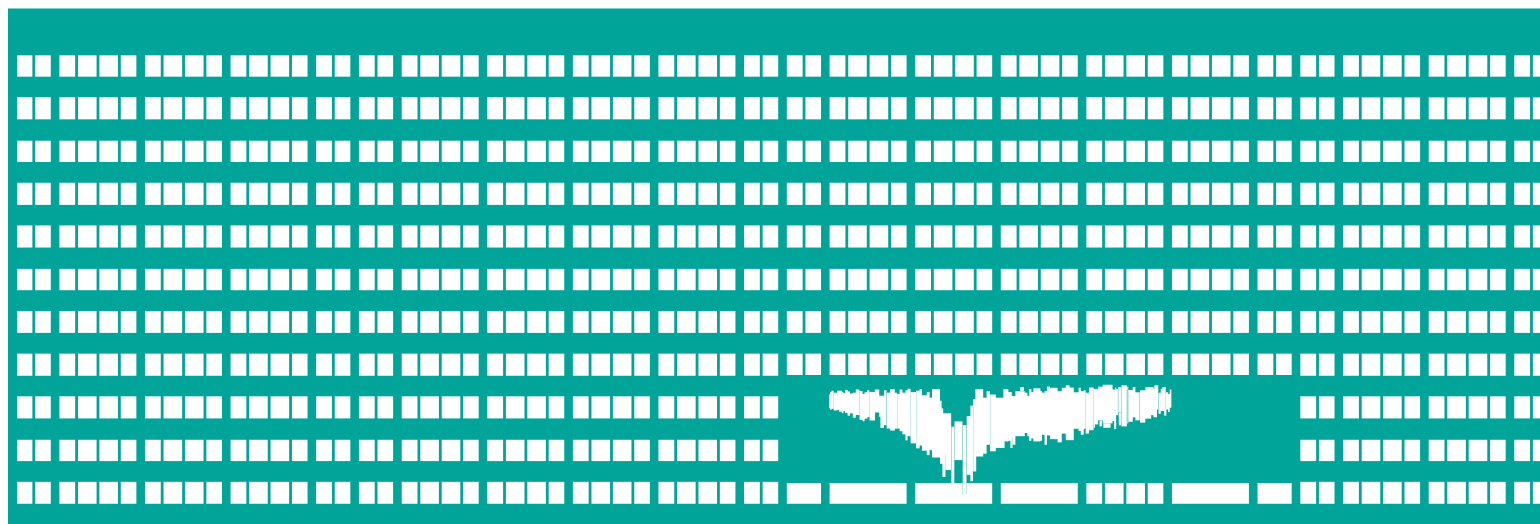


VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA

VSB TECHNICAL
UNIVERSITY
OF OSTRAVA



www.vsb.cz

Základy geoinformatiky 7

Globální navigační polohové systémy

Michal Kačmařík

A924, tel.: 5512

<http://gis.vsb.cz>

<https://gis.vsb.cz/pracoviste/lide/kacmarik/>

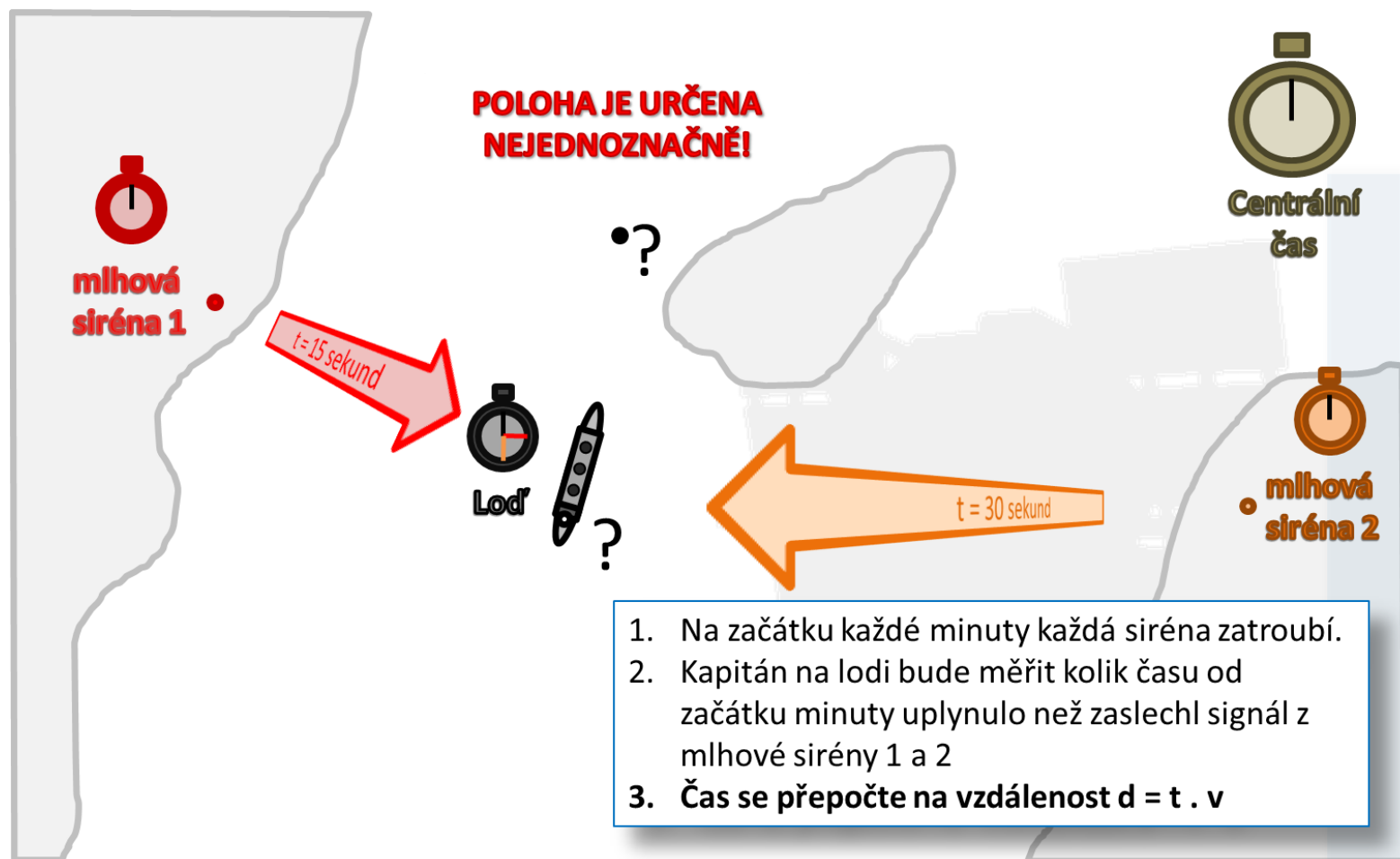
E-mail: michal.kacmarik@vsb.cz

Osnova přednášky

- Úvod
- Principy určování polohy metodou GNSS
- Segmenty GNSS
- Přehled existujících GNSS
- Metody (zpřesňování) určování polohy
- Referenční stanice GNSS

- 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
- 365/7/24
- Pasivní dálkoměrný systém

Princip určení polohy – kapitán a sirény

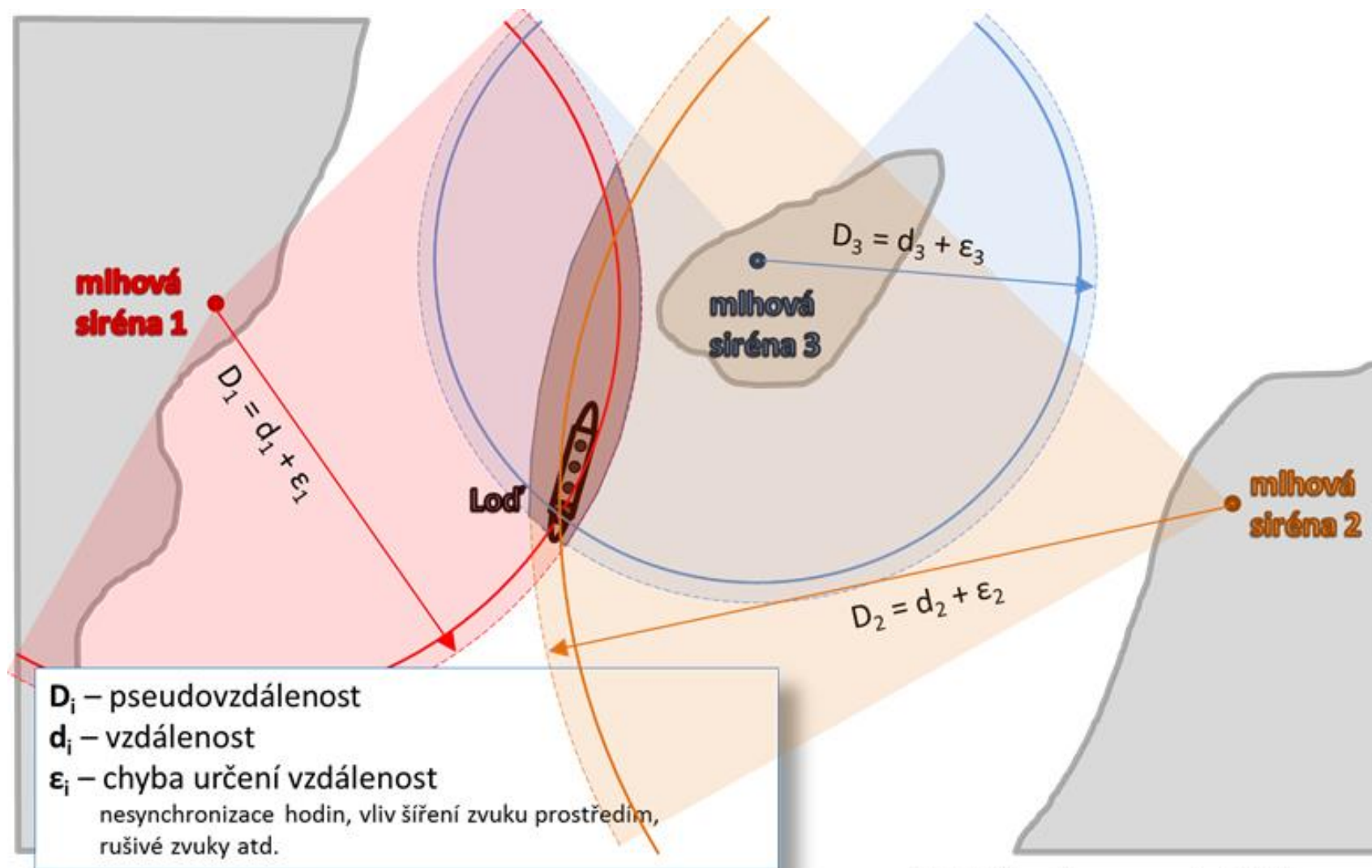


Rychlost šíření zvuku u hladiny moře a teplotě 15°C $v = 340 \text{ m.s}^{-1}$
Příklad převzatý z KAP05

Základní princip akustické lokalizace s použitím metody TOA

Zdroj: Vojtek (2014)

Princip určení polohy – kapitán a sirény



Příklad převzatý a upravený z KAP05

Zdroj: Vojtek (2014)

Co musí být splněno/známo pro lokalizaci:

1. Známa poloha mlhových sirén (**družice**)
2. Synchronní čas mezi sirénami a lodí (**družicemi a přijímačem**)
3. Čas zpoždění akustické značky od mlhové sirény (**družice**)
4. Identifikace, které siréně (**družici**) značka patřila

- **Rychlost šíření zvuku není konstantní.**
Závisí na prostředí, ve kterém se zvuk šíří.
- **Všechny čtvery hodiny nejsou synchronní.**
- **Poloha mlžných sirén je zatížená chybou.**
- **Signál nemusí dorazit po nejkratší cestě.**
Překážky v cestě signálů.
- **Zvuk nemusí být dobře slyšet.**
Rušení jinými zvuky (ozvěna, hluk motoru ...)

- Vysílačem jsou družice.
- Družice nejsou statické, přesto je jejich poloha známá s dostatečnou přesností.
- Družice vysílá rádiové signály.
- Rádiové signály jsou vysílány minimálně na dvou frekvencích.

- **Metoda kódových měření**
 - primární metoda
 - využívá tzv. PRN kód
(označován také jako dálkoměrný kód)
- **Metoda fázových měření**
 - sekundární metoda

PRN kód (dálkoměrný kód)

- PRN kód umožňuje měřit čas přijetí signálu
- **Časové značky v signálu umožní GNSS přístroji zjistit, kdy byla daná část signálu z družice vyslána**

PRN kód má i jiné funkce, například:

- *Nalezení signálů družice*
- *Identifikace družic,*
- *Dekódování obsahu signálů, atd.*

Základ kódových měření

- Přijímač z časové značky odeslání signálu družicí t_{di} a času přijetí signálu přijímačem t_p určí časové zpoždění signálu:

$$\Delta t_i = t_p - t_{di}$$

- Δt_i zahrnuje všechny vlivy nepříznivě působící na měření vzdálenosti
- Pseudovzdálenost k družici i:

$$P_i = \Delta t_i \cdot c$$

c – rychlost šíření světla (elektromagnetické vlnění)

Čas je vzdálenost

rádiové signály se šíří rychlostí světla
cca 300 000 000 m/s

Přepočty:

300 000 m/ms (10^{-3} s)

300 m/ μ s (10^{-6} s)

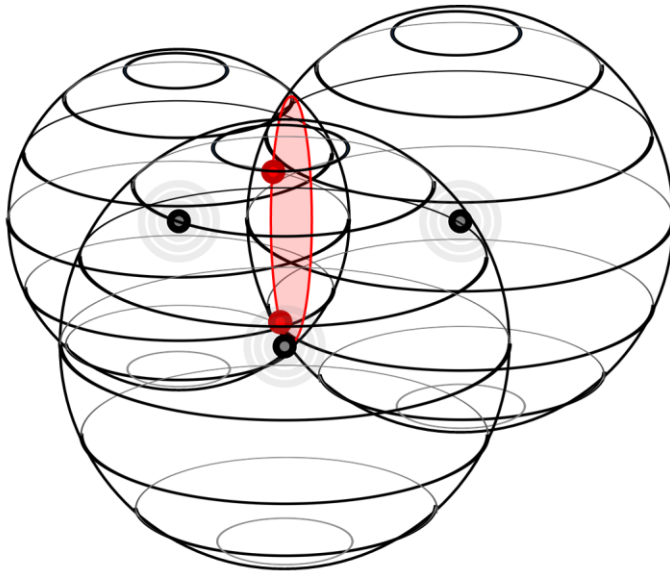
0.3 m/ns (10^{-9} s)

Přesné měření času a jeho synchronizace je klíčová!

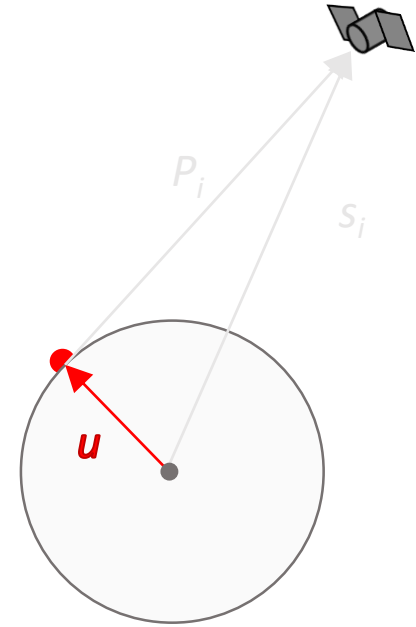
Při chybě 1/10 μ s v měření času je pseudovzdálenost určena s chybou 30 metrů!

Jednoznačná lokalizace na
zemském povrchu vyžaduje:

4 družice / 1 epocha observace



Výpočet polohy



$$P_1 = \sqrt{(x_1 - \mathbf{x}_u)^2 + (y_1 - \mathbf{y}_u)^2 + (z_1 - \mathbf{z}_u)^2} + ct_u$$

$$P_2 = \sqrt{(x_2 - \mathbf{x}_u)^2 + (y_2 - \mathbf{y}_u)^2 + (z_2 - \mathbf{z}_u)^2} + ct_u$$

$$P_3 = \sqrt{(x_3 - \mathbf{x}_u)^2 + (y_3 - \mathbf{y}_u)^2 + (z_3 - \mathbf{z}_u)^2} + ct_u$$

$$P_4 = \sqrt{(x_4 - \mathbf{x}_u)^2 + (y_4 - \mathbf{y}_u)^2 + (z_4 - \mathbf{z}_u)^2} + ct_u$$

$s_i = [x_i, y_i, z_i]$
Polohový vektor družice

$P_i = \|s_i - \mathbf{u}\| + ct_u$
Pseudovzdálenost přijímač – družice

$\mathbf{u} = [x_u, y_u, z_u]$
Polohový vektor přijímače

t_u
Chyba hodin přijímače

Přednosti a nedostatky kódových měření

Nevýhody

- Méně přesné ve srovnání s metodou fázových měření
- I po odstranění nepříznivých vlivů měření zůstává relativně velká chyba způsobená PRN kódem

Výhody

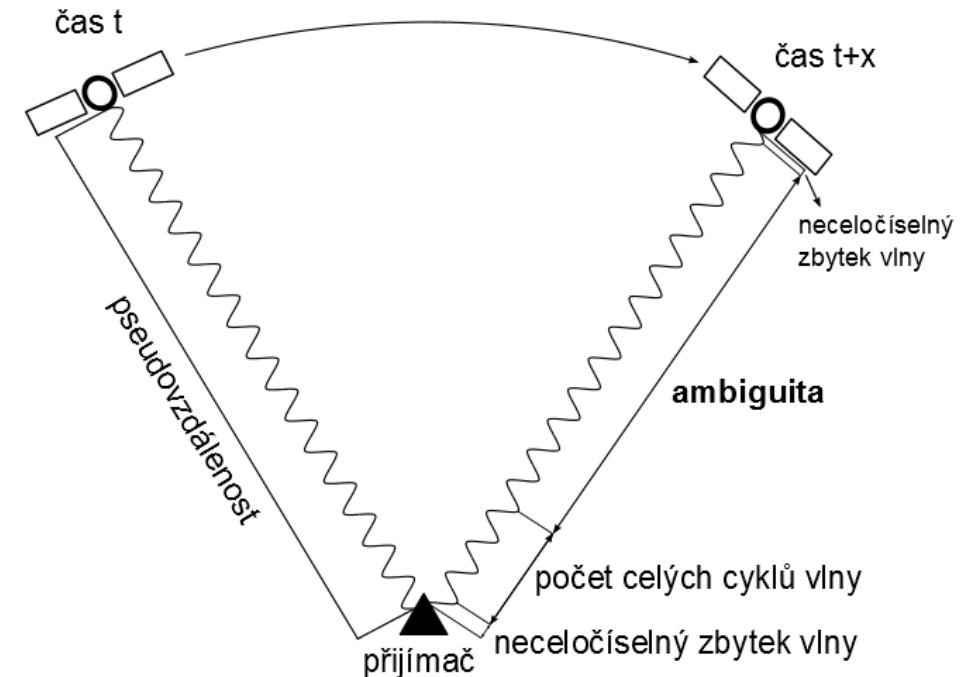
- Rychlé získání polohy
- Odolnější proti rušivým vlivům prostředí
- Po ztrátě signálů a jeho opětovném nalezení rychlé opětovné získání polohy
- Podporují je všechny GNSS přístroje
- Měření jediným přístrojem

Metoda fázových měření

- Základní měrnou jednotkou vzdálenosti je **1 vlnová délka nosné vlny**
- Délka v řádu prvních 10-tek centimetrů

Měří se **dvě komponenty** vzdálenosti:

- Desetinný zbytek základní vlnové délky, který při měření vzniká. **Snadné**
- **Celočíselný počet N vlnových délek, tzv. ambiguity. Obtížné**
- Umožňuje dosahovat **centimetrové** úrovně přesnosti určení polohy



Přehled vybraných vlivů na měření GNSS

- Použitý přijímač a metoda určování polohy
- Geometrické uspořádání viditelných družic
- Chyba hodin družic
- Chyba hodin přijímače
- Chyby v určení polohy družic
- Atmosféra Země (troposféra, ionosféra)
- Vícecestné šíření signálu (multipath)

- pro určování polohy přijímače GNSS je nezbytné znát přesnou polohu vysílající družice v době odeslání dálkoměrného kódu
- ta se počítá na základě parametrů její oběžné dráhy, které sama družice vysílá v tzv. **navigační zprávě**
- na základě údajů získaných z navigační zprávy můžeme určit:
 - přesný čas odeslání přijaté sekvence dálkoměrného kódu
 - přesnou polohu družice
 - korekci chyby hodin družice
 - přibližnou korekci vlivu ionosféry na měření
 - přibližnou polohu všech družic systému (tzv. almanach)

Kosmický segment

- družice na oběžných drahách
- vysílající signály

Řídicí segment (pozemní)

- infrastruktura pro
 - řízení kosmického segmentu
 - poskytování služeb uživatelskému segmentu

Uživatelský segment

- uživatelé vybavení zařízením pro příjem signálů družic
- autorizovaní x neautorizovaní (typicky armáda x civilisté)

Konstelace družic systému GPS



Označení:

24+3

Družic:

max. 36 (v 2/2025 31 družic)

Orbitálních rovin:

6 (označení A, B, C, D, E, F)

Sloty v orbitě:

4+2 (záloha)

Rozestup:

60°

Sklon orbity:

55°

Tvar orbity:

eliptická (**téměř kruhová**)

Typ / výška orbity:

MEO / **20 200 km**

Oběžná doba:

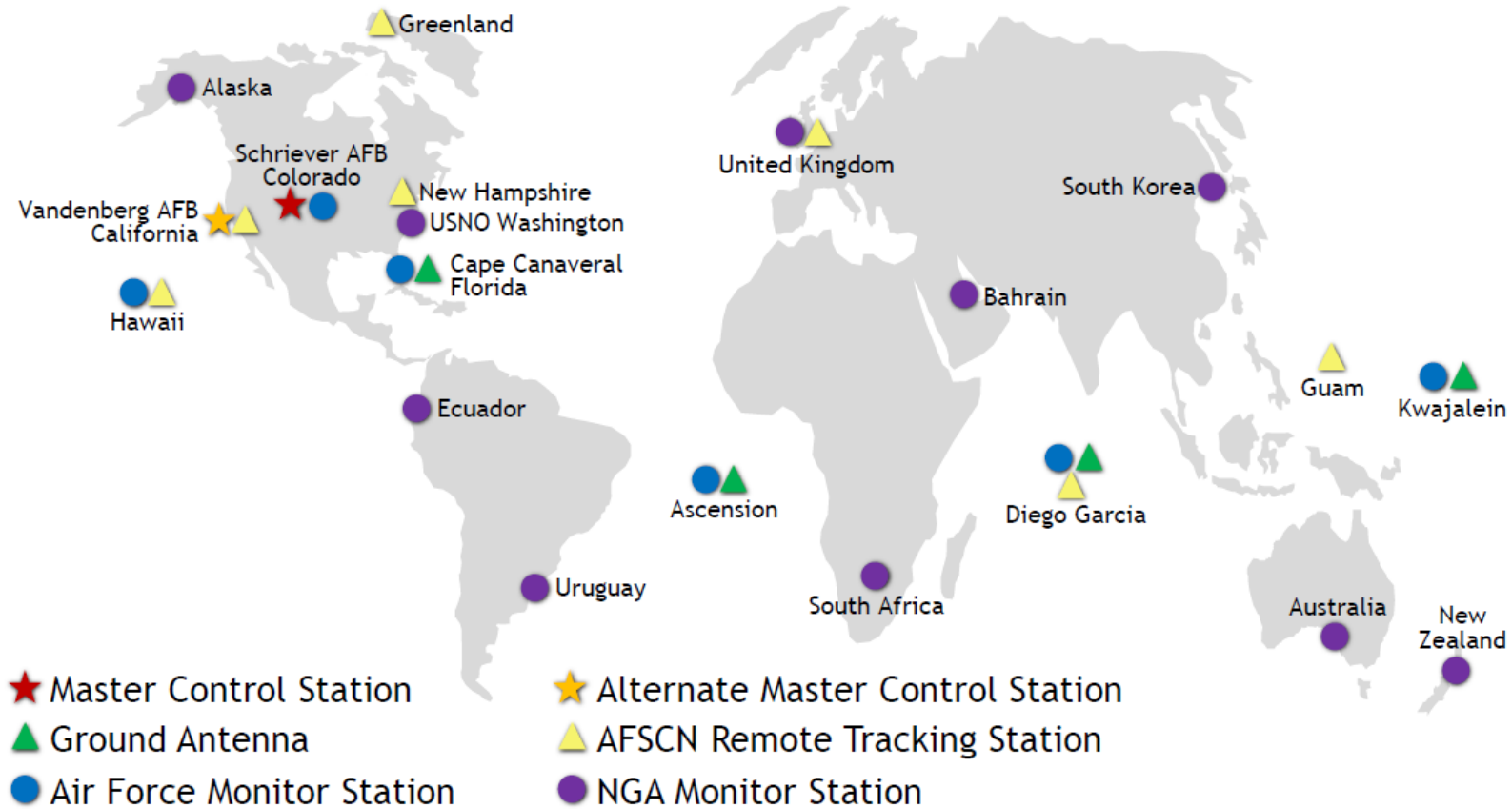
cca 11 hodin 58 minut

Aktivní bloky družic:

6 x IIR, 7 x IIR-M,
11 x IIF, 7 x III-A (2/2025)

Stanice řídicího segmentu systému GPS

GPS Control Segment



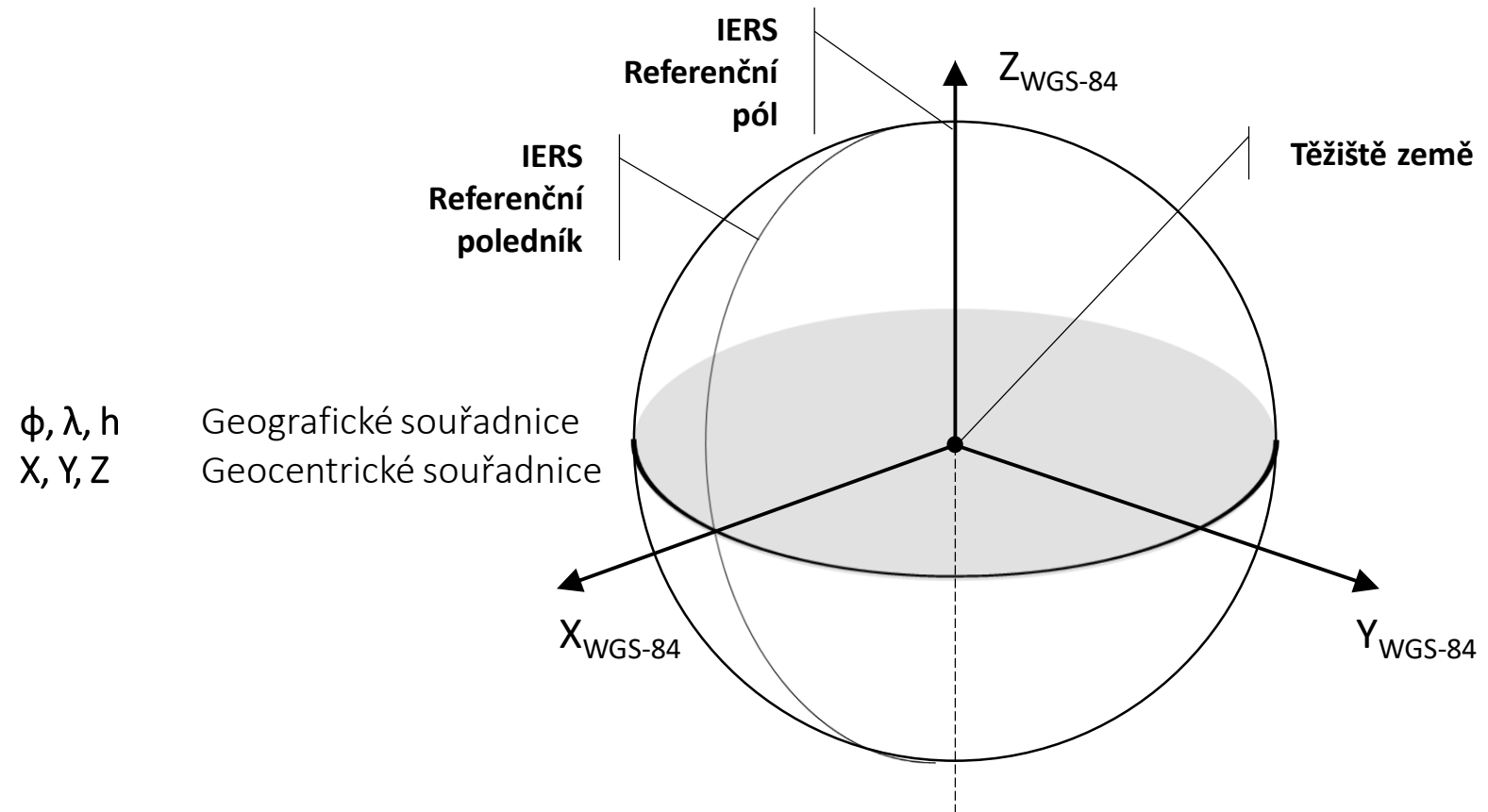
Přehled existujících GNSS

Název	Stát	Primární účel	Rok dosažení plné konstelace
GPS	USA	vojenský	1995
GLONASS	Rusko	vojenský	1995
Galileo	EU	civilní	~2025 (IOC 6/2017)
BeiDou	Čína	vojenský	2020



Navstar GPS

- Stále „základní stavební kámen“ družicové lokalizace a navigace
- Souřadnicový systém WGS-84

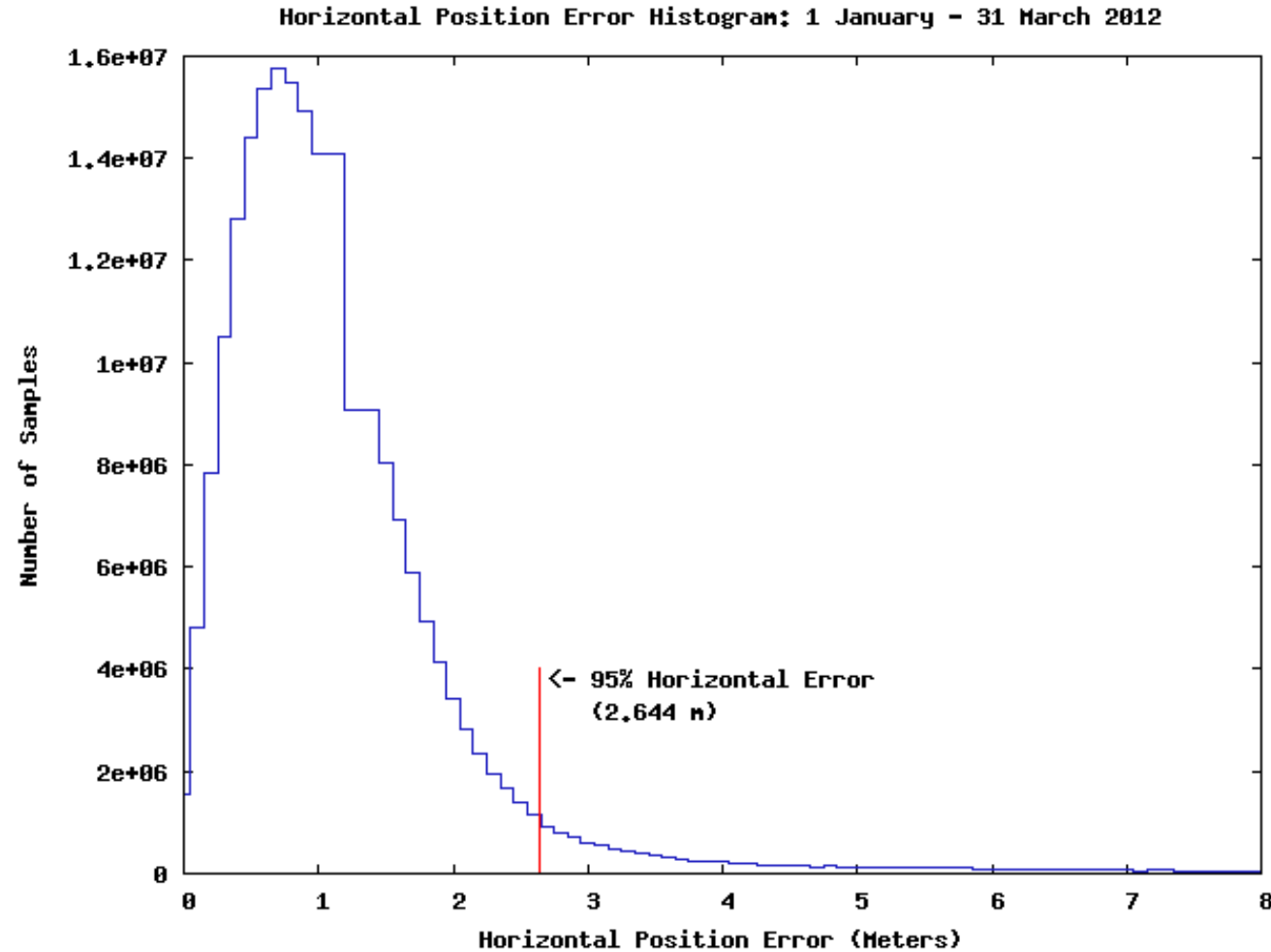


Požadovaná přesnost systému GPS

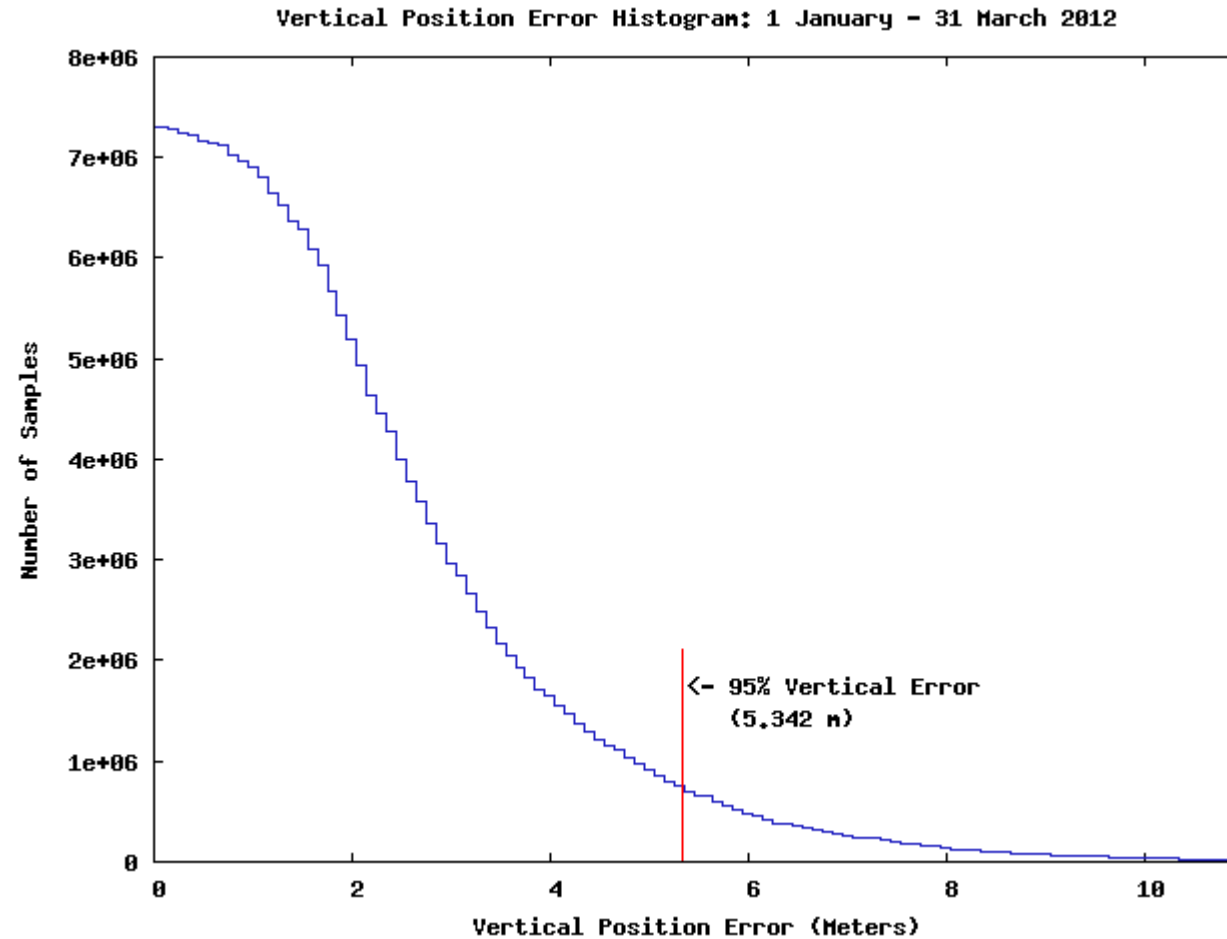
- stanovena ve federálním radionavigačním plánu
- dvě úrovně:
 - standardní poloho služba (SPS)
 - přesná polohová služba (PPS)

- Mohou ji používat civilisté
- Požadavky na přesnost jsou definovány takto (pro pravděpodobnost 95 %; definice z roku 2001, tj. po odstavení SA):
 - horizontální přesnost do 13 metrů
 - vertikální přesnost do 22 metrů
 - přesnost času do 40 nanosekund

Global Horizontal Error Histogram



Global Vertical Error Histogram

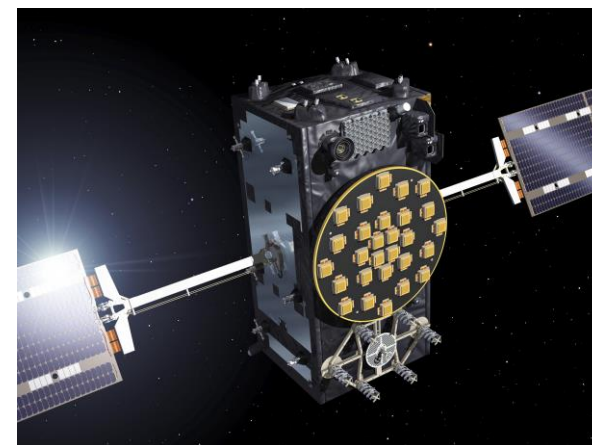


- Kosmický segment

- 24+6 družic na střední oběžné dráze (v říjnu 2025: 27 aktivních, 4 mimo provoz)
- výška orbity 23 222 km
- družice vysílají signály na 4 frekvencích

- Poskytované služby

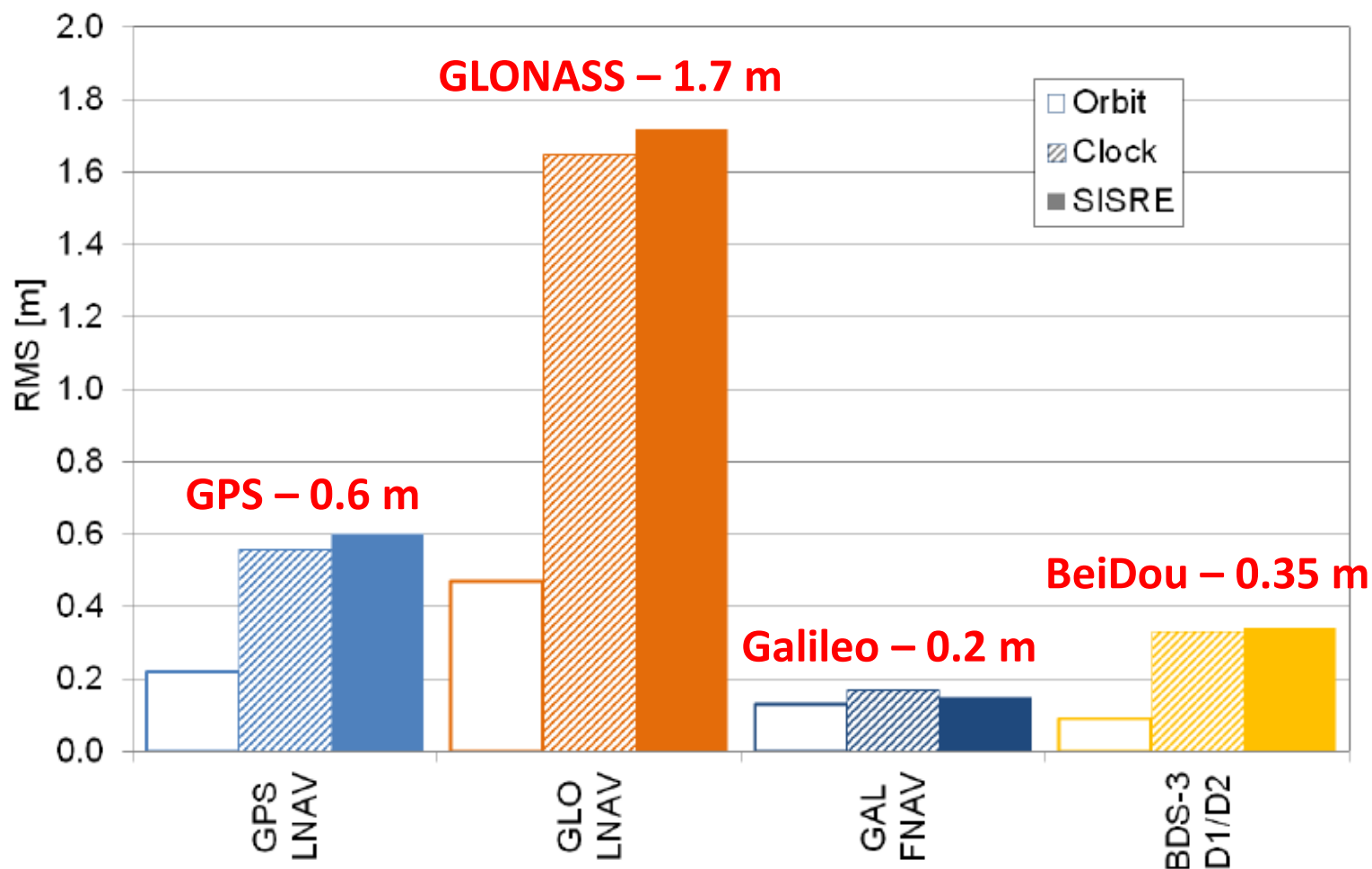
- Otevřená služba (Open Service)
- Veřejná regulovaná služba (Public Regulated Service)
- Služba vysoké přesnosti (High Accuracy Service) – *prozatím testovací režim*
- Pátrací a záchranná služba (Search and Rescue Service)



Zdroj: <https://www.esa.int/ESA>

(Předběžná) hodnocení kvality GNSS

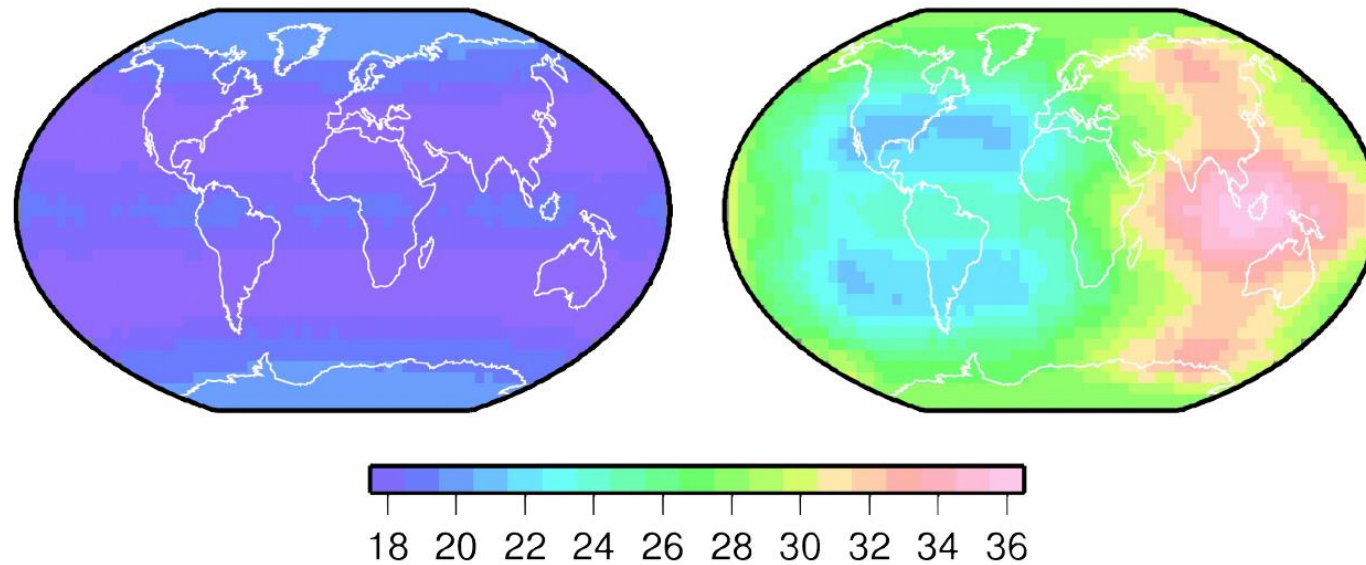
SISRE – chyba určení *pseudovzdálenosti* mezi družicí a přijímačem způsobená nedostatky v palubních efemeridách družic a korekcích chyb hodin na družicích



Globální průměrné hodnoty SISRE za období 9/2019 až 11/2019 pro jednotlivé GNSS systémy, zdroj: Monterbruck et al. (2020)

Multi-GNSS řešení

- přijímač nepoužívá pro určení polohy a času signály jen z jednoho GNSS, ale z kombinace více GNSS
- více družic => robustnější, přesnější řešení
- vzájemná interoperabilita



Teoretický počet viditelných družic systémů GPS+GLONASS (vlevo) a GPS+GLONASS+Galileo+BeiDou+QZSS (vpravo), stav v srpnu 2016, zdroj: Fritsche (2016).

Autonomní

- vyžaduje jediný přijímač

Diferenční

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

- Klasická metoda měření – **1 přijímač**
- využití nejčastěji kódových měření na 1 frekvenci
- využití palubních oběžných drah družic (efemeridy družic) a korekcí chyb hodin družic z navigační zprávy
- **průměrování** = několikanásobné změření bodu a výpočet výsledné polohy průměrováním, umožňuje redukovat vliv odlehlých hodnot

Precise Point Positioning (PPP)

- 1 přijímač
- využití kódových + fázových měření na dvou a více frekvencích (případně na jedné frekvenci)
- využití přesných efemerid družic (oběžné dráhy), oprav chyb hodin družic, korekcí vlivu ionosféry, případně korekcí dalších nepříznivých vlivů
- stále častěji využívaná metoda!

Diferenční metoda měření

- 1 přijímač stabilizován na bodě o známých souřadnicích, umožňuje výpočet korekcí (**BASE**)
- 1 přijímač se pohybuje v terénu a slouží k měření bodů (**ROVER**)
- princip = měření prováděná ve stejném čase a v relativní vzájemné blízkosti, prováděná ke stejným družicím, jsou zatížena stejnými/podobnými chybami!

Některé ze zdrojů chyb GNSS měření, jsou časoprostorově korelované

- vzdálenost mezi BASE a ROVER ideálně < 30 km

Jak vnést korekce do měření?

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

Zdroje korekcí

- 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 3 komerční sítě referenčních stanic

- 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

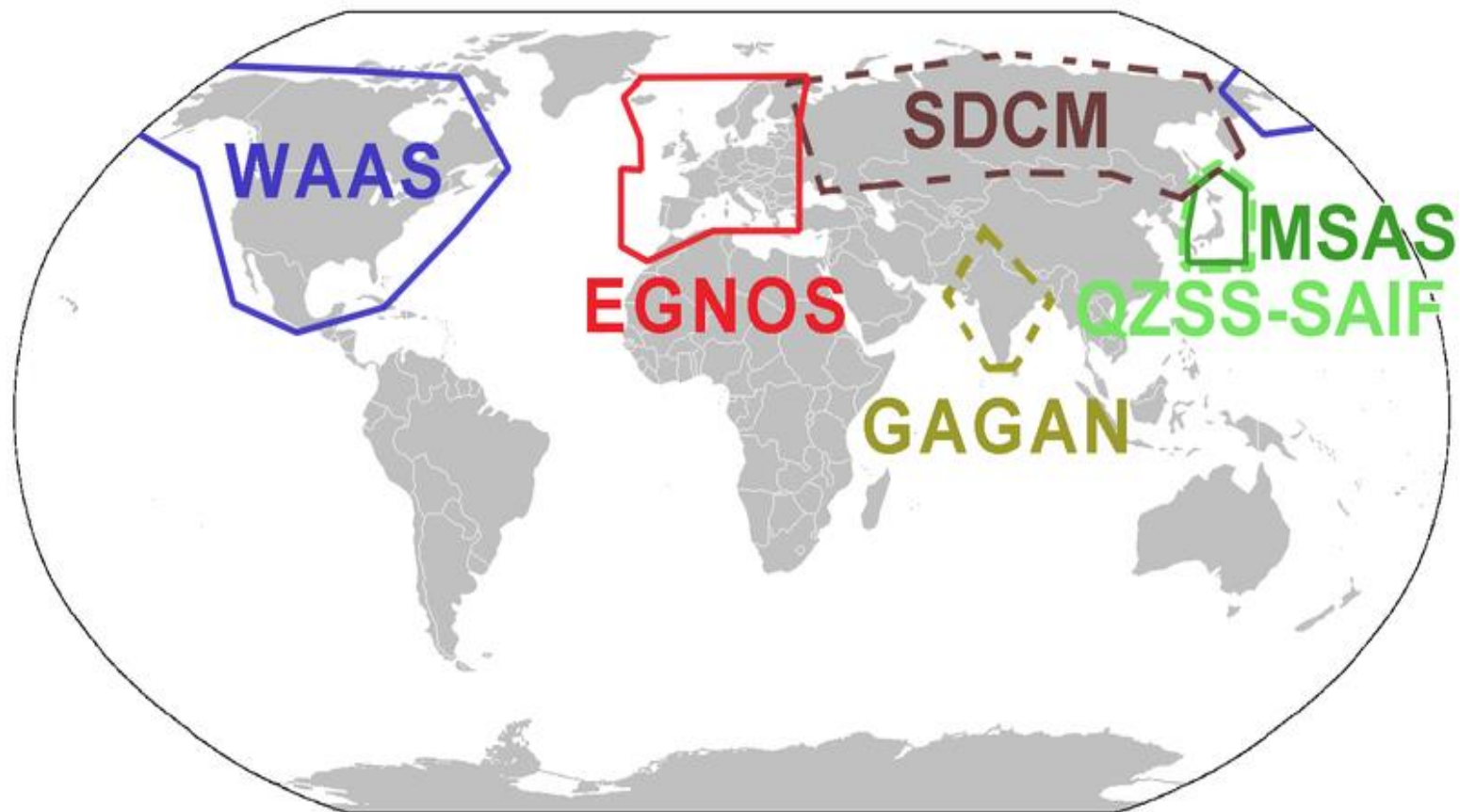
Síť referenčních stanic GNSS - CZEPOS



Družicové systémy pro zpřesňování polohy

- Systémy pro regionální zpřesňování určení polohy a času = **Satellite Based Augmentation Systems (SBAS)**
- princip = pozemní síť přesných GNSS přijímačů slouží k výpočtu korekcí -> ty jsou přenášeny na geostacionární družice, jimi vysílány a následně přijímány běžnými GNSS přístroji
- SBAS umí používat velká část low-end zařízení (turistické, automobilové přijímače, přijímače v mobilních zařízeních)
- přesnost určení polohy cca 1 m

Družicové systémy pro zpřesňování polohy



Shrnutí metod a jejich řádově dosažitelných přesností

Metoda měření	Typická přesnost určení polohy	Potřeba korekcí
Autonomní	3 – 10 m	Ne
Autonomní s SBAS	1 m	Ano (globální)
DGPS (kódová měření)	0,5 m	Ano (lokální)
DGPS (fázová měření), RTK, síťové RTK	2 – 15 cm	Ano (lokální)
PPP post-processing/v reálném čase*	1 – 5 cm/<30 cm	Ne
Síťové zpracování, post-processing, NRT	1 – 5 cm	Ne

* Aktuálně předmět vývoje a testování

- 4 systémy globální družicové navigace jsou v provozu
- současné GNSS umožňují dosahovat přesnosti určení polohy na úrovni
 - **metrů** pro standardní kódová měření
 - **centimetrů** při využití diferenčních fázových měření či techniky Precise Point Positioning (PPP)
 - **sub-centimetrů** pro velmi přesné aplikace

Děkuji za pozornost

Michal Kačmařík

michal.kacmarik@vsb.cz

www.vsb.cz