (i několik minut)

Time to First Fix (TTFF)

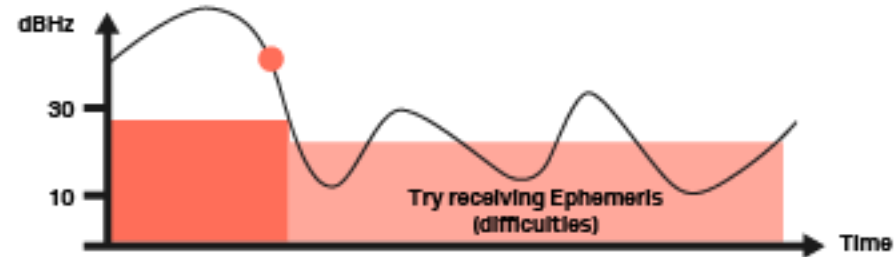
- Čas, který přijímač potřebuje od svého zapnutí do prvotního určení polohy
- Několik možností:
 - **Hot start:** přijímač byl vypnutý po krátkou dobu (cca max. 4 hodiny), v paměti má uloženu informaci o poslední poloze, čase a stále platné efemeridy družic. Prvotní určení polohy je otázka několika sekund.
 - **Warm start:** přijímač byl vypnutý delší dobu (i několik dní), v paměti má uloženu informaci o poslední poloze, přibližném čase, platný almanach, ale již nemá platné (použitelné) efemeridy družic. A-GNSS obvykle zrychlí TTFF.
 - **Cold start (Factory startup):** přijímač byl vypnutý po dlouhou dobu, nebo prošel restartem s vymazáním paměti, uvedením do továrního nastavení, apod. V paměti nemá uloženu informaci o poslední poloze, čase ani žádné palubní produkty družic. A-GNSS výrazně zrychlí TTFF.
 - za ideálních podmínek: cca 30 sekund
 - za komplikovaných podmínek: až několik minut, v nejhorším případě bez úspěchu
 - s A-GNSS: během několika sekund i za komplikovaných podmínek

Time to First Fix (TTFF)

Cold Start
Strong and stable signal



Cold Start
Poor signal



Assisted Cold Start
AssistNow data from service



Zdroj: <https://www.u-blox.com/en/technologies/agNSS-assistnow>

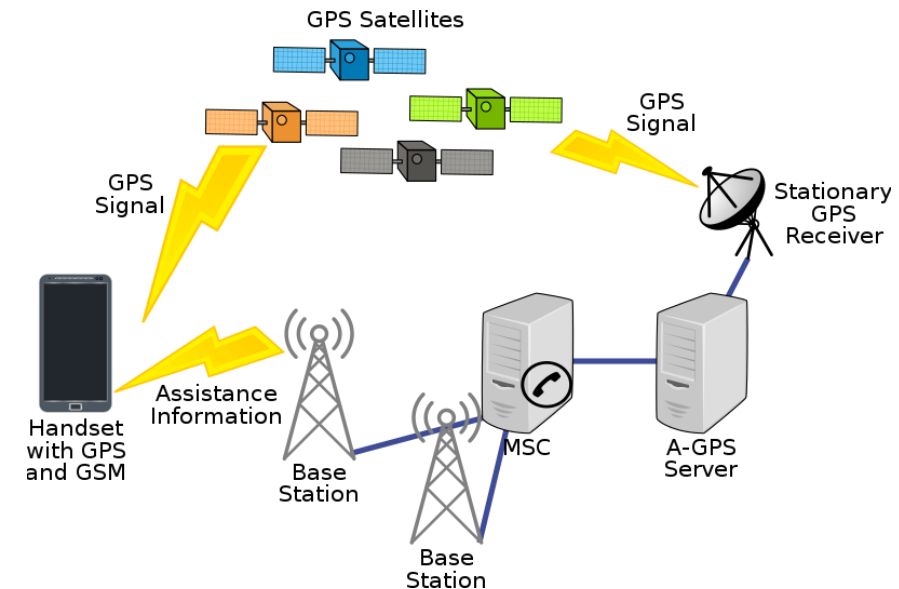
A-GNSS varianty

1. Mobile Station Based (MSB)

- mobilní zařízení si stáhne potřebná data (navigační zpráva) prostřednictvím BTS stanice mobilního operátora přístupem k A-GNSS serveru (např. supl.google.com)
- přijímač v mobilním zařízení určí polohu

2. Mobile Station Assisted (MSA)

- observační a jiná data z přijímače jsou skrz BTS stanici předána A-GNSS serveru, který sám určí polohu přijímače a sdělí mu ji
- využíváno omezeně v minulosti



Zdroj: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:A-GPS.svg>

- TTFF GNSS může být taktéž zrychleno prvotním určením polohy mobilního zařízení s využitím jiné technologie:
 - Síť BTS stanic mobilního operátora
 - Wi-Fi
 - viz *Prezentace č. 7*
- tyto technologie mohou v podmínkách obtížných pro GNSS i pomoci zpřesnit polohu určenou samotným přijímačem GNSS

- Assad, S., Maghdid, H. *A Comprehensive Review of Indoor/Outdoor Localization Solutions in IoT era: Research Challenges and Future Perspectives*. Computer Networks, 212, 2022. doi: 10.1016/j.comnet.2022.109041
- Hofmann-Wellenhof, B. et al. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems*. Springer, 2008
- Teunissen, P., J., G., Montenbruck, O., (ed.). *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Springer, 2017.

Děkuji za pozornost

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



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



Národní
plán
obnovy

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY