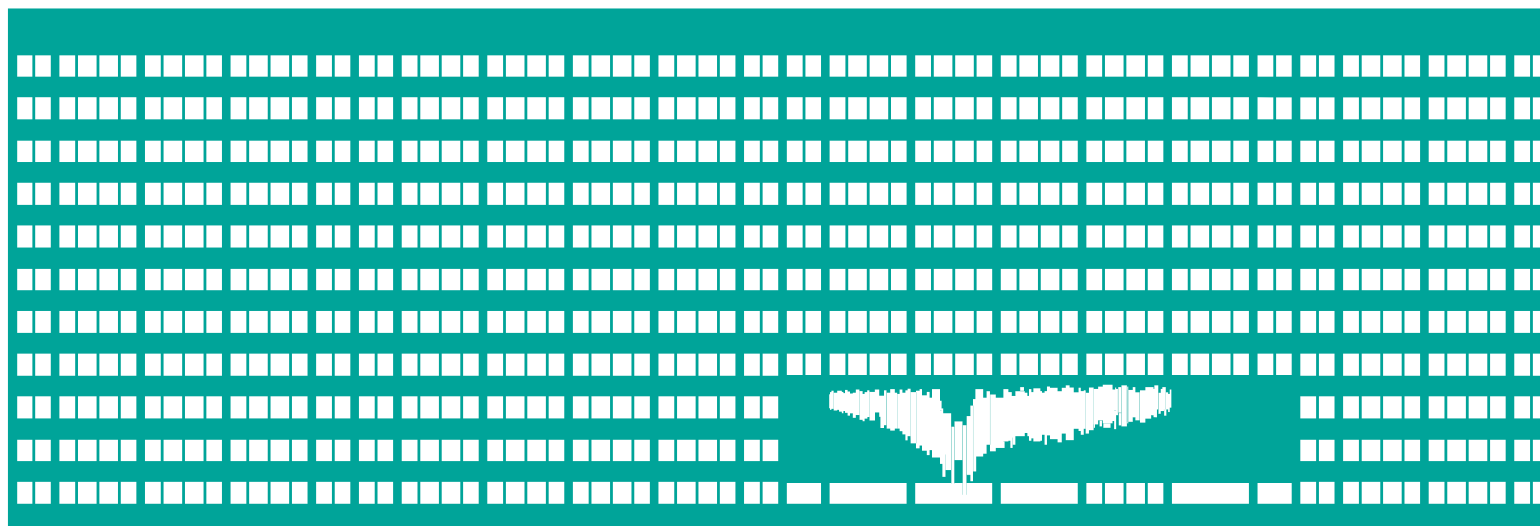


VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA

VSB TECHNICAL
UNIVERSITY
OF OSTRAVA



www.vsb.cz

Základy geoinformatiky 10

Globální navigační polohové systémy

Michal Kačmařík

A924, tel.: 5512

<http://gis.vsb.cz>

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

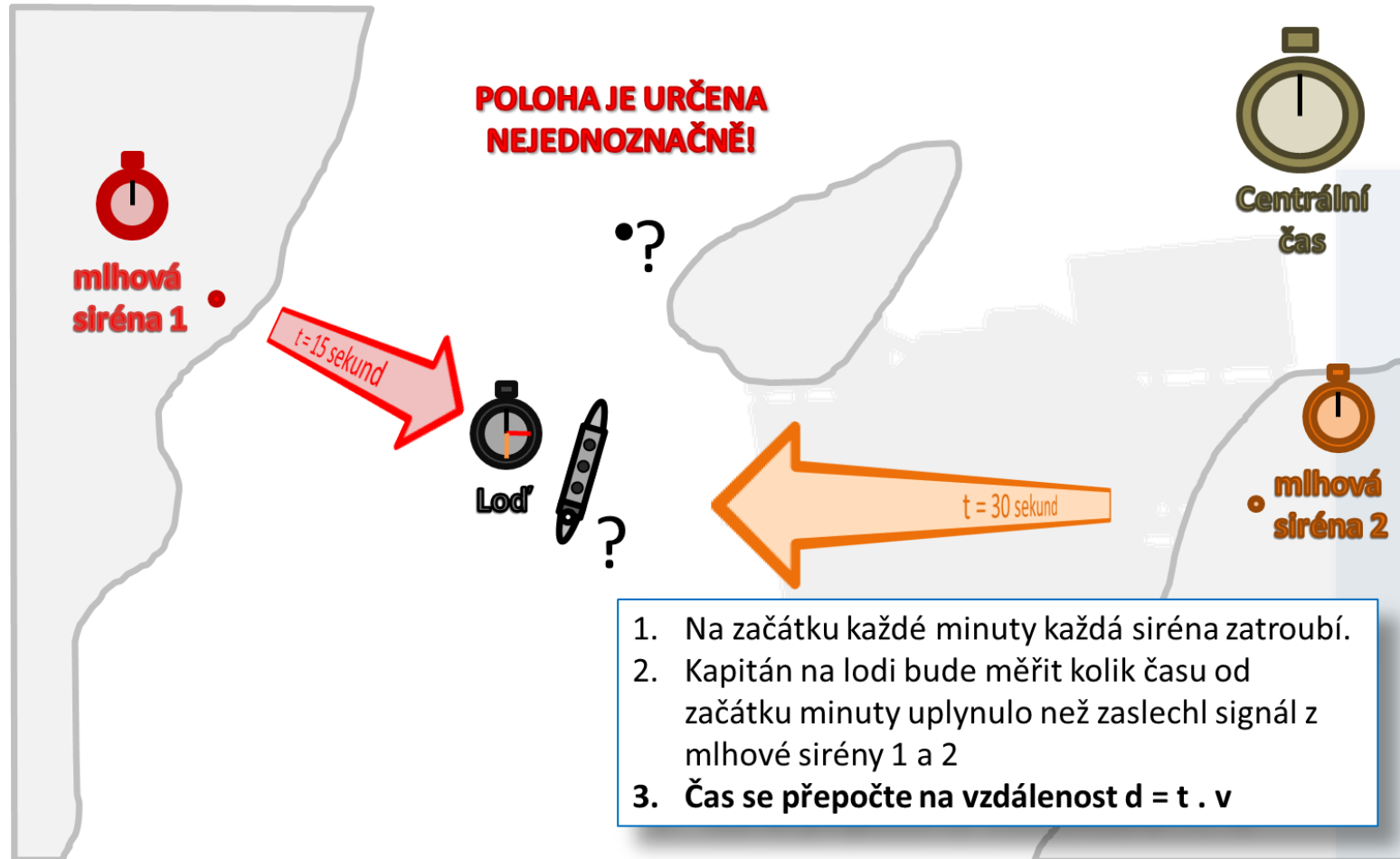
E-mail: michal.kacmarik@vsb.cz

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

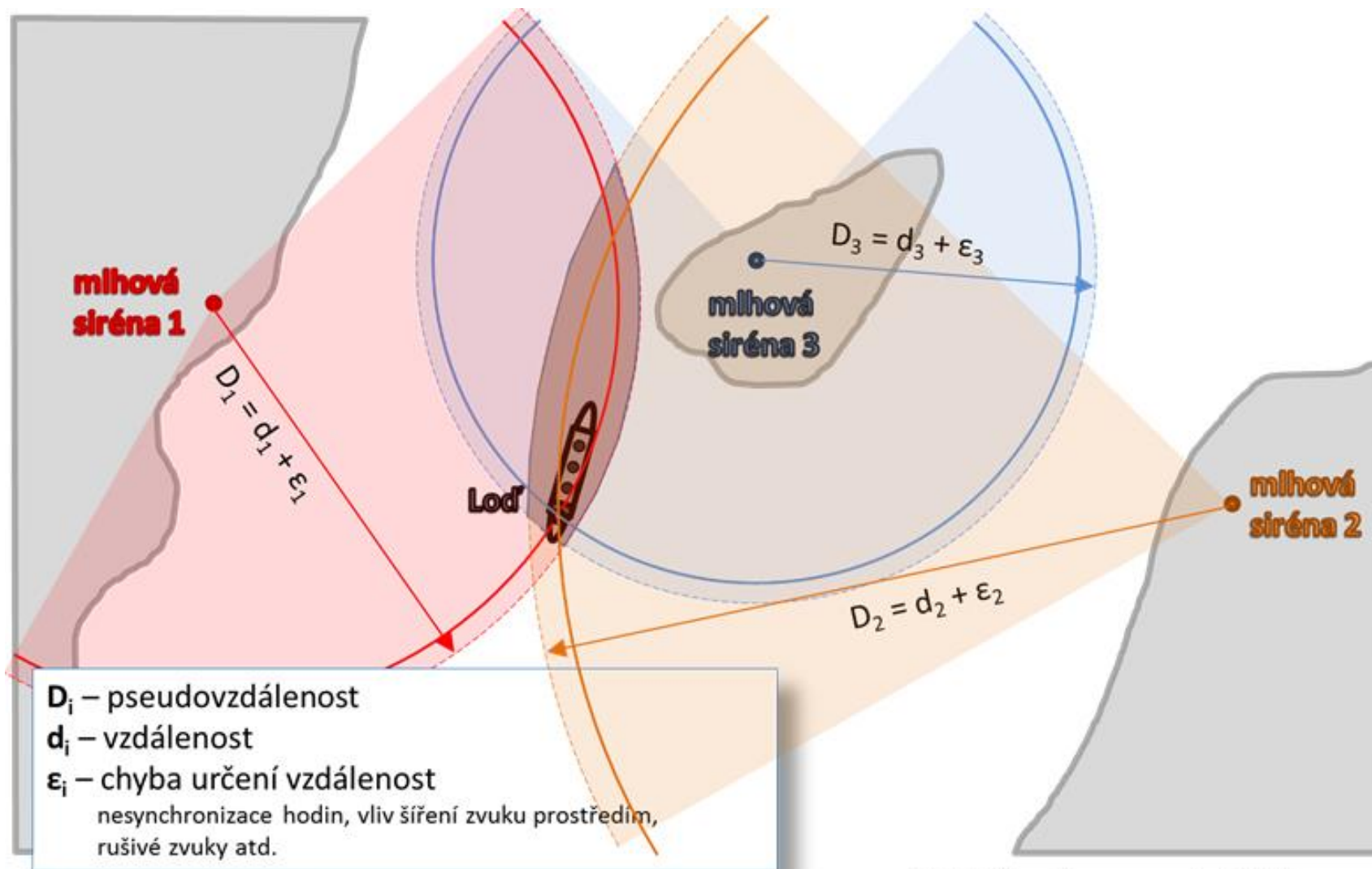


Rychlost šíření zvuku u hladiny moře a teplotě 15°C $v = 340 \text{ m.s-1}$
Příklad převzatý z KAP05

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

Realita kapitána

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

Vysílače v GNSS

- 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.*

- Přijímač z časové značky odeslaní 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)

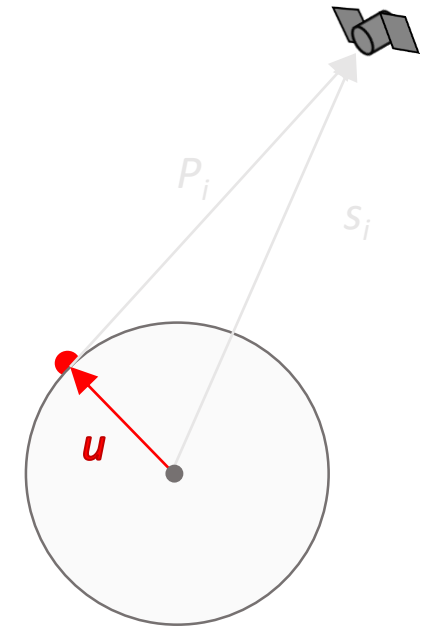
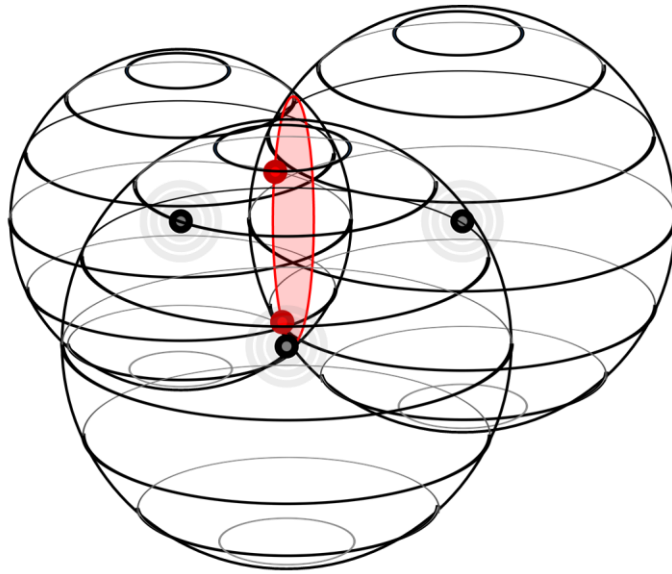
Přesné měření času a jeho synchronizace je klíčová!

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

Výpočet polohy

Jednoznačná lokalizace na
zemském povrchu vyžaduje:

4 družice / 1 epocha observace



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

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

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

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

$s_i = [x_i, y_i, z_i]$
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

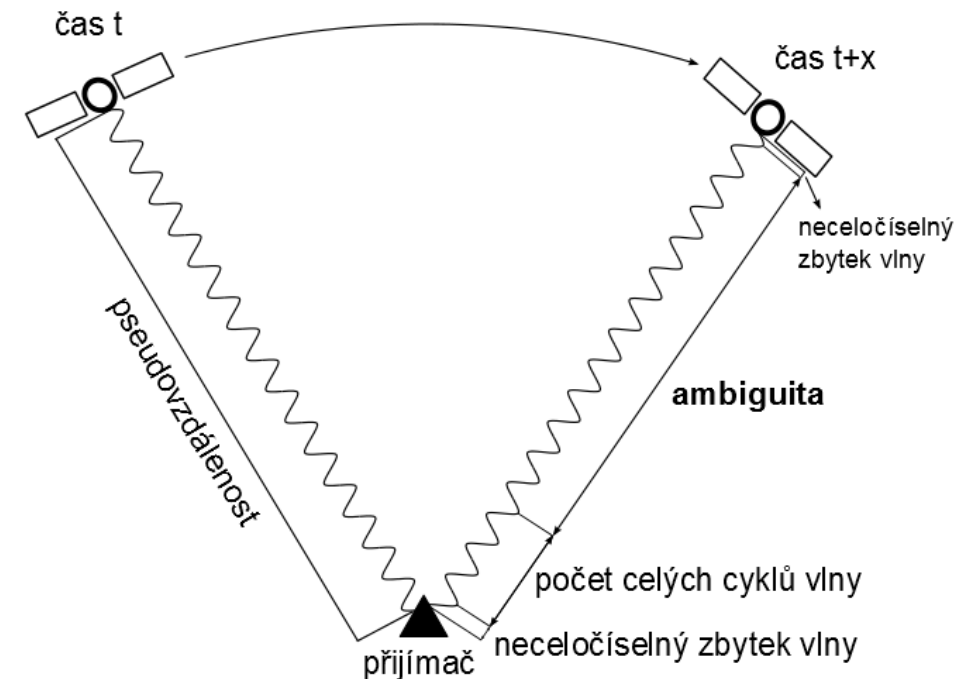
Metoda fázových měření

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

Měří se **dvě komponenty** vzdálenosti:

- Desetiný 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

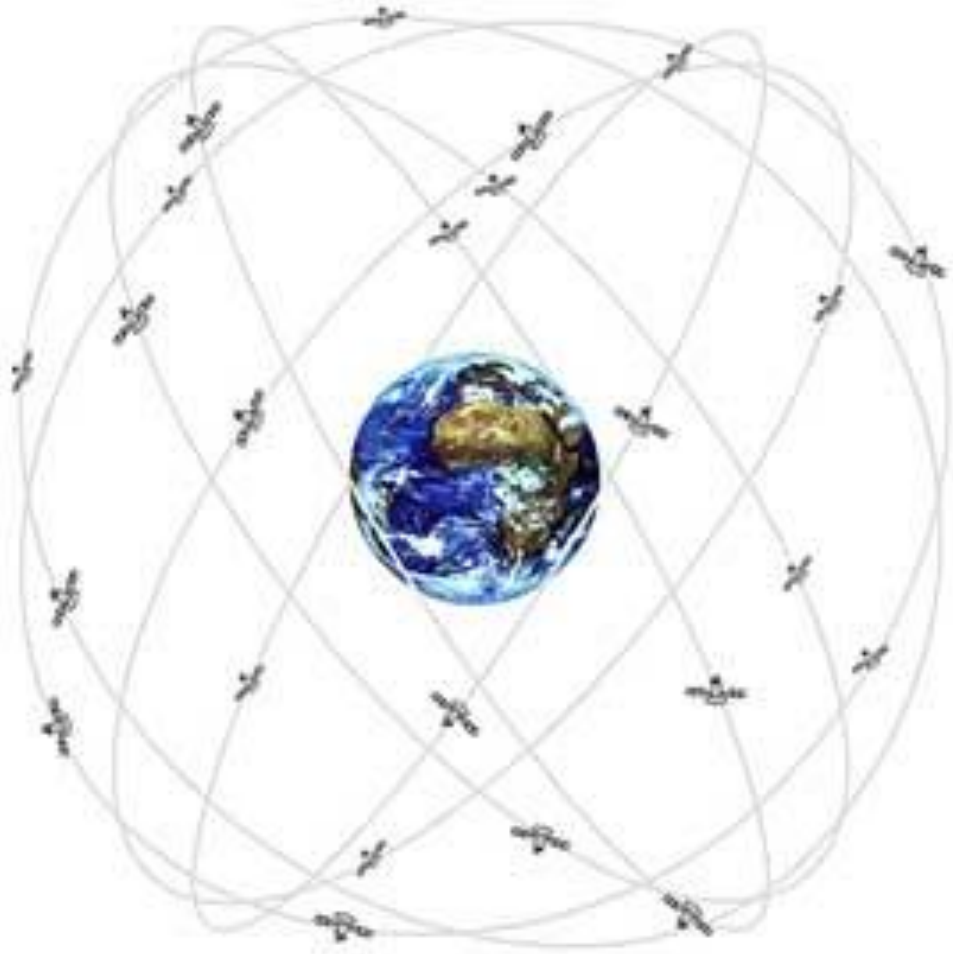
Řídicí segment (pozemní)

- 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

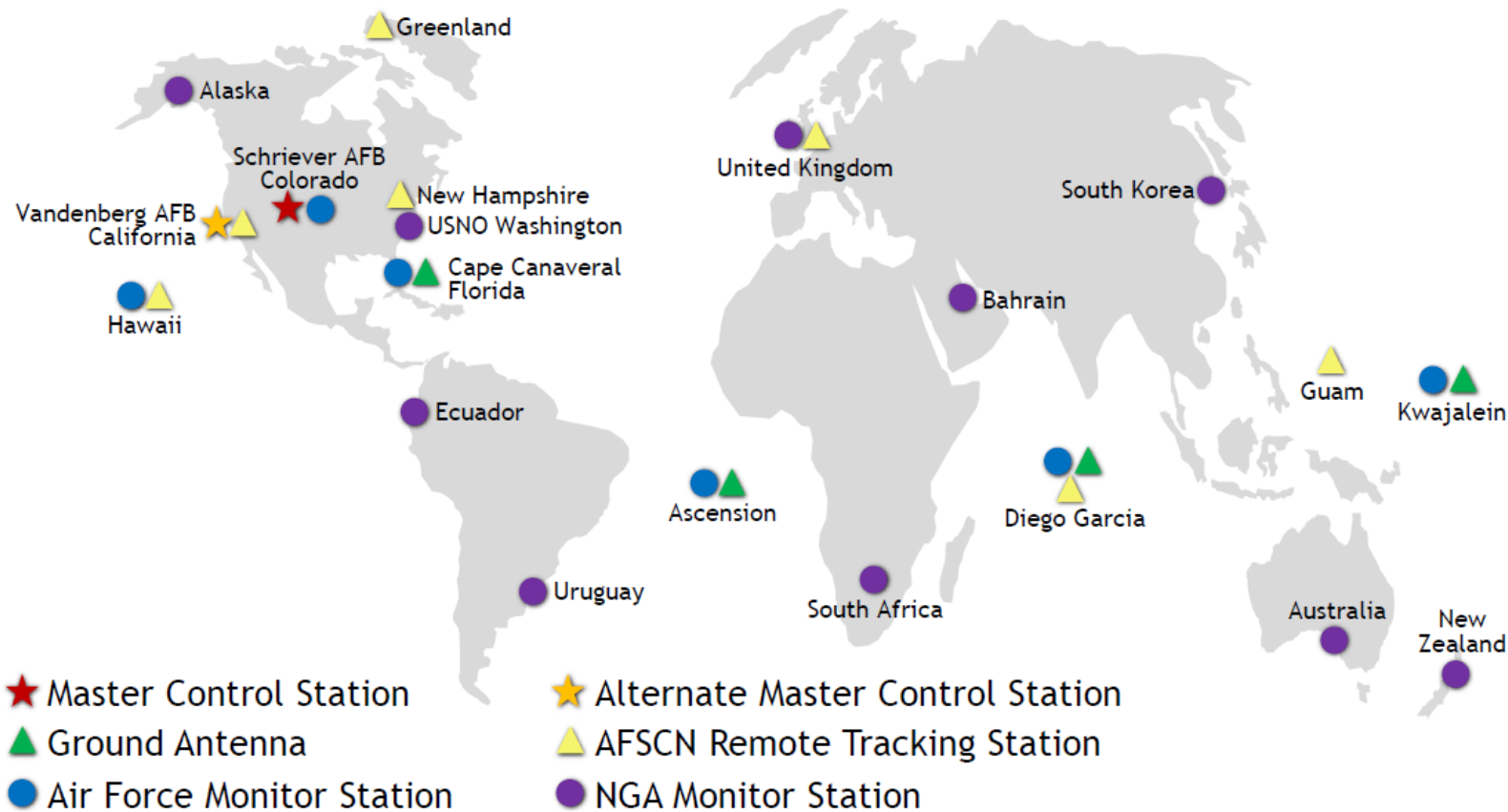


Označení:	24+3
<i>Družic:</i>	max. 36 (aktuálně 31)
<i>Orbitálních rovin:</i>	6 (označení A, B, C, D, E, F)
<i>Sloty v orbitě:</i>	4+2 (záloha)
<i>Rozestup:</i>	60°
<i>Sklon orbity:</i>	55°
<i>Tvar orbity:</i>	eliptická (téměř kruhová)
<i>Typ / výška orbity:</i>	MEO / 20 200 km
<i>Oběžná doba:</i>	cca 11 hodin 58 minut
<i>Aktivní bloky družic:</i>	0 x IIA, 8 x IIR, 7 x IIR-M, 12 x IIF, 4 x III (3/2021)

Údaje platné k březnu 2021

Stanice řídicího segmentu systému GPS

GPS Control Segment

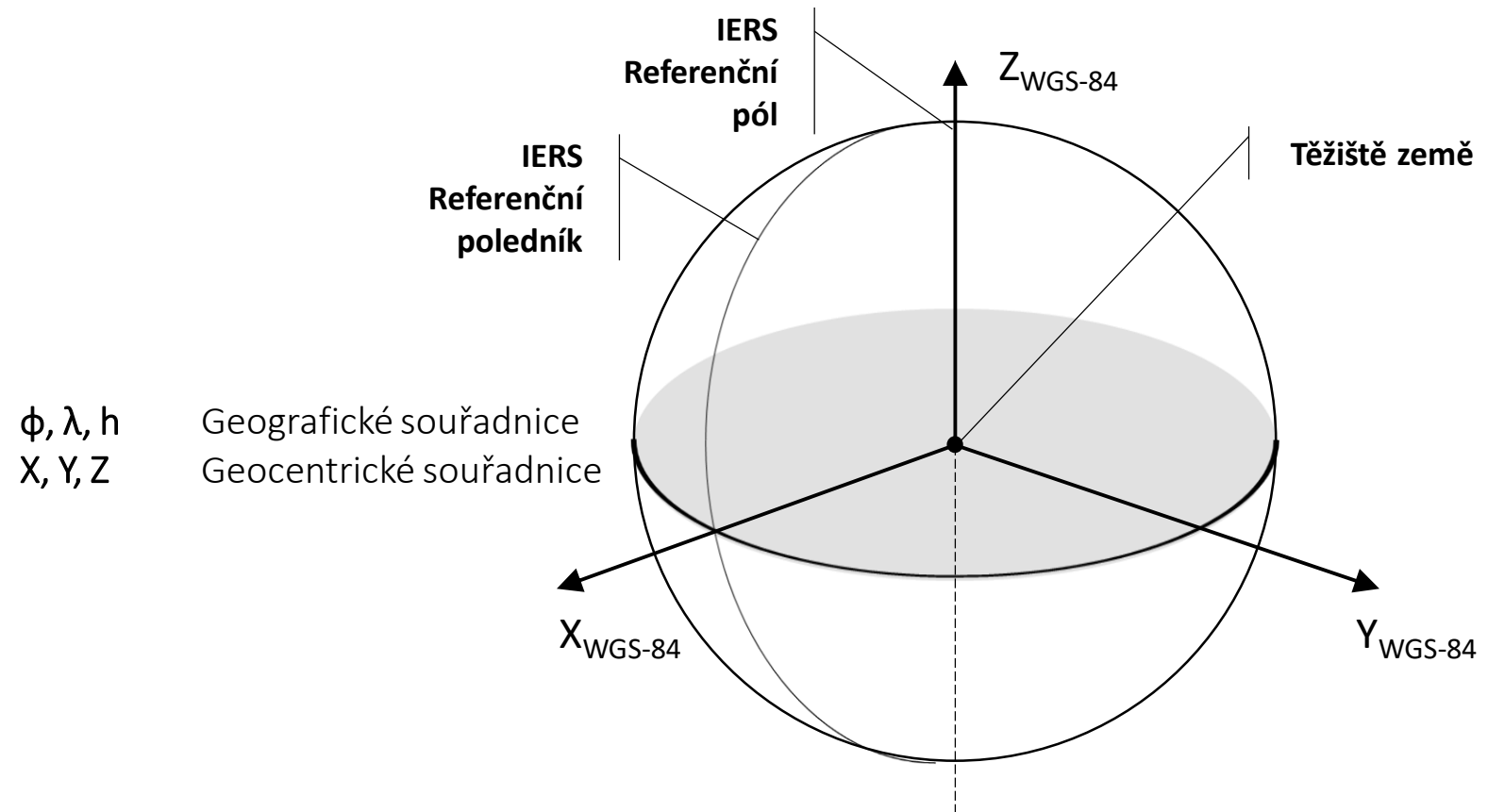


Přehled existujících GNSS

Název	Stát	Primární účel	Rok dosažení plné konstelace
GPS	USA	vojenský	1995
GLONASS	Rusko	vojenský	1995
Galileo	EU	civilní	~2022 (IOC 6/2017)
BeiDou	Čína	vojenský	2020



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

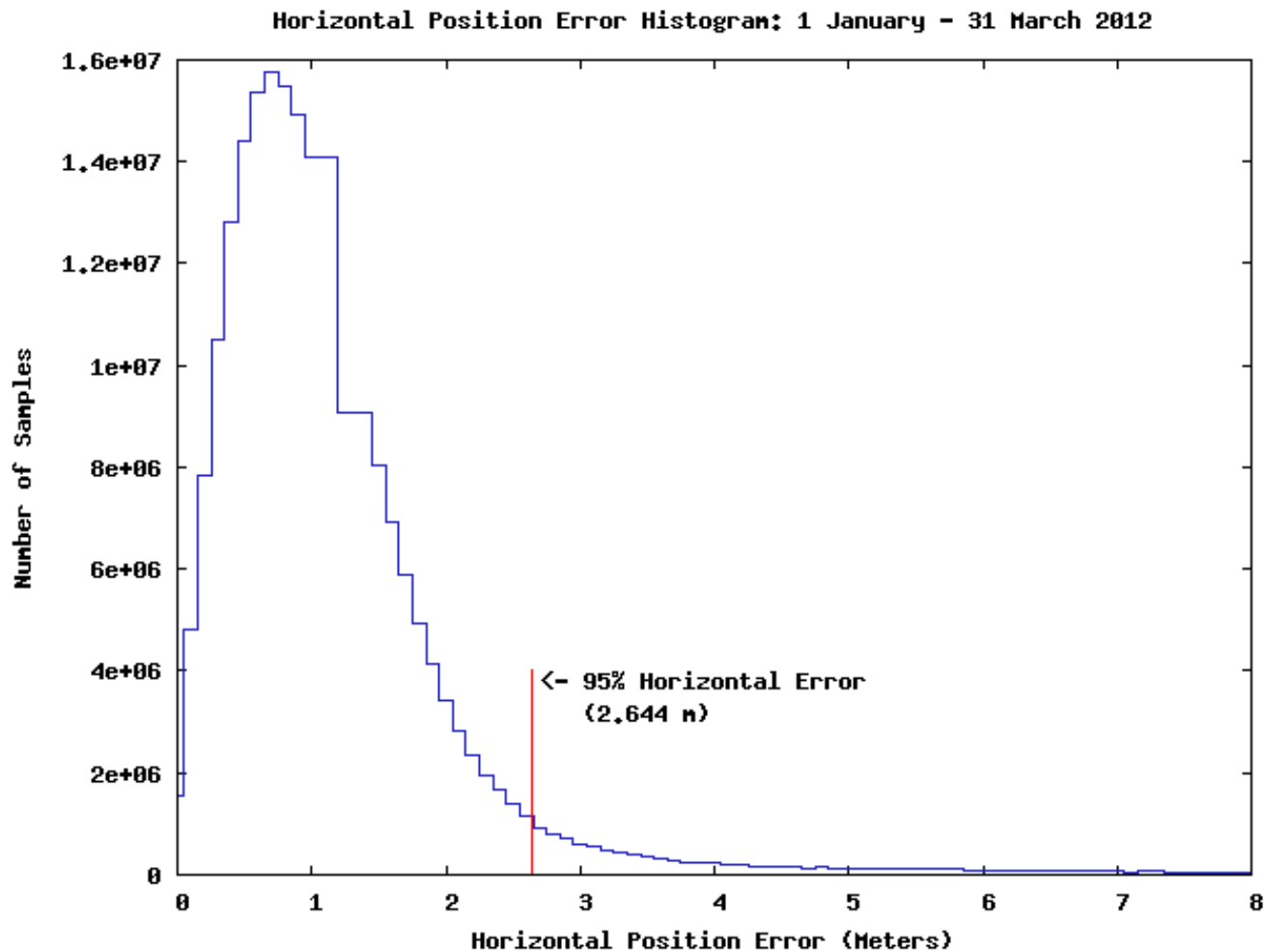


Požadovaná přesnost systému GPS

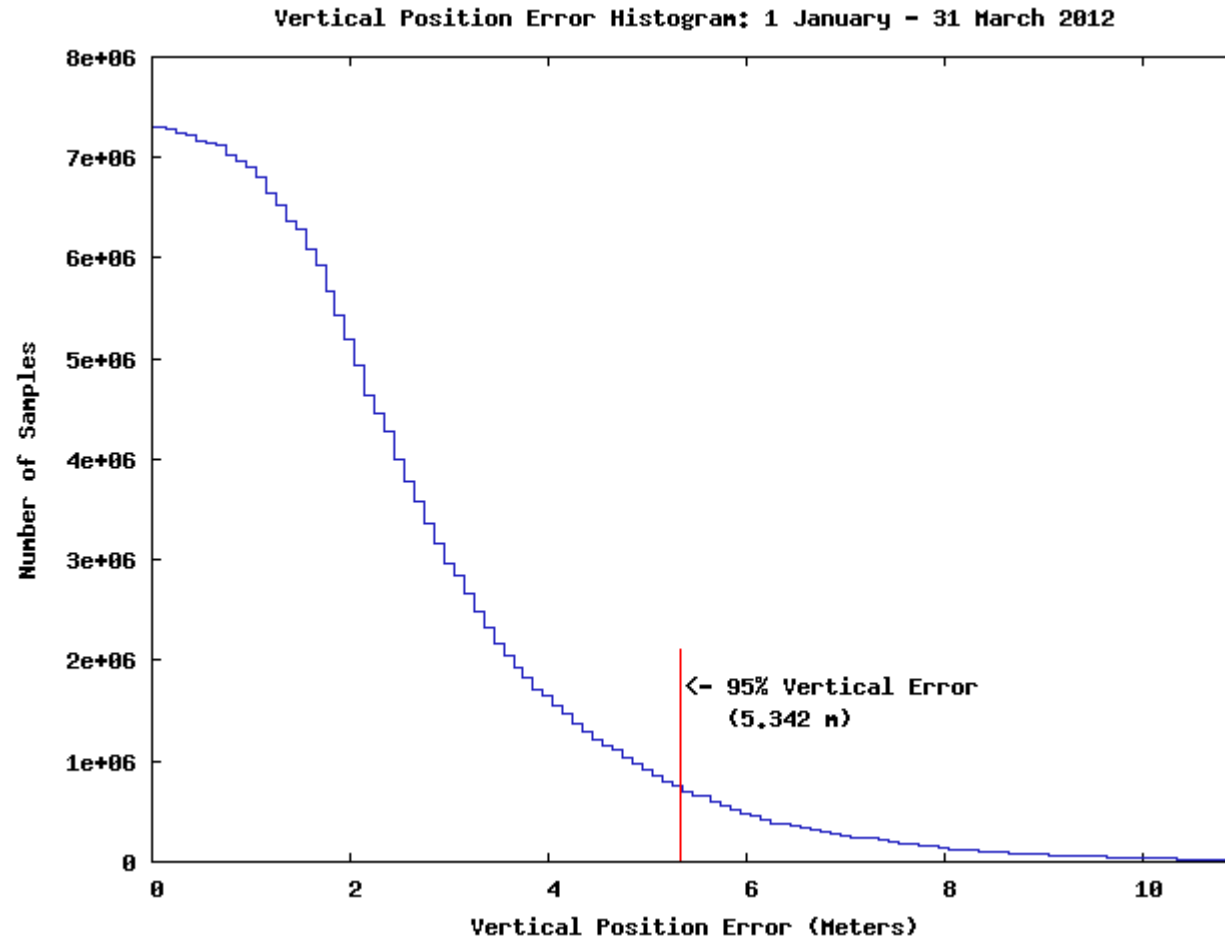
- stanovena ve federálním radionavigačním plánu
- dvě úrovně:
 - standardní poloho služba (SPS)
 - přesná polohová služba (PPS)

- 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



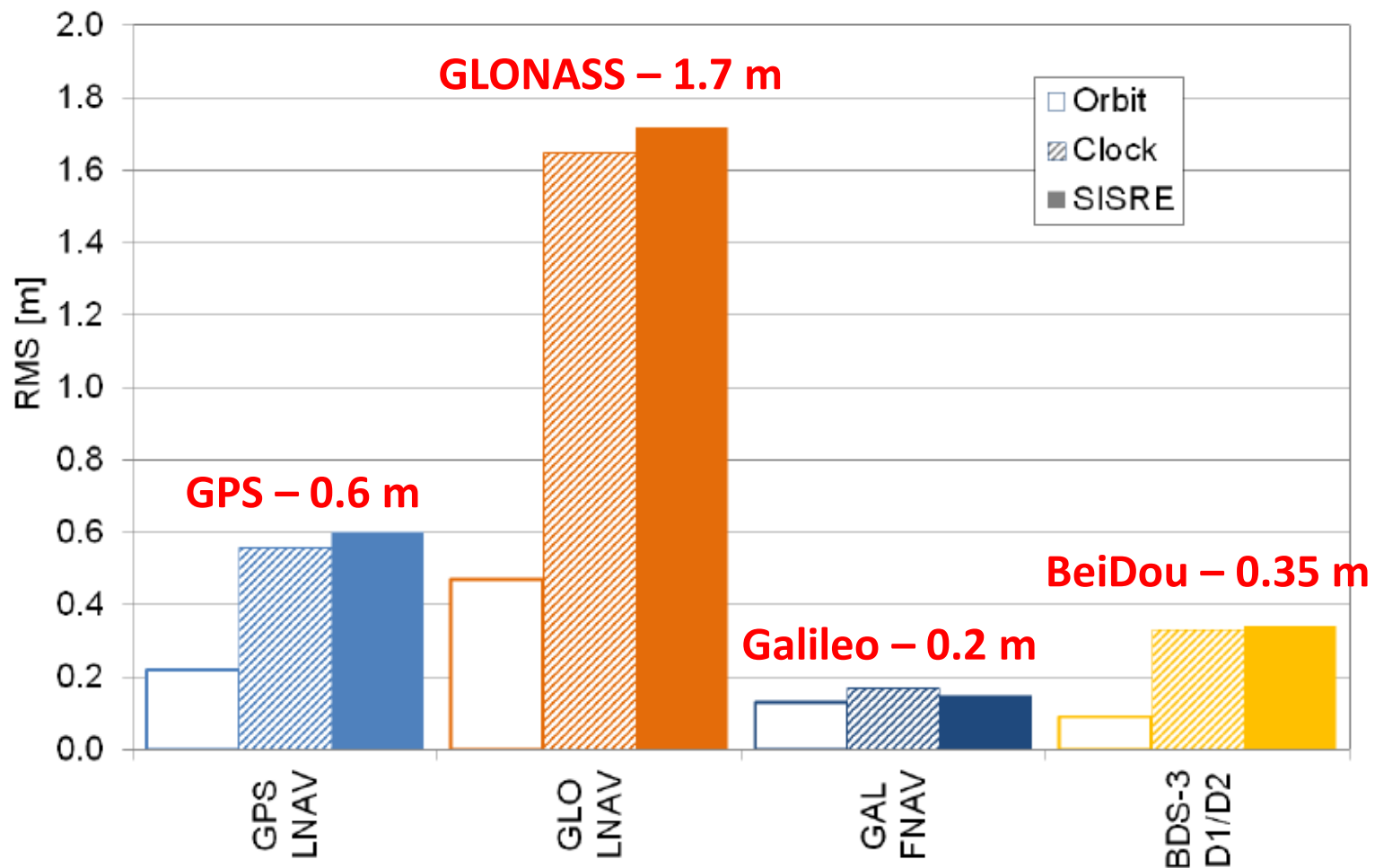
- Kosmický segment
 - 30 družic na střední oběžné dráze (aktuálně 22 aktivních, 4 mimo provoz)
 - výška orbity 23 222 km
 - družice vysílají signály na 4 frekvencích
- Poskytované služby
 - Otevřená služba (Open Service)
 - Veřejná regulovaná služba (Public Regulated Service)
 - Služba vysoké přesnosti (High Accuracy Service) – *ještě není k dispozici*
 - Pátrací a záchranná služba (Search and Rescue Service)



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

(Předběžná) hodnocení kvality GNSS

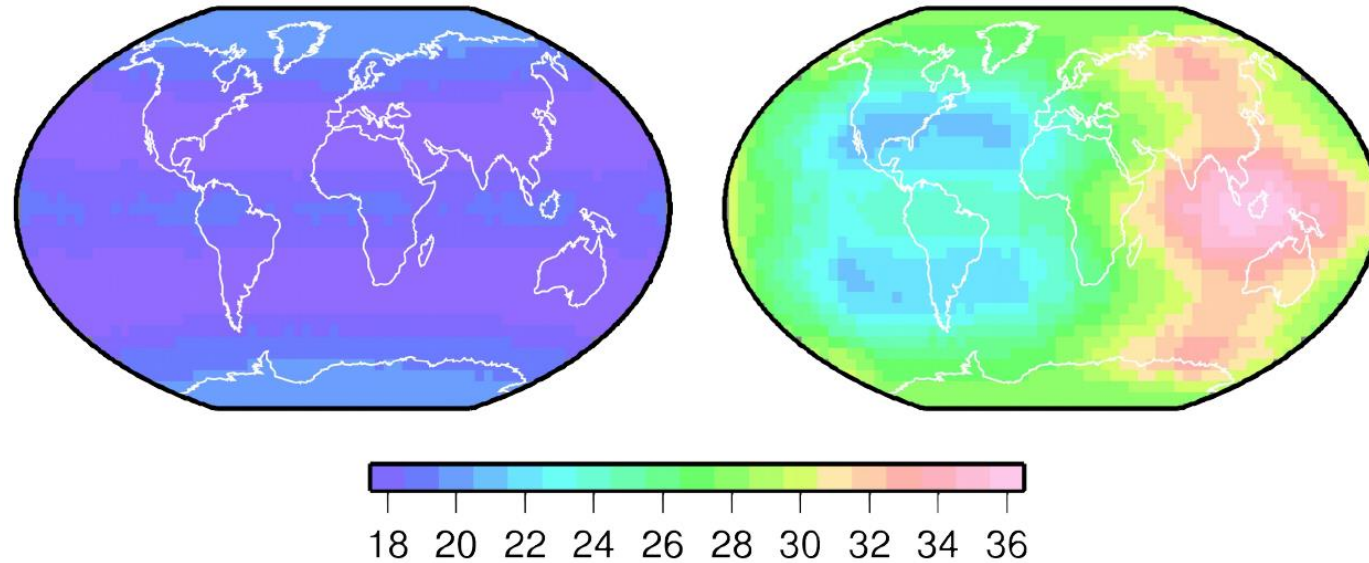
SISRE – chyba určení *pseudovzdálenosti* mezi družicí a přijímačem způsobená nedostatky v palubních efemeridách družic a korekcích chyb hodin na družicích



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

Autonomní metoda měření

- 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?

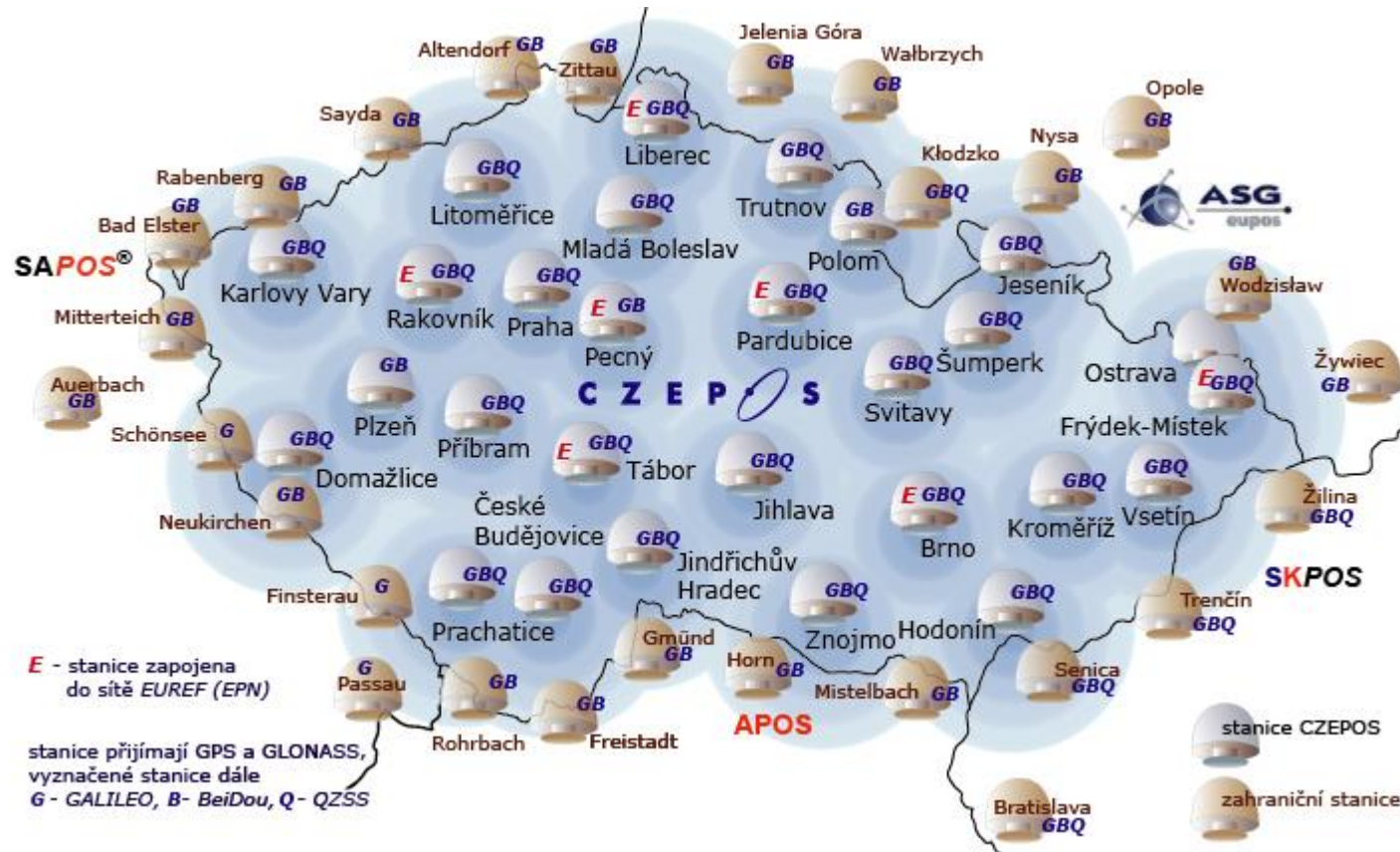
- zpracováním po měření (Post-processing)
 - naměřené souřadnice zpřesňujeme až po měření
 - potřeba software pro zpracování
 - přesnější
- v reálném čase (typicky metoda RTK)
 - naměřené souřadnice zpřesňujeme přímo v terénu při měření
 - potřeba spojení se zdrojem korekcí (internet / rádiová komunikace)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

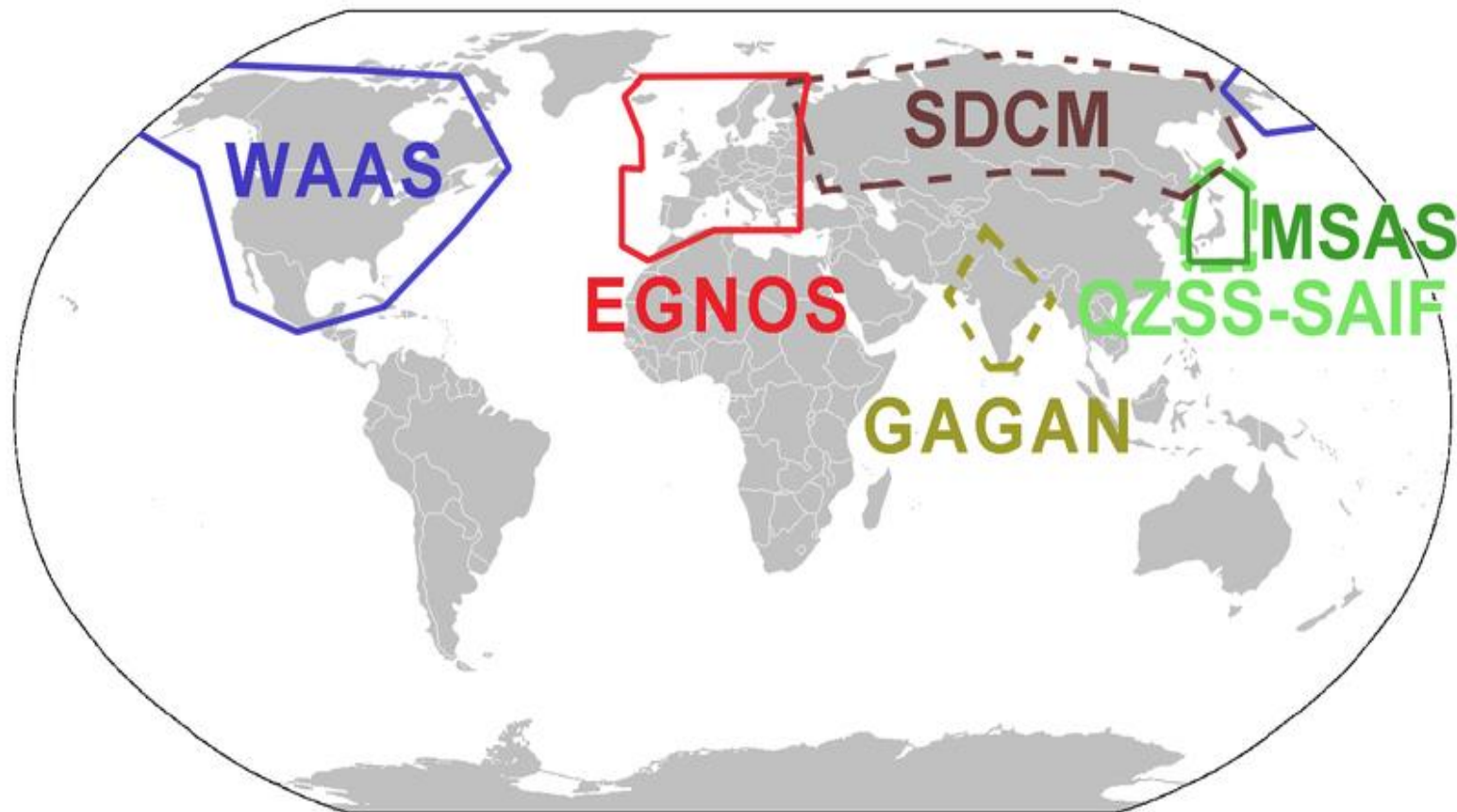
Síť referenčních stanic GNSS - CZEPOS



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

- 3 systémy globální družicové navigace jsou plně v provozu a další 1 systém je dokončován
- 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