



Historie navigace a GNSS



Ing. Kateřina TAJOVSKÁ, PhD.
Geografický ústav , Přírodovědecká fak. MU Brno
katkatajovska@email.cz



Obsah přednášky

- Stručná historie navigace a určování polohy
- Současné navigační systémy – GNSS
- Kde všude se využívají GNSS
- Klady a zápory, na co si dát pozor při využití navigace



Pravěké mapy a navigace

- první počátky už v době kamenné – rytiny map na mamutích klech, hliněných vázách, vyryté do skalních stěn
- navigační mapy primitivních národů (hůlkové mapy, mapy z oblázků a mušlí, kreslené do písku, na zvířecí kůži)



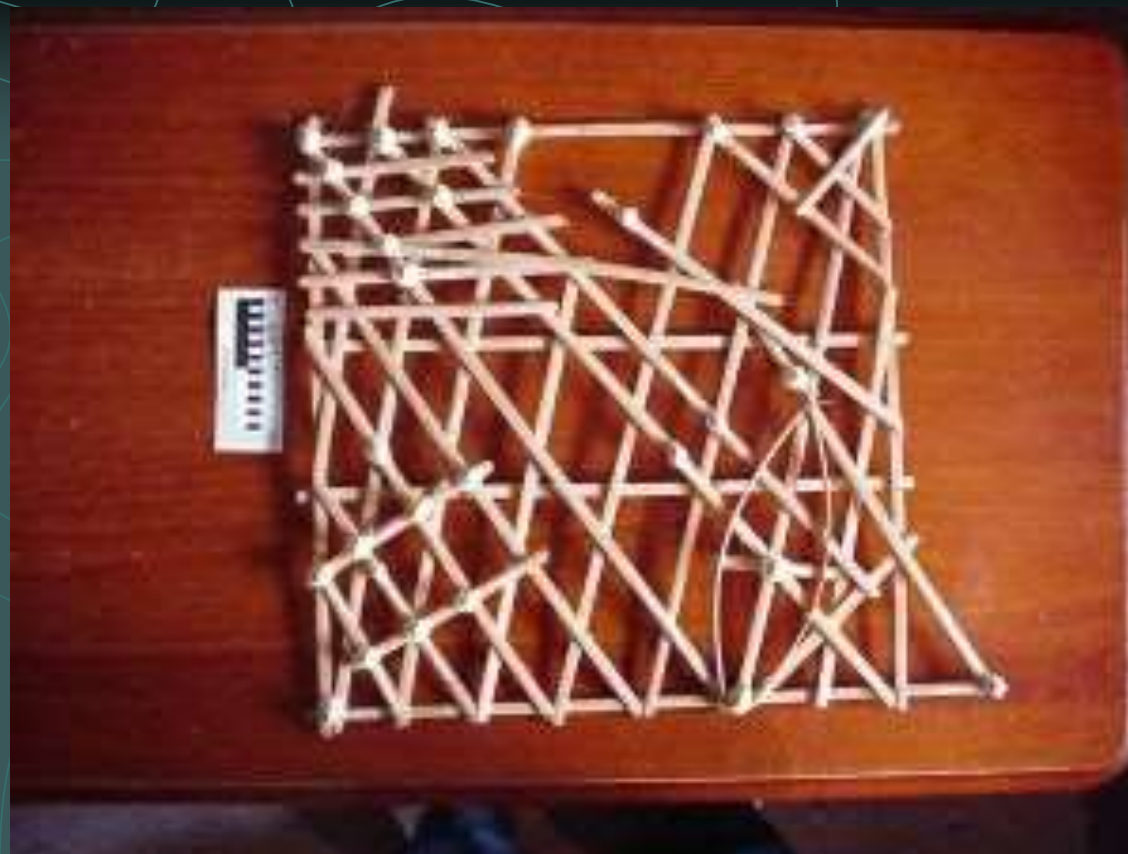
**Kresba vyrytá do hrotu mamutího klu, nalezeného u Pavlova v roce 1962
(stáří zhruba 25000 let)**



Rytina loveckého revíru na Majkopské stříbrné váze (3.tis. př.n.l.)

Skalní kresba na ledovcových oblazech, Bedolina (Itálie), asi z poloviny 2.tis. př. n. l.

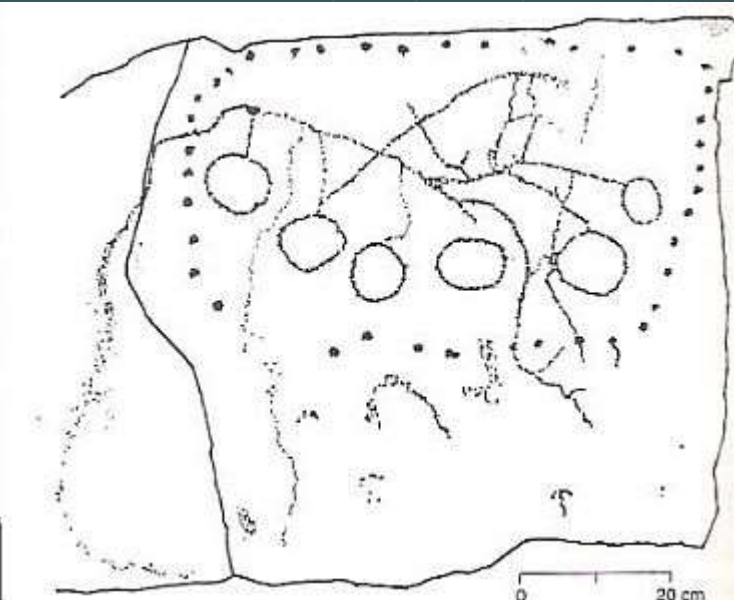
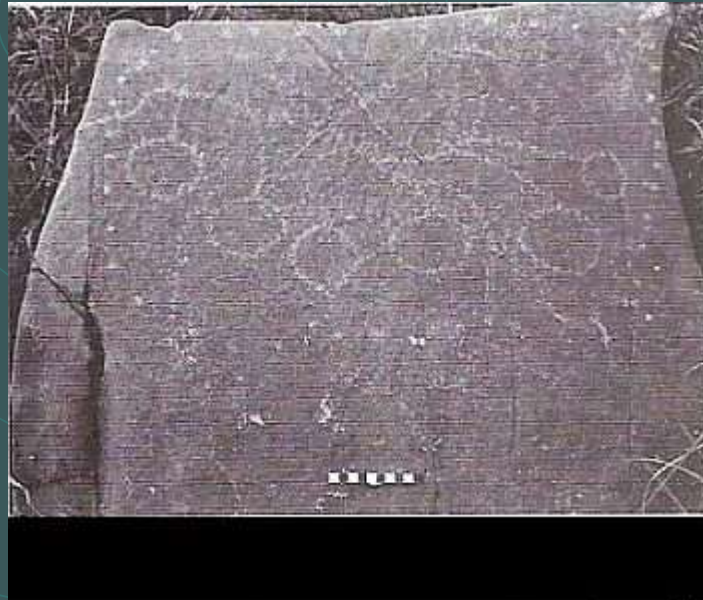


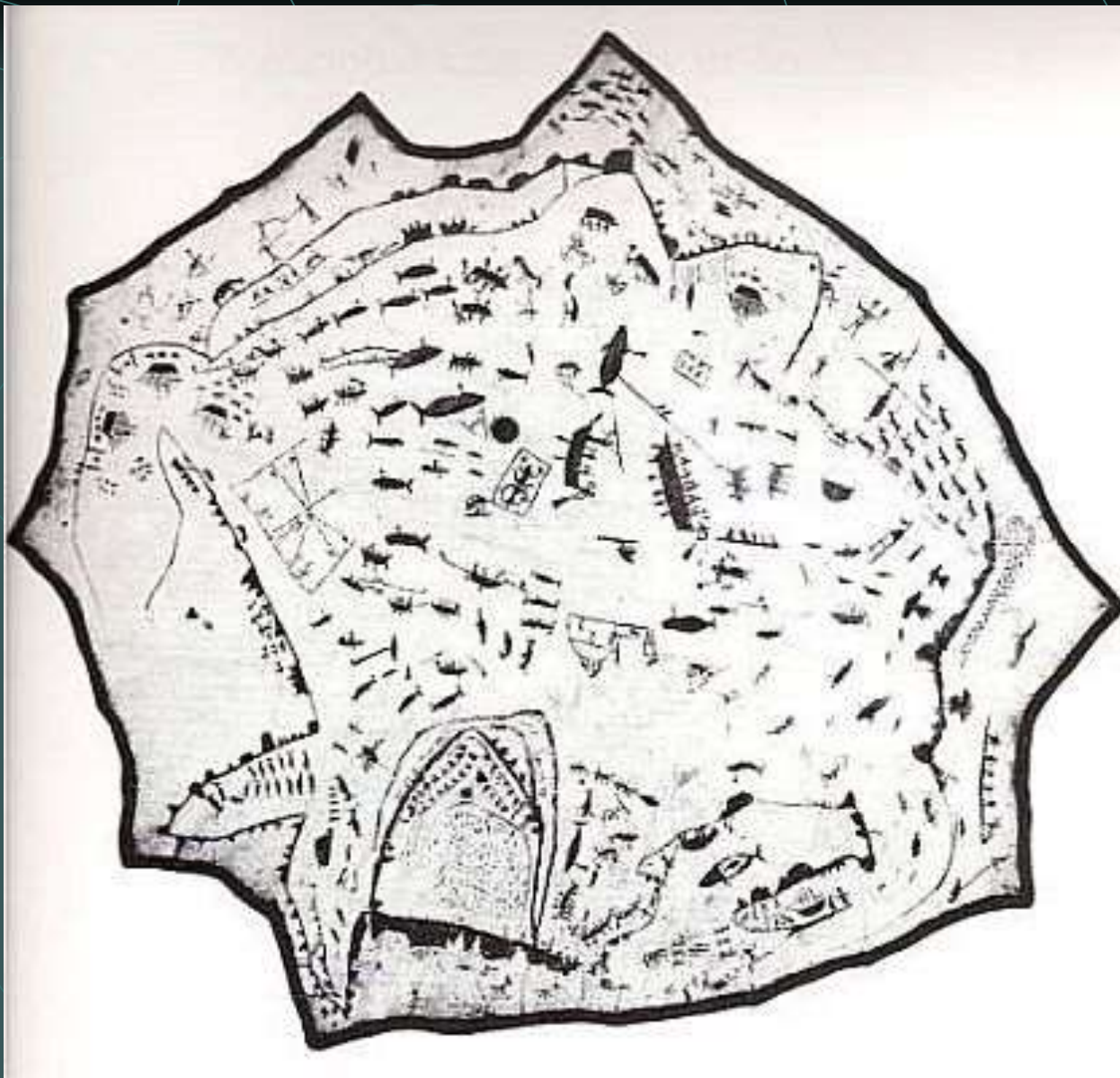


Mapy sestávají z tenkých hůlek nebo proužků středního žebra palmových listů, v určitých místech jsou rozloženy malé mušle nebo kamínky a vše je svázáno palmovými nitěmi. Rovné hůlky znamenají zřejmě směr vln, ohnuté nejvýhodnější kurs pro plavbu. Mušle představují přibližnou polohu jednotlivých ostrovů.

V saharské části Afriky se vyvinul typ modelování krajiny velice podobný našim plastickým mapám. Písek představoval veliké pusté plochy Sahary a jednoduchými rýhami se v něm vyznačovaly vlnité duny, skalnaté plošiny byly vyznačeny plochými kaménky

Ve střední a jižní Africe se zachovaly skalní kresby pravěkých lovců zachycující hlavně lov a zvířata. Na kamenech pak můžeme nalézt rytiny znázorňující patrně sídla a hlavní cesty mezi nimi





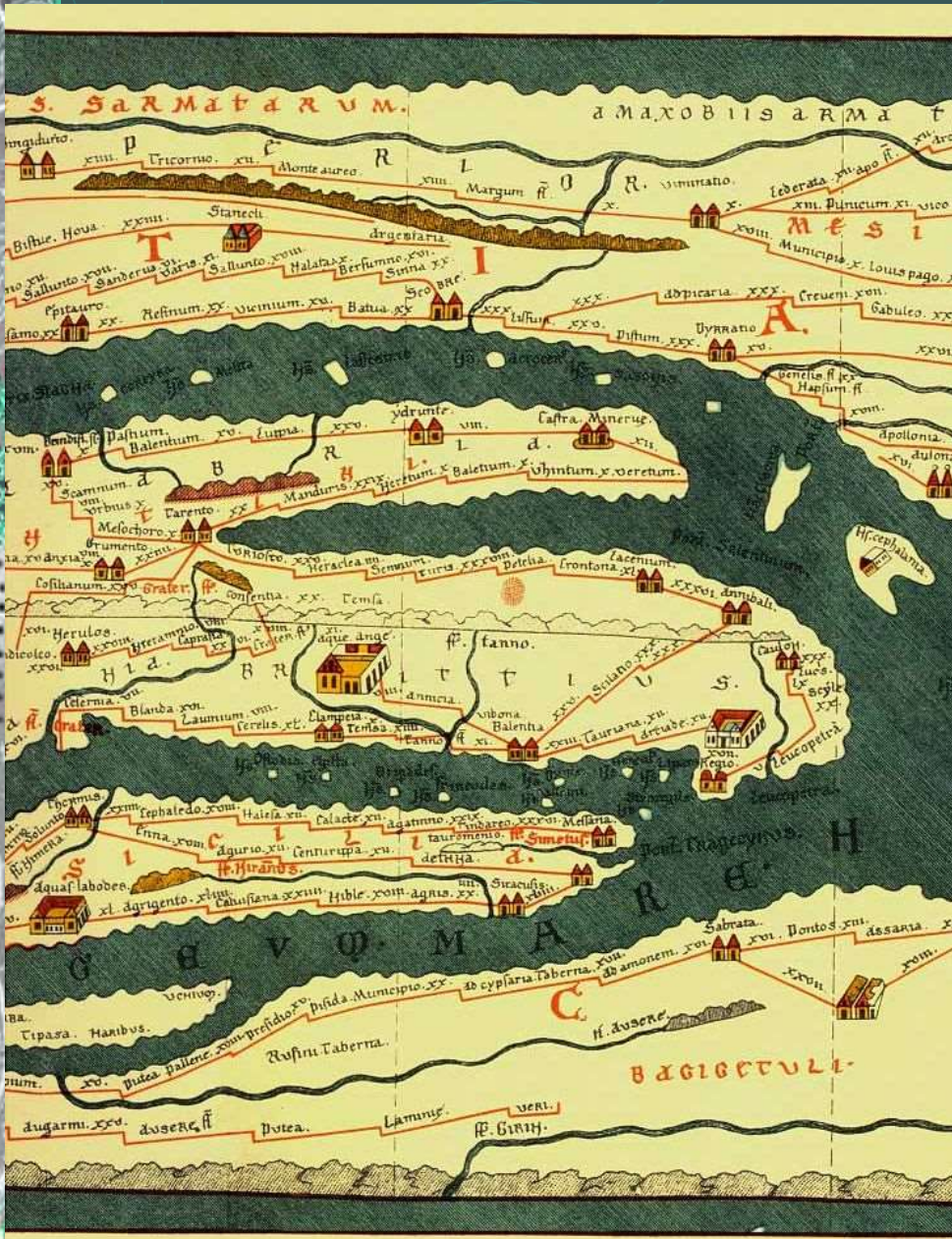
Mapa eskymáckého kmene Čukčů na tulení kůži



Starověk a středověk

- Antické Řecko a Řím, Čína, Egypt, Mezopotámie – rozkvět matematiky, astronomie, první zobrazení světa, zeměpisná síť, vynález kompasu, kartografická zobrazení
- pochodové mapy pro římské legie, poutnické mapy,

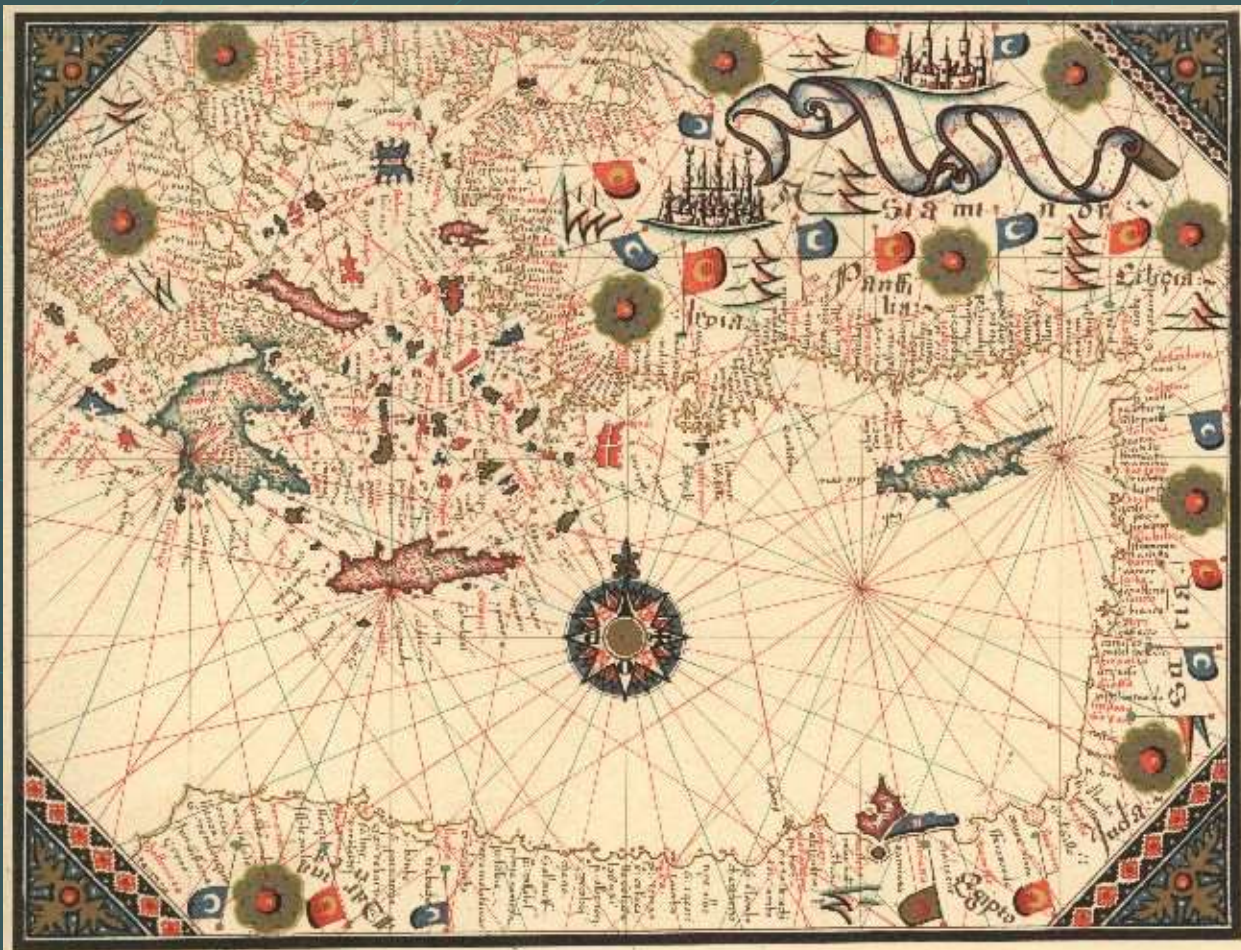
Peutingerova mapa (odvozena z Agrippovy mapy ze 4.st.)



druh vojenské pochodové mapy znázorňující síť silnic Římské říše a zastávky na nich, všechny cesty jsou nakresleny jako zalamované čáry, každé zalomení znamená zastávku na trati a ke každému úseku je připsána jeho délka v římských mílích (1480 metrů) odspodu nahoru: africké středomořské pobřeží, Sicílie, jižní Itálie, Jaderské moře a Dalmátské pobřeží

Zámořské objevy, renesance

- Objevování nových zemí, navigace dle kompasu, astrolábu, sextantu, portolánové mapy, kompasové mapy, námořní atlasy



Novověk

- Geodetická měření, využití sextantu, chronometru, přesného data a času a tabulek s vypočtenými polohami nebeských těles byly základní pomůcky pro určení zeměpisné polohy až do 20. století.
- 20. léta 20. století – využití rádiových vln (1935 Radar)
- Radar - silné svazky vln se vysílají v krátkých impulzech a v pauzách se přijímají vlny, odražené na hledaných objektech. Vzdálenost nalezeného předmětu se určuje pomocí interference vyslaného a odraženého signálu.

Co to je GNSS

- GNSS – Globální navigační satelitní systém – souhrnný termín užívaný k obecnému označení globálních družicových systémů
- obecně je to služba, technologie umožňující pomocí signálu ze satelitních družic určit svojí polohu, rychlost a čas s velkou přesností
- Výhody: 24h denně nezávisle na počasí, téměř kdekoli na zemském povrchu, přesnost až subcm, není nutná přímá viditelnost, 3D souřadnice, rychlost --->efektivnost
- Nevýhody: nutná přímá viditelnost na družice ---> problémy s měřením v hustých porostech, zástavbách, nemožnost měření v podzemí, převod přímé spojnice bodů na zemský povrch (geocentrický souřadnicový systém WGS-84)

Stručná historie GNSS

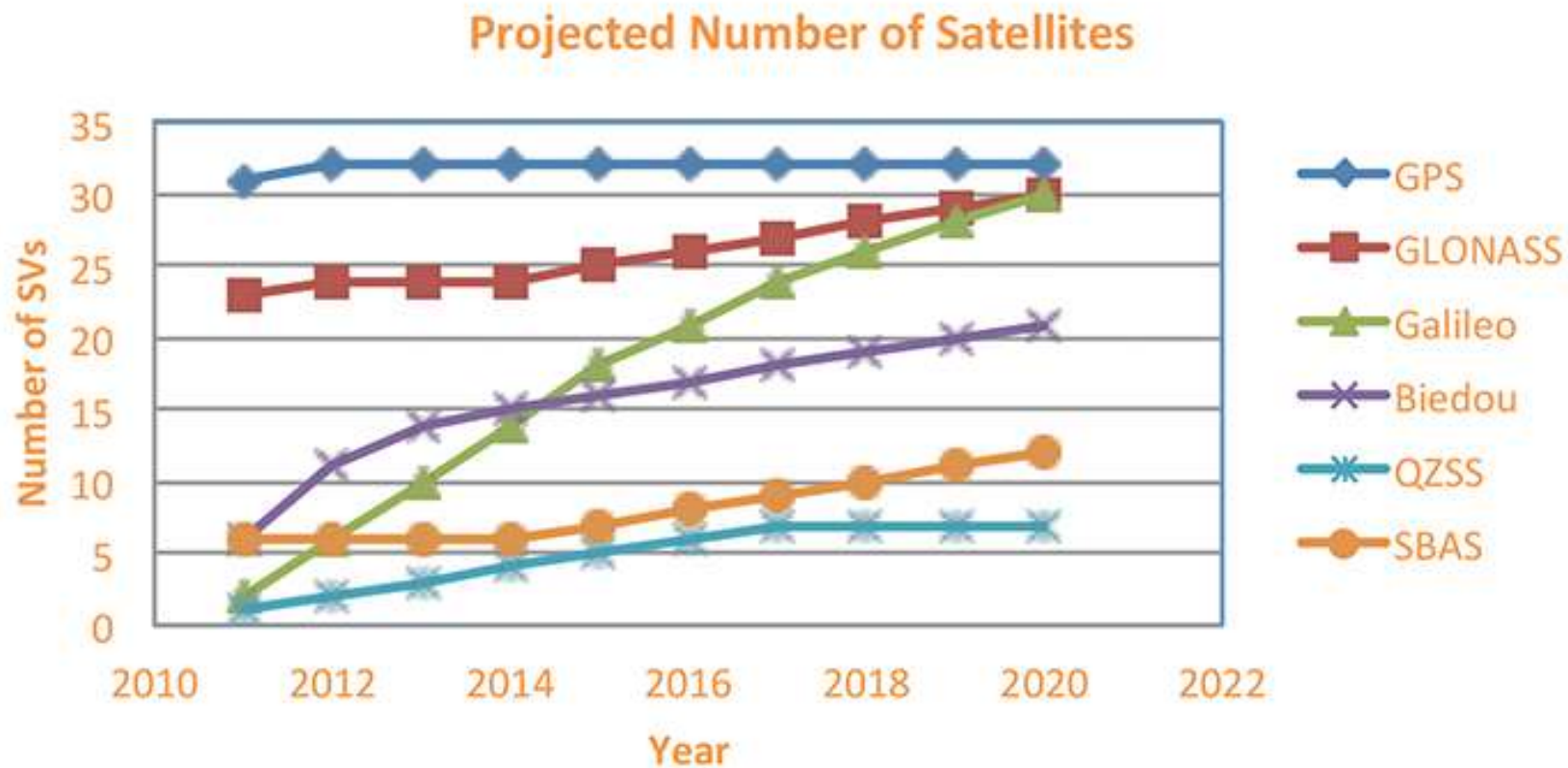
- USA - 60. léta - Transit - 6 družic, přesnost 800m, dostupnost 35-100 min
- 70.léta - Timotion - přesné vysílání času, použití pro projekt GPS
- SSSR - Cyklon, Parus, Cikada obdoba amerických

Nedostatky: malá přesnost, dostupnost, 2D-x,y, čas

Dnešní systémy:

- Americký navigační družicový systém NAVSTAR GPS
- Ruský globální navigační družicový systém GLONASS
- Čínský navigační družicový systém Beidou / Compass
- Indický regionální navigační družicový systém IRNSS
- Japonský navigační družicový systém Quasi-Zenith QZSS
- Evropský globální navigační družicový systém GALILEO

Plánovaný počet družic v systémech GNSS

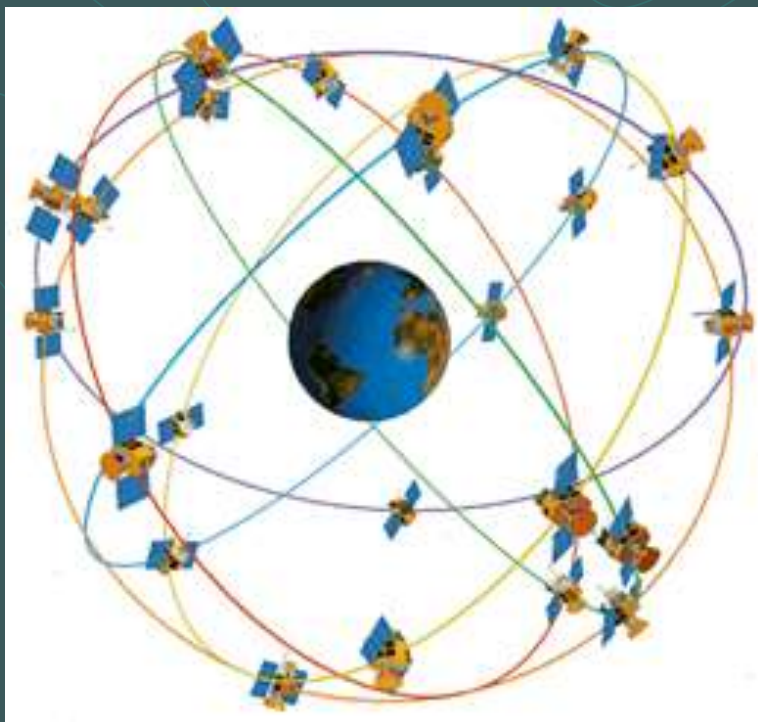


Složení systému GNSS

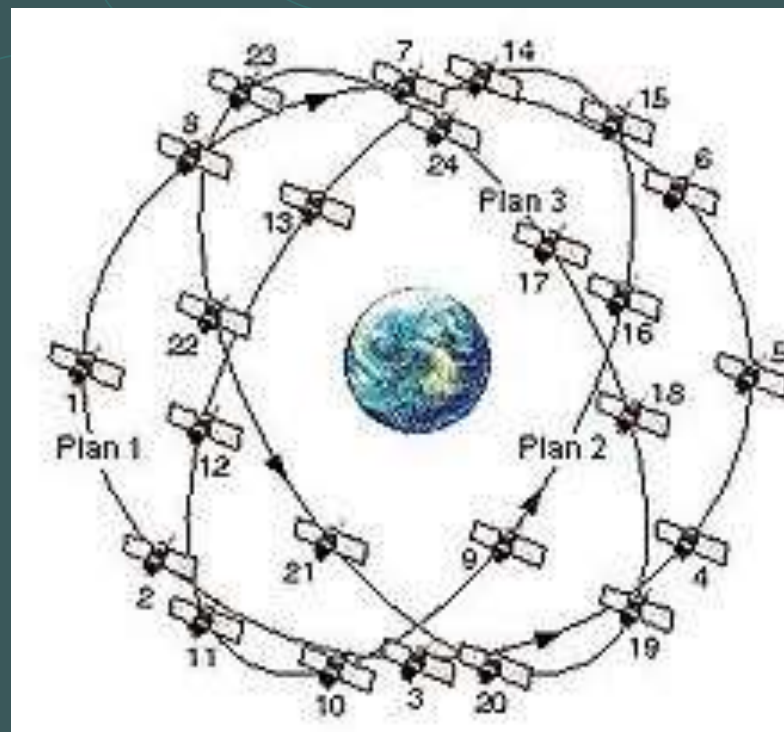
- Kosmický segment: aktivní umělé družice Země, téměř kruhové oběžné dráhy, výška cca 20 000 km, vybavena vysílačem, přijímačem, atomovými hodinami, energie ze solárních panelů, raketové motory, geocentrický celosvětový souřadnicový systém
- Řídící segment: řízení, monitorování družic - nastavení přesných efemerid (oběžných drah), uchování přesného času, hlavní řídicí stanice, monitorovací stanice – korekce drah satelitů, zpětná vazba se všemi satelity
- Uživatelský segment: uživatelé + přístroje + software
- Podpůrný segment (referenční síť)

Kosmický segment

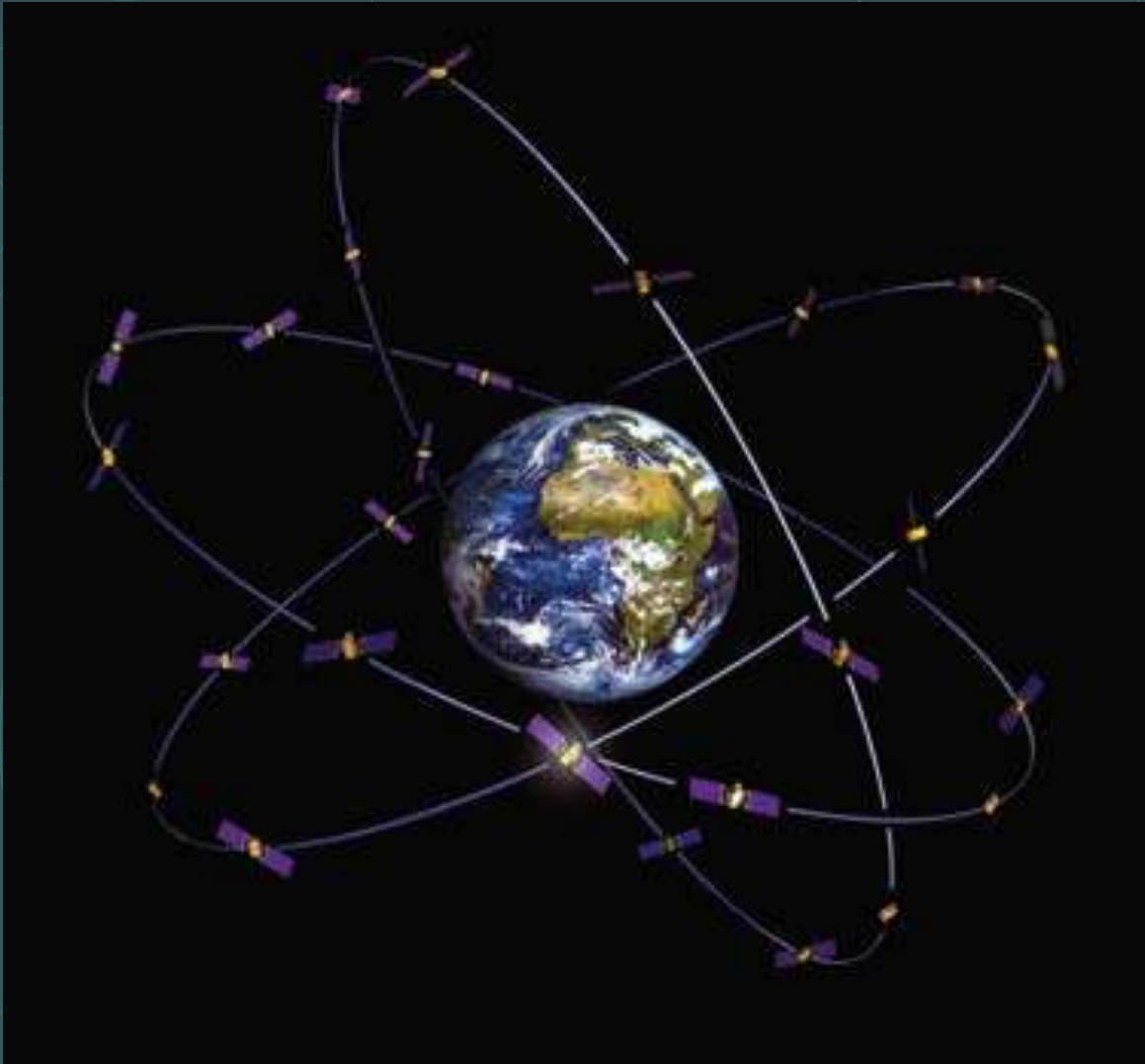
- družice GNSS obíhají Zemi v několika oběžných rovinách skloněných vůči rovníku o $55 - 65^\circ$
- obíhají na středně vysokých drahách 19 000 – 24 000 km nad Zemí (MEO-Medium Earth Orbit), dráhy jsou elipsy blízké kružnicím



GPS



Glonass



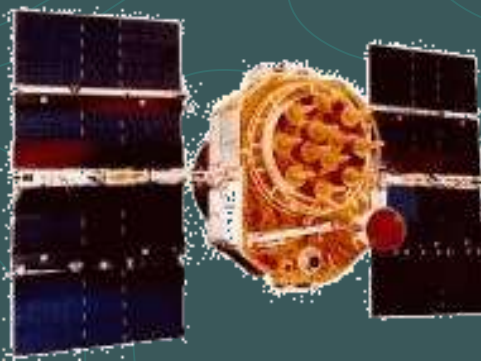
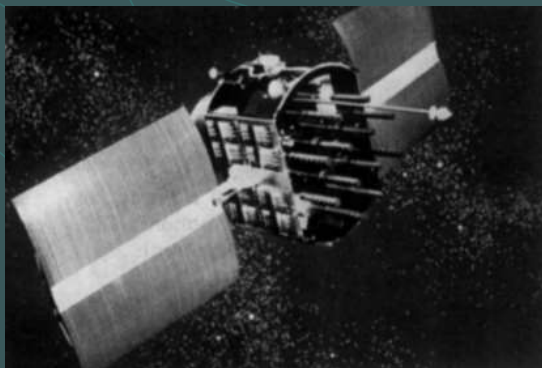
Galileo

Porovnání vybraných parametrů kosmických segmentů

Parametr	NAVSTAR	ГЛОНАСС	Galileo
Počet oběžných rovin	6	3	3
Projektovaný počet satelitů	21+3	21+3	27+3
Poloměr drah [km]	26560	25510	30000
Sklon rovin k rovníku [°]	55	65	56
Doba oběhu [hh:mm]	11:58	11:15	14:00
Aktuální počet satelitů (3/2016)	32(31)	28(23)	12(-2)

Základní vybavení družice

- generátor frekvence (atomové hodiny, oscilátor, frekvenční standard) - césiové, rubídiové, vodíkový maser, až 4 na družici
- antény vysílací i přijímací,
- stabilizační setrvačníky, solární panely, baterie, raketové motorky, odrazné hranoly aj.



Ukázky GPS družic bloku I, II a IIa a bloku IIF

- blok I - (1978) – zkušební (sklon 63 stupňů)
- II + IIa - (1989) – civilní signál (L1C/A)
- II R - (1995) – přesnější hodiny, poz. mezi

druž.

- II R-M - (2005) – 2. civilní signál (L2C)
- II F - (2007) – 3. civilní signál (L5)
- III - (2012) – zlepšení L1C

Signály GPS

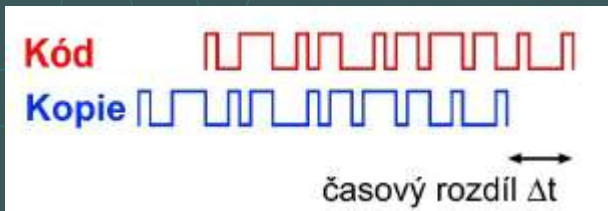
nosné frekvence

- L1 (1575,42MHz 19cm vlnová délka) modulována 2 navigačními kódy P a C/A
- L2 (1227,60Mhz 24cm) modulace P kódem (šifrovaným Y kódem)
- L5 (1176,45 MHz), družice IIF (rok 2010-16), v projektu GPSIII
- družicová navigační zpráva - obsahuje údaje o zdravotním stavu družic, pozici - efemeridy, korekce hodin, údaje o ostatních družicích - almanach, ionosféře, společné časové základně
- modernizace:
<http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/>

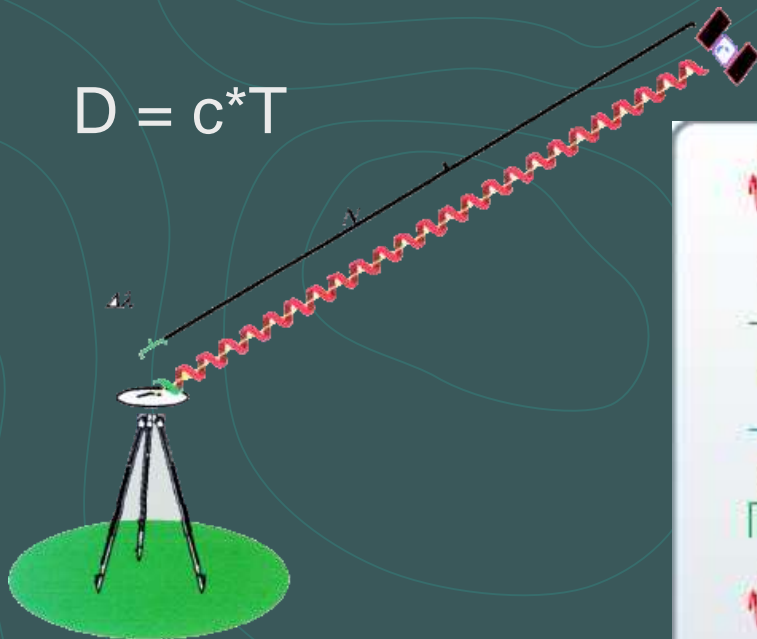
Struktura signálů

D pseudovzdálenost
T doba šíření PRN kódu
c rychlost světla

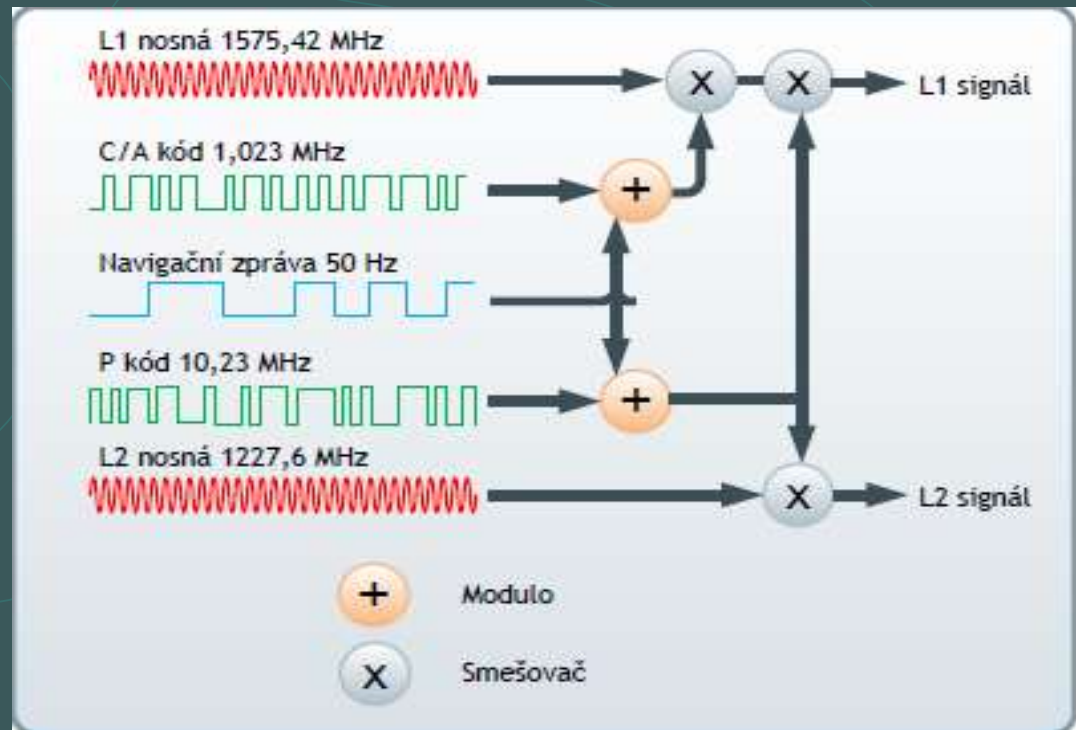
PRN kód – pseudonáhodný kód
(sekvence 0 a 1), unikátní pro
každou družici



$$D = c \cdot T$$



$$D = c \cdot T$$

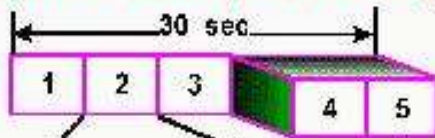


Navigační zpráva - struktura a obsah

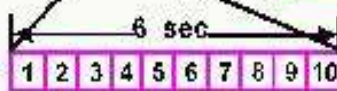
GPS message format

basic message format is one frame (1500 bits long)

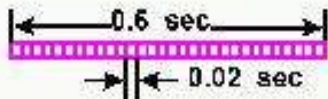
1 frame = 5 subframes



1 subframe = 10 words



1 word = 30 bits

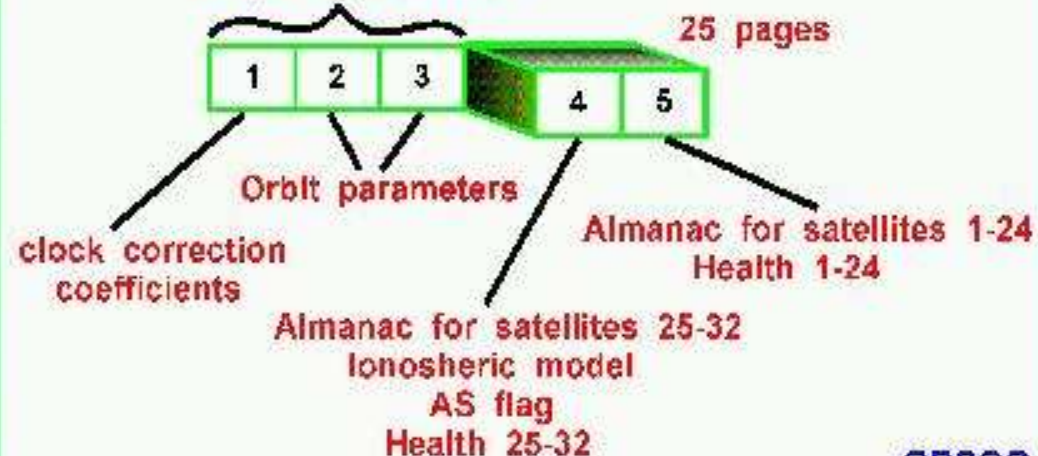


subframe 4 and 5
have 25 PAGES

one **MASTER FRAME** includes all 25 pages of subframes 4 & 5 = 37,500 bits taking 12.5 minutes

Navigation Message

unique to a satellite



Signály Glonass, Galileo

- Glonass – všechny družice používají stejné P a C/A kódy, ale odlišné nosné frekvence L1, L2 až Ln

<https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>

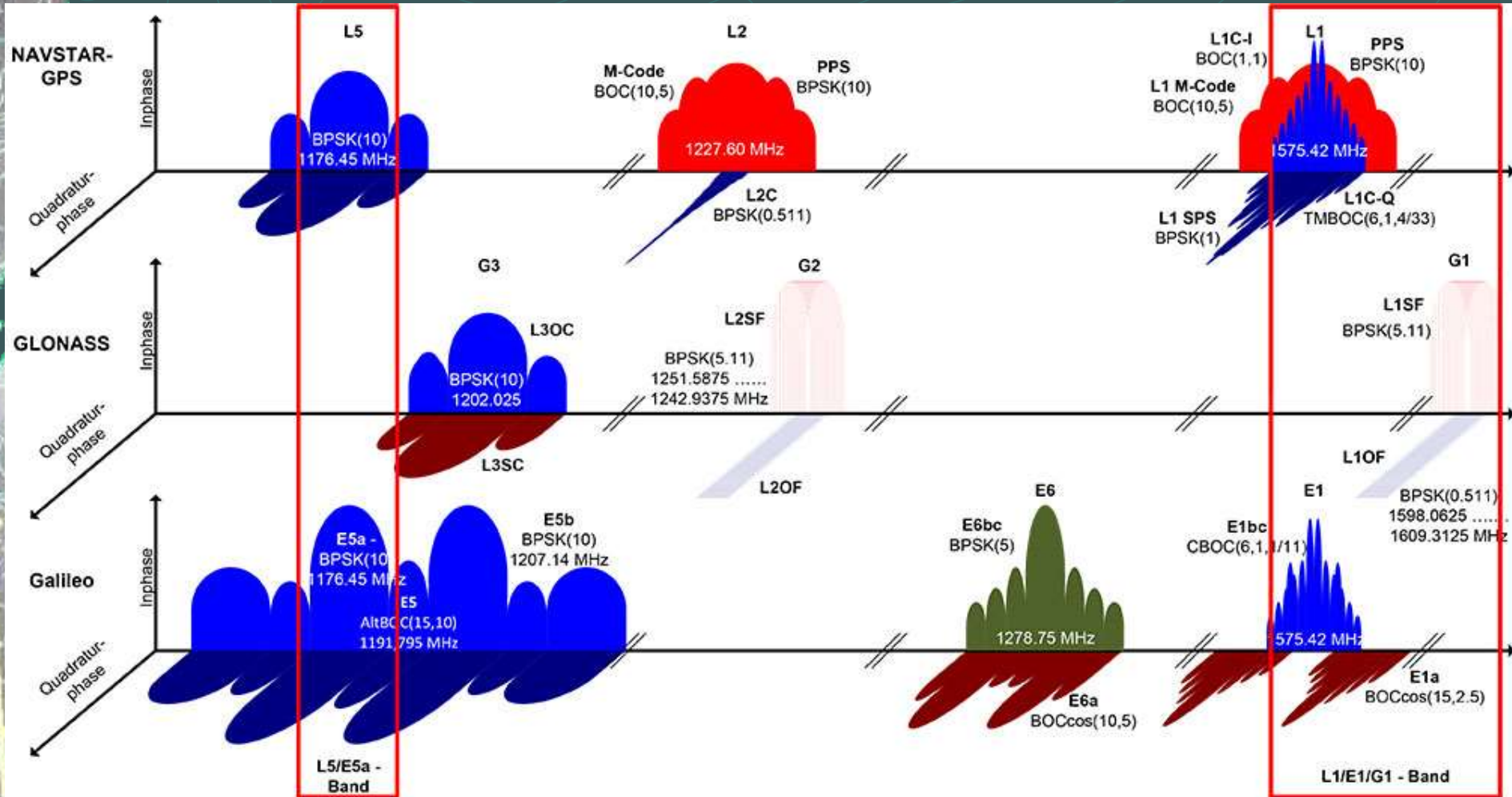
- Galileo – obdoba GPS, unikátní kódové signály pro každou družici, společné fázové signály L1 (stejná frekvence GPS), E5a, E5b a E6, modulace dle poskytovaných služeb

http://www.navipedia.net/index.php/GALILEO_Signal_Plan

17.11. „Fantastic Four“ – Galileo 15-18

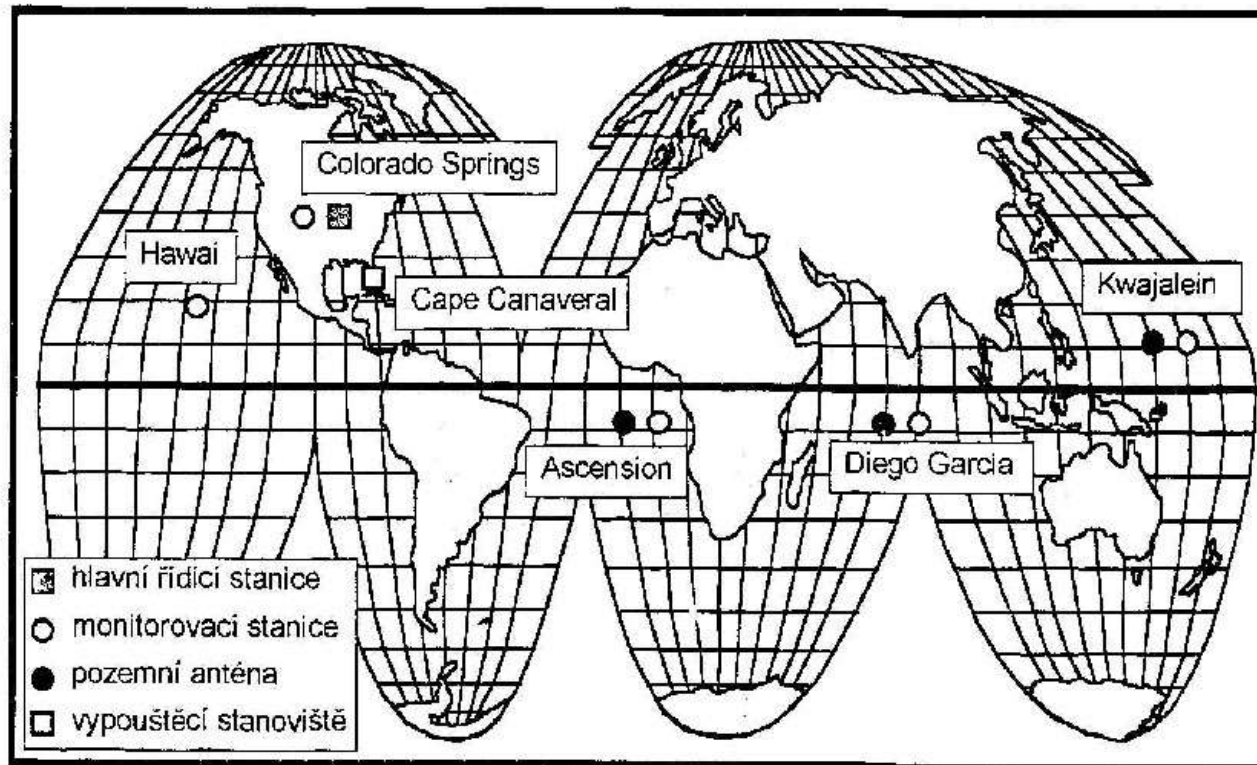
http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2016/11/Galileo_15-18_replay_-_part_2

Porovnání signálů GPS, Glonass, Galileo

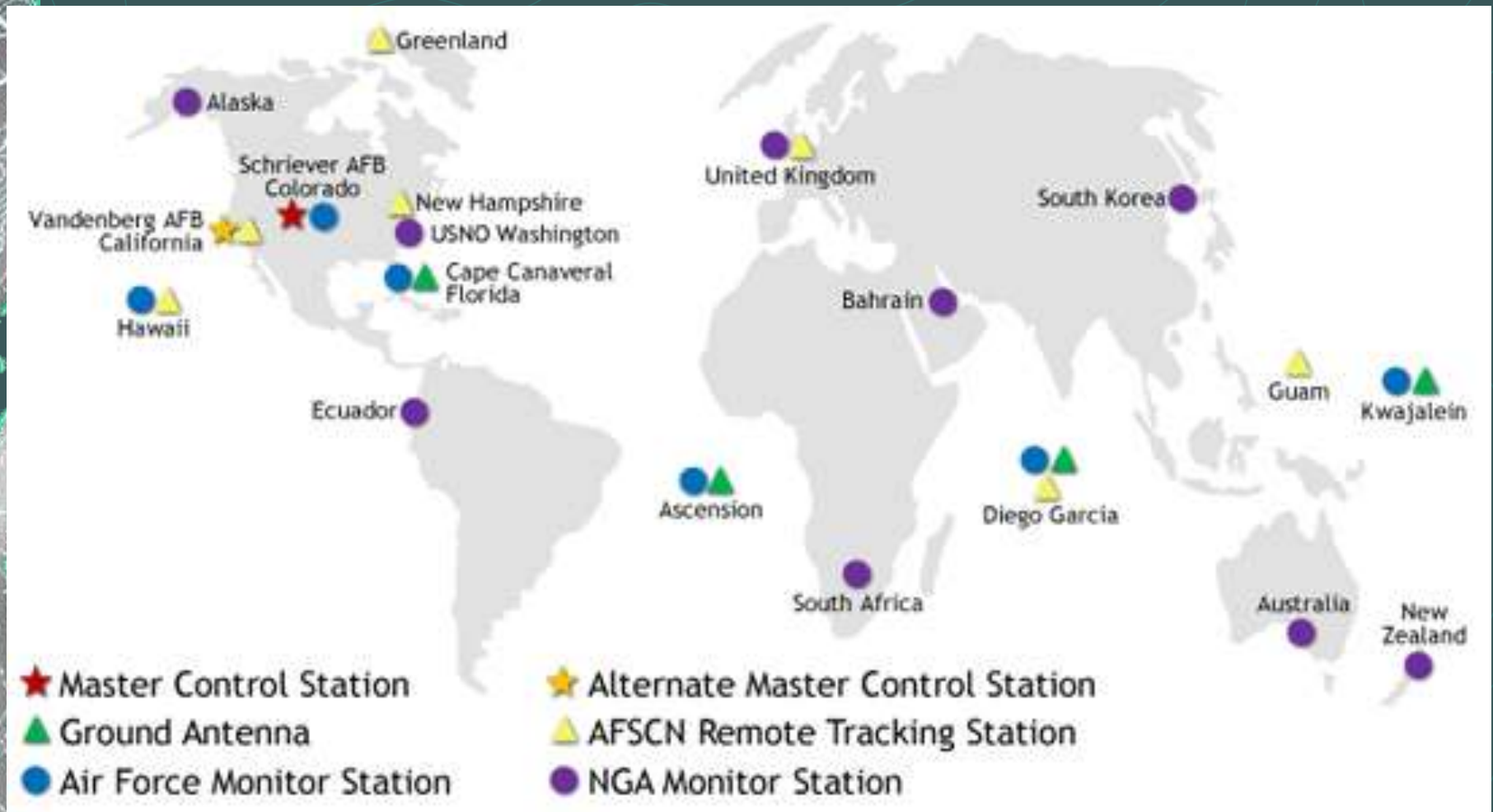


Řídící segment

- sestává z monitorovacích a řídicích stanic
- uchovává časový normál (pozemní atomové hodiny)
- přijímá signály z družic
- provádí výpočet drah družic a chodu jejich hodin
- vysílá tyto informace na družice, odkud jsou šířeny v navigační zprávě



Původní řídicí
segment systému
NAVSTAR - GPS






<http://www.gps.gov/systems/gps/control/>

Řídící segment systému GLONASS

Схема размещения средств наземного сегмента СРНС ГЛОНАСС



-  – Центр управления системой (ЦУС)
-  – Квантово-оптические станции (КОС)
-  – Командные станции слежения (КСС)
(цифра – номер ОКИК дислокации КСС)

- СКФ – Система контроля фаз
- КС – Контрольная станция
- АКП – Аппаратура контроля поля
- ЦС – Центральный синхронизатор

Řídicí segment systému Galileo



Galileo Control Centre,
Fucino, Italy



Galileo Control Centre,
Oberpfaffenhofen, Germany



Galileo ground
station, Kourou,
French Guiana



Galileo in-orbit testing facilities,
Redu, Belgium



TTC antenna, Kiruna, Sweden



Sensor station, Svalbard, Norway

http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Galileo_on_the_ground

Evropský civilní družicový navigační systém GALILEO

5 druhů služeb:

- **Základní služba (Open Service - OS)** – základní signál, poskytovaný zdarma;
- **Služba "kritická" z hlediska bezpečnosti (Safety of Life service - SoL)** – je službou, která bude primárně zlepšovat základní službu OS tím, že během několika sekund varuje uživatele v případě, že z nějakého důvodu dojde k nedodržení garantovaných limitů systému (přesnost apod.). Jedná se rozšířený signál zahrnující integrovanou funkci a je předurčena především pro bezpečnostně-kritické aplikace, které vyžadují garanci signálu. Využití je předpokládáno především v kritických dopravních aplikacích (při řízení letového provozu, automatické systémy přistávání letadel apod.). Služba by měla být certifikována z hlediska mezinárodních standardů Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO) a pravidel Otevřeného nebe (Open Sky regulations);
- **Komerční služba (Commercial Service - CS)** – na rozdíl od služby základní využívá ještě další dva signály. Tyto signály jsou chráněny díky komerčnímu kódování, které bude řízeno poskytovateli služeb a budoucím Galileo operátorem. Přístup je kontrolován na úrovni přijímače, kde se využívá přístupového klíče;
- **Veřejně regulovaná služba (Public Regulated Service - PRS)** – dva šifrované signály, s kontrolovaným přístupem a dlouhodobou podporou, určené pro státem vybrané uživatele, především pro bezpečnostní složky státu;
- **Vyhledávací a záchranná služba (Search And Rescue service - SAR)** - služba nouzové lokalizace v rámci celosvětové družicové záchranné služby COSPAS/SARSAT s možností oboustranné komunikace;

Uživatelský segment

- široka paleta typů zařízení sloužící koncovým uživatelům
- jejich přesnost a využití závisí na počtu přijímaných frekvencí (u GPS jednofrekvenční a dvoufrekvenční), přijímaných signálů (kódových, fázových) a korekčních údajů z podpůrného segmentu
 - začínají se prosazovat a do budoucna poroste počet zařízení kombinujících více systémů GPS NAVSTAR, GLONASS, Beidou a Galileo

Hlavní součásti zařízení

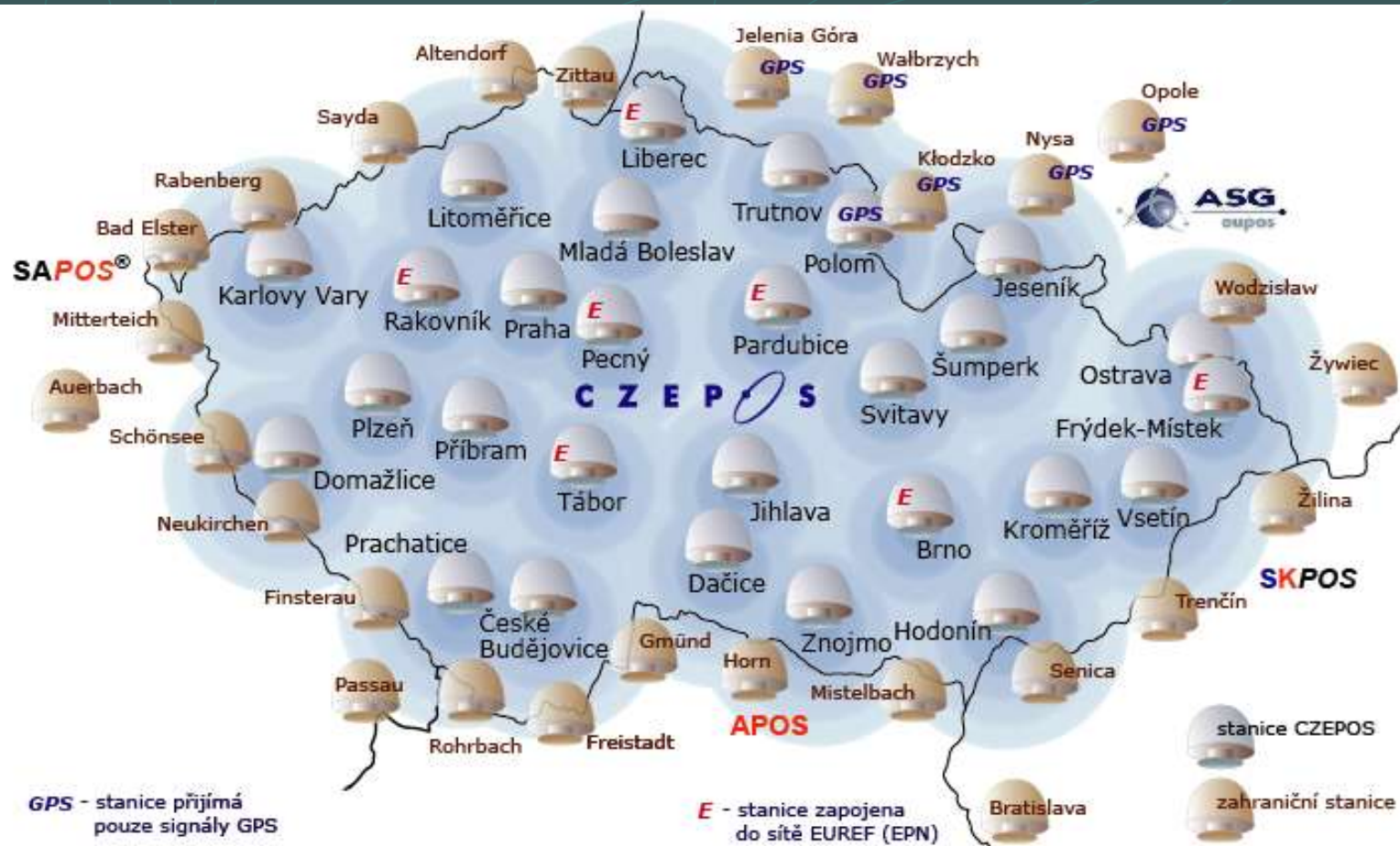
- anténa (samostatná, vestavěná)
- přijímač (oscilátor - křemenné hodiny, demodulátor, korelátor, fazový článek + čítač, paměť, napájení (baterie))
- zařízení pro mobilní připojení...
- speciální přijímače jsou jen pro příjem časového signálu

Podpůrný segment

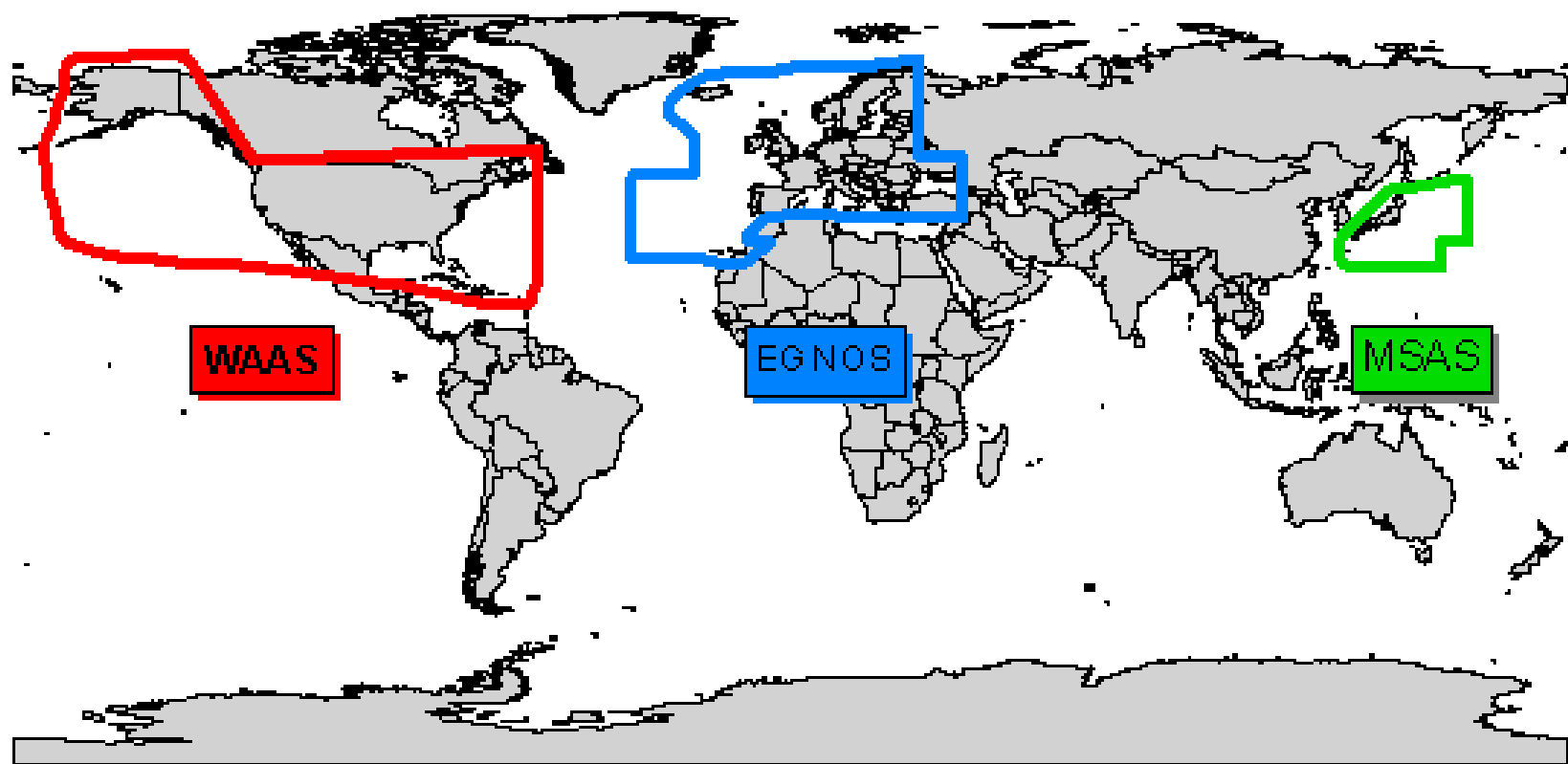
systemy zvyšující v reálném čase základní přesnost GNSS:

- Družicové systémy - pomocí družic na geostacionárních drahách – SBAS (Satellite Based Augmentation Systems) např. EGNOS, WAAS, Omnistar, Firestar, ...
- Pozemní systémy - stanice permanentně provozovaných přijímačů či jejich sítě) např. CZEPOS, SAPOS, SKPOS, SWEPOS, Poskytují výpočet několika možných typů korekcí a distribuce těchto korekcí koncovému uživateli (radio, GSM, internet)

CZEPOS – Česká síť permanentních stanic



Regiony s možností příjmu korekčních signálů z geostacionárních družic



EGNOS

(European Geostationary Navigation Overlay Service)

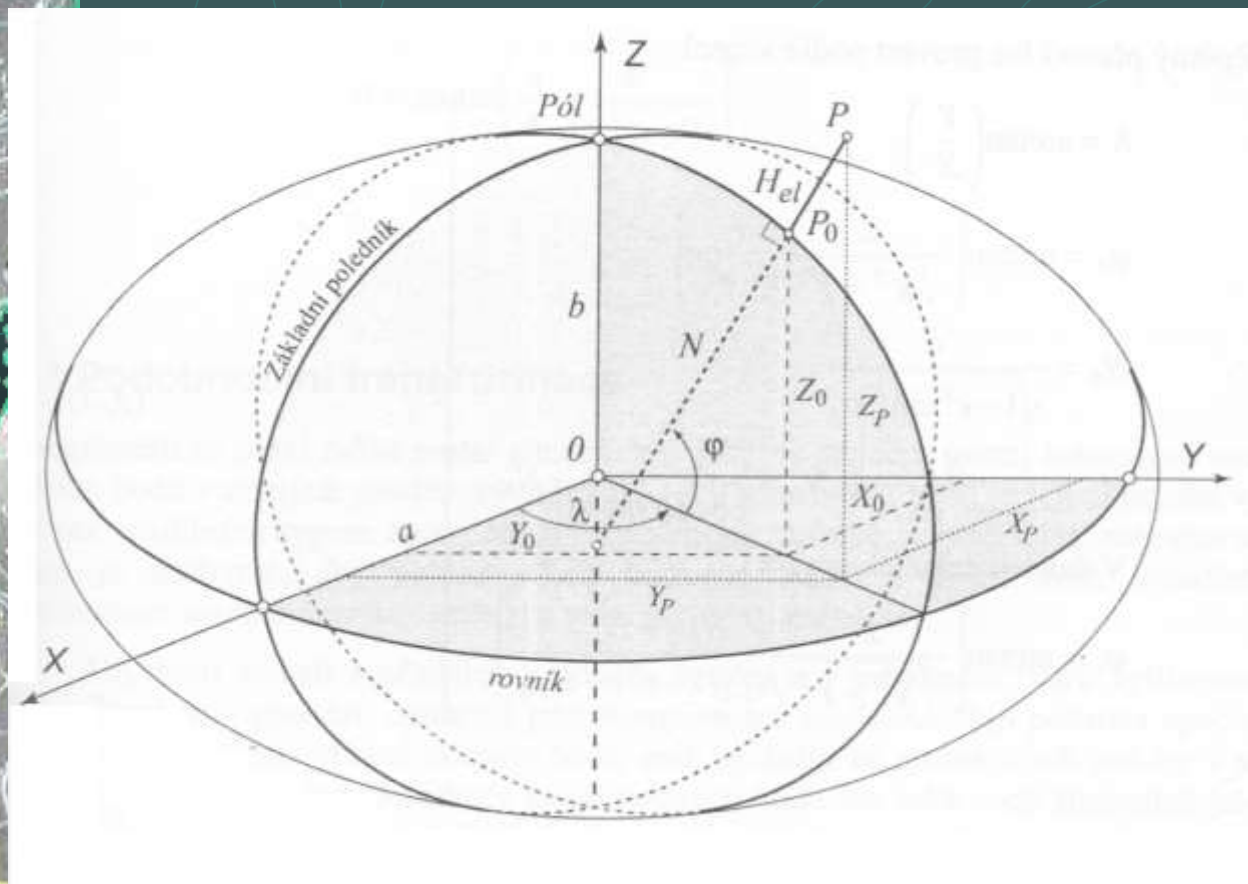
- Systém **EGNOS** je evropský projekt, který formou diferenciálního signálu poskytuje korekce k signálu GPS. Korekce jsou poskytovány pro území Evropy a jsou důležité pro eliminaci chyb, jimiž jsou vysílané signály nevyhnutelně zatíženy. Zpracováním diferenciálního signálu v GNSS přijímači dochází ke zpřesnění určení polohy. (řádově v jednotkách metru 1-2m)
- EGNOS je aplikace systému SBAS (Satellite Based Augmentation System), který je vyvíjen společně Evropskou kosmickou agenturou (ESA), Evropskou komisí (EC) a Evropskou organizací pro bezpečnost leteckého provozu (EUROCONTROL).
- V dubnu roku 2009 bylo převedeno veškeré vlastnictví systému EGNOS z Evropské kosmické agentury na Evropskou komisi a oficiálně byl systém spuštěn v říjnu 2009.

Evropská síť permanentních stanic GPS - EUREF



Souřadnicový systém WGS-84

kartézský souřadnicový systém WGS-84 je definován geometrickými a dynamickými parametry



Geometrické parametry elipsoidu WGS-84:
a ... hl. poloosa [m]
f ... zploštění

Dynamické parametry:
 ω ... úhlová rychlost rotace Země [rad s⁻¹]

J_2 ... Stokesův zonální koeficient 2. stupně

GM ... geocentrická gravitační konstanta [m³s⁻²]

Ukázka číselných hodnot pravouhlých souřadnic v [m]:

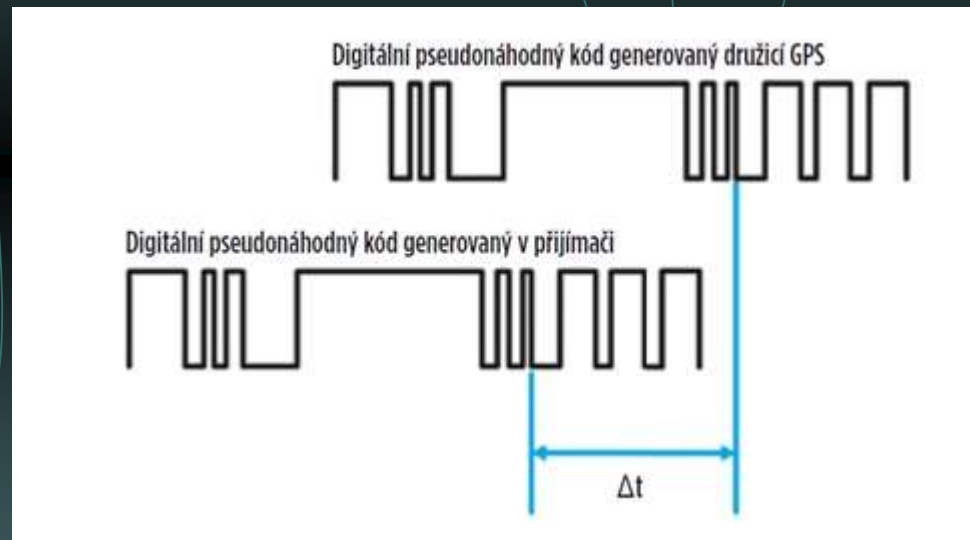
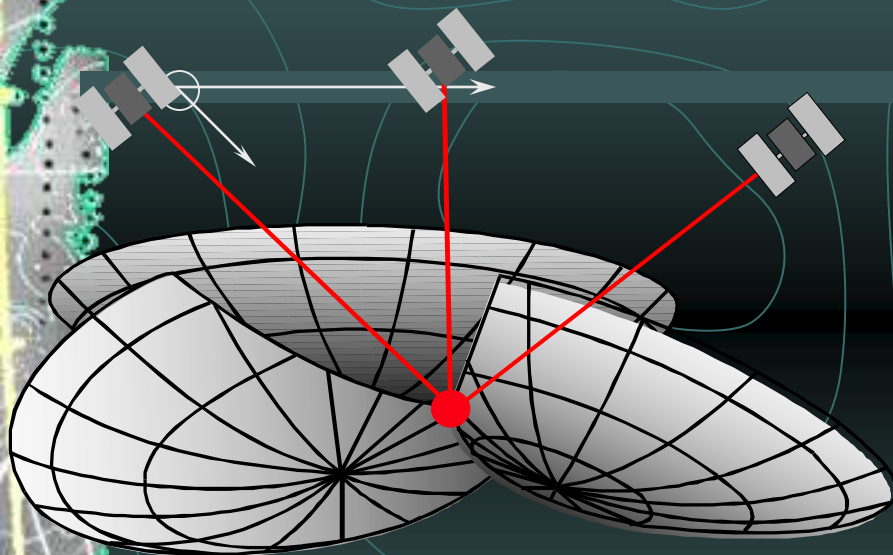
X = 3 920 890,225 Y = 1 182 869,142 Z = 4 874 664,898

Princip určení polohy

- zpracováním signálu současně z minimálně 4 satelitů je určena prostorová poloha ve světovém geocentrickém souřadnicovém systému WGS-84
- princip určení polohy založen na měření časového intervalu šíření signálu od satelitu po přijímací aparaturu

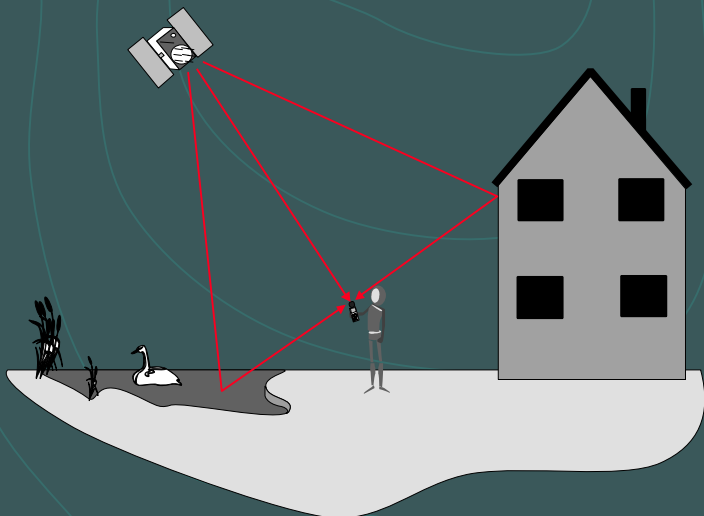
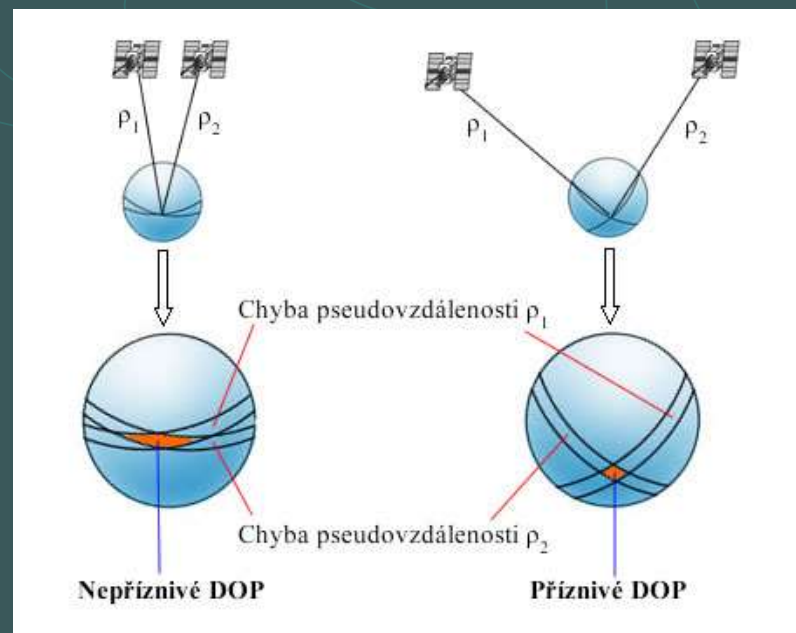
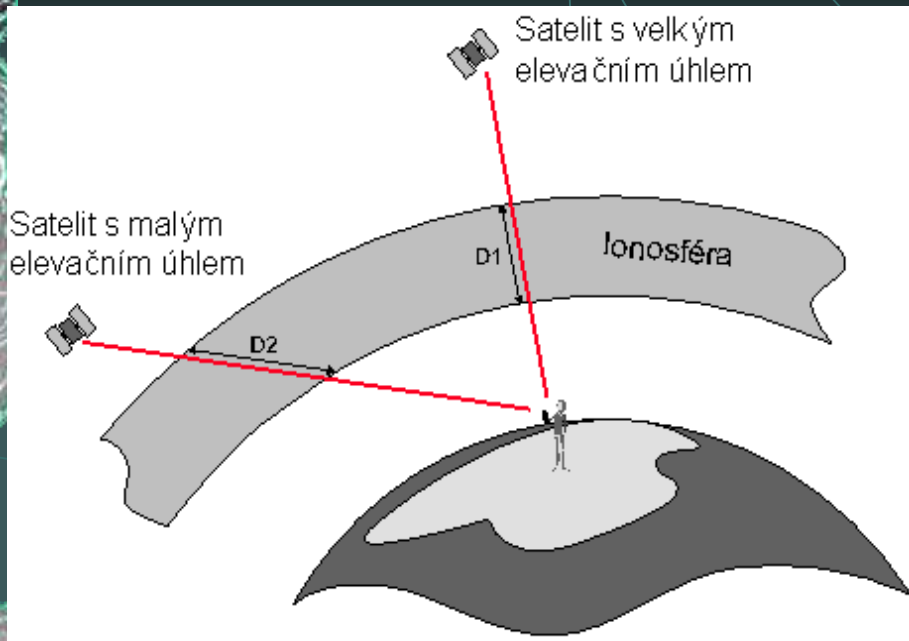
$$d = c \cdot t$$

kde d ... pseudovzdálenost
 c ... rychlost šíření elektromag. vln
 t ... tranzitní čas

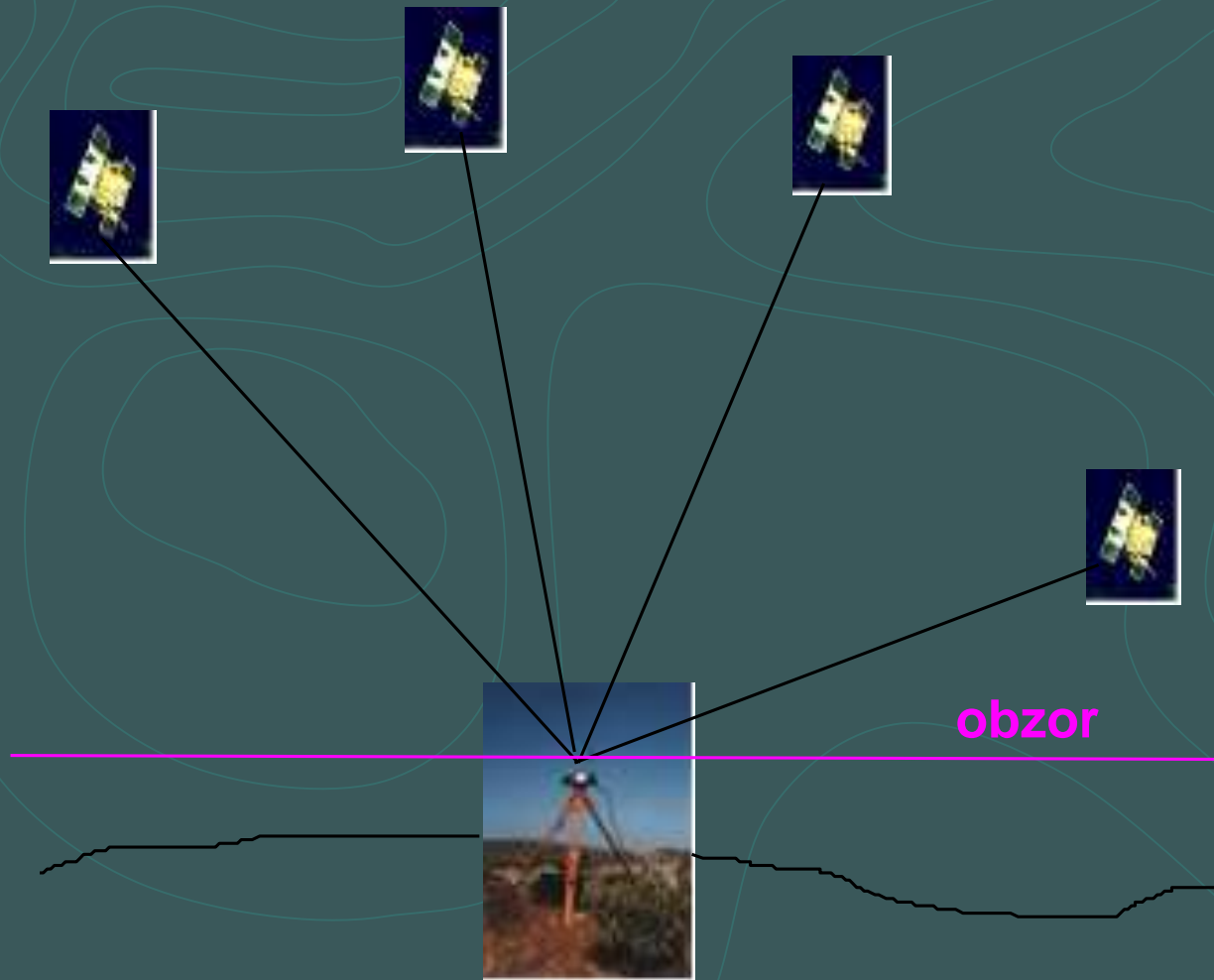


Faktory ovlivňující GNSS měření

- DOP - ukazatel kvality konfigurace družic (GDOP, PDOP, TDOP, HDOP, VDOP,
https://en.wikipedia.org/wiki/Dilution_of_precision_%28GPS%29
- počet viditelných družic
- stav družic (info v navigační zprávě)
- synchronizace hodin, chyba hodin přijímače
- vliv atmosféry - ionosférická refrakce (lze odstranit 2 fázemi) troposférická refrakce (určení pomocí atmosférických podmínek)
- poměr signálu /šum
- Multipath - odraz od okolí, řeší se pomocí speciálních antén
- vliv přesnosti určení parametrů drah satelitů
- vliv excentricit fázových center antén (kalibrace antén)



Podmínky pozorování družic GPS dobré

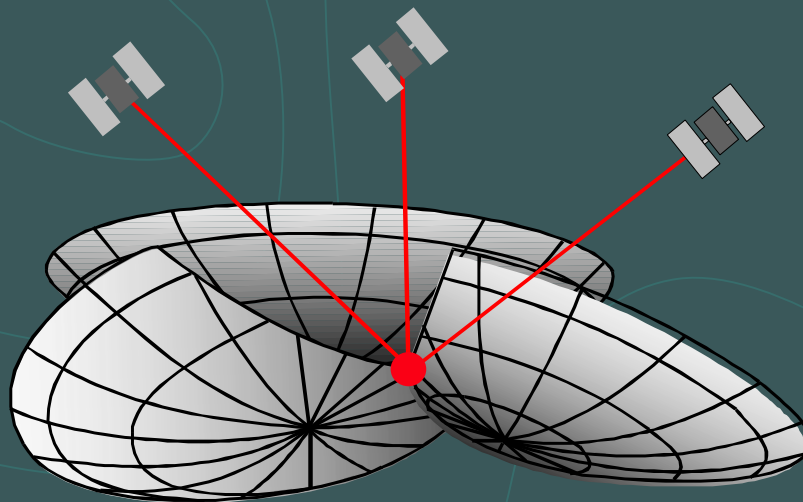


Podmínky pozorování družic GPS špatné



Metody určování polohy - Absolutní

při použití 1 přijímací družicové aparatury
Přesnost určení prostorové polohy
v reálném čase 3 m až 10 m
postprocessing 0,5 m – 2 m



Relativní určování polohy

použití min. 2 a více současně měřících družicových aparatur nebo korekce:

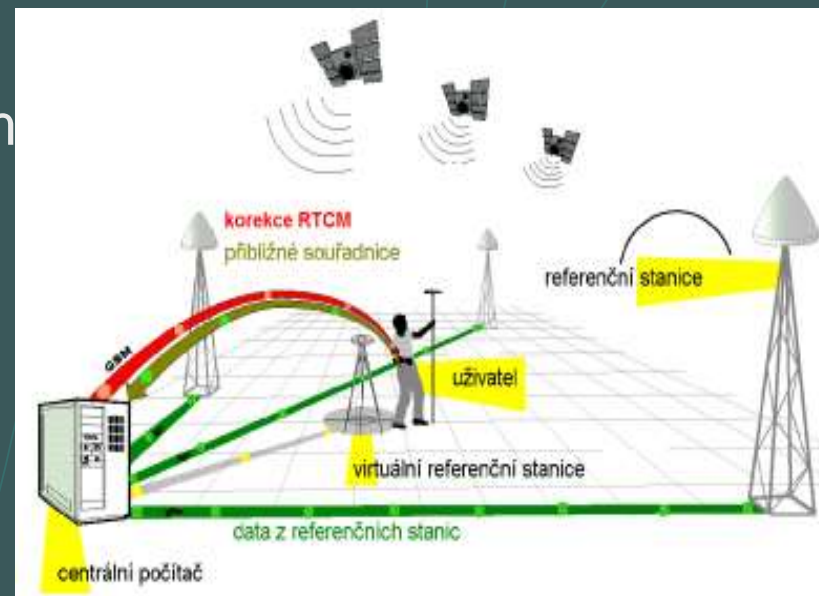
radiomodem, rádiové vlny (GS družice), mobil, družicové systémy Firestar aj., vlastní 2.přijímač, virtuální (pseudo) družice, referenční systémy (v ČR Czepos, VRSnow, TopNet)

Přesnost určení prostorové polohy v reálném čase

DGPS (kódově) 0,1 m až 1 m

RTK (fázově) 20 mm až 5 mm

postprocessing 20 mm až 3 mm



Druhy GNSS přijímačů

Geodetické (velmi přesné - cm, kombinace příjmu několika systémů, mapové a výpočetní prostředky, mobilní mapování – integrace s GIS, prostorově určené fotografie, laserové dálkoměry)



Navigační

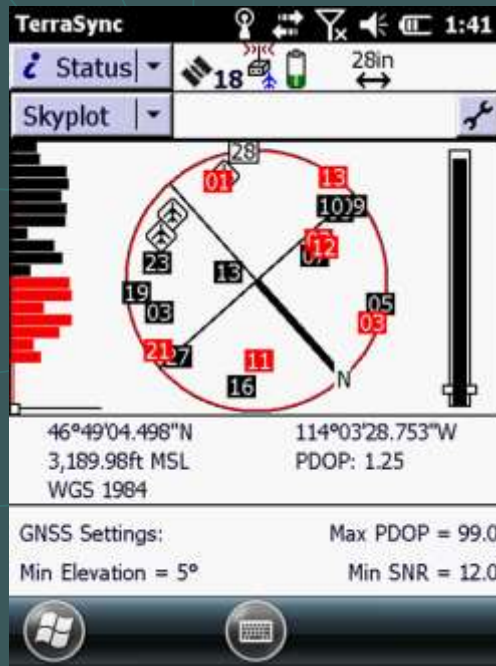
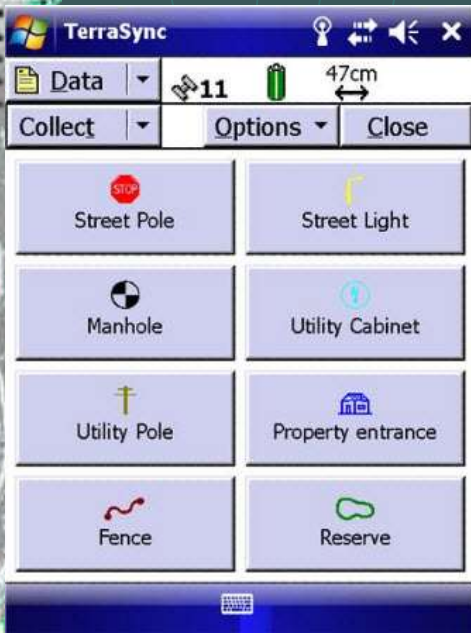
- ⑩ turistické, sportovní, letecké, námořní, telematika, krizové řízení
....
- ⑩ přesnost řádově jednotky m, odolné, s mapovými podklady, mobilní, levné, doplňky



Přijímače pro časovou synchronizaci

Mobilní mapování pro GIS

- Přesnost dcm až cm, sběr dat pro GIS
- mapové podklady – ortofotosnímky
- kreslení – bod, linie, plocha, mapové značky
- možnost připojit dálkoměr, udělat fotku
- různé softwary – ArcPad, Terrasync



Smartphony, tablety



- zabudovaný chip, jednoduché navigační programky, aplikace i pro sběr dat, elektronické kompasy, geocaching, méně přesné, A-GPS

AndroiTS GPS Test Free



Locus Map (Free, Pro)

<http://docs.locusmap.eu/doku.php?id=cz:manuale:user+guide:maps+mainscr+ctrl>

GNSS v praxi

- Krizové řízení (hasiči, policie, záchranná služba) – systém pasivního i aktivního sledování a navigování, koordinace při katastrofách (GINA - <https://www.youtube.com/watch?v=UQFOwf3lhVE>)
- Stavebnictví – navádění těžebních strojů, důlní činnosti, stavba komunikací - terén. úpravy (<https://www.youtube.com/watch?v=Y-wkRaQUf00>)
- Zemědělství – „Precision farming“, evidence hnojení, sklizně, navádění strojů (<http://www.youtube.com/watch?v=QYyvrY5pj2E>)
- Státní správa – mapování zájmových vrstev pro městské informační systémy (životní prostředí, inženýrské sítě, komunikace, dopravní značení atd.)
- Doprava – železniční, námořní, letecká, silniční, MHD – sledování, logistika, bezpečnost
- Životní prostředí – ohrožené lokality, rostliny, živočichové

Co GNSS neumí

- Práce v zastíněných prostorech (husté lesy, interiéry budov, podzemní prostory),
- Problematické mohou být i body s omezeným obzorem – rohy budov, kraje lesa.
- GNSS měří polohu 1 bodu (případně trasu). Měření úhlů či sklonů je časově náročné.
- Nelze určit polohu nepřístupného bodu (dá se řešit přidavným zařízením)

Na co si dát pozor při užívání GNSS

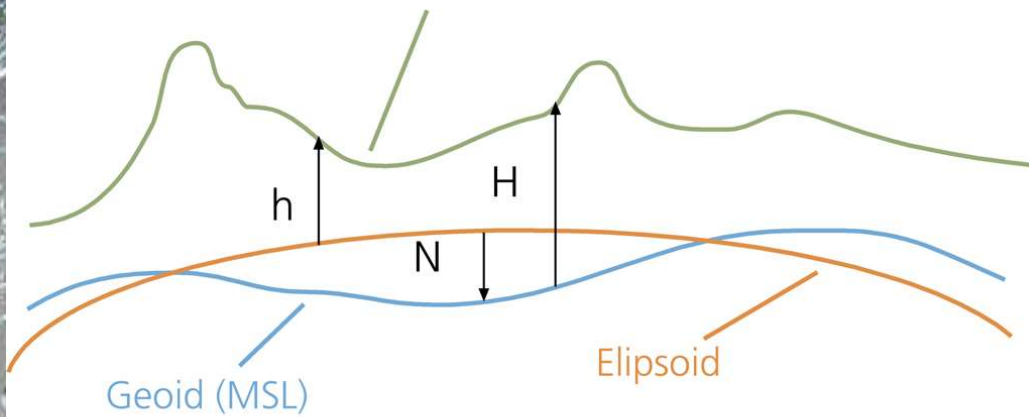
- Dostupnost signálu, výběr vhodné technologie s ohledem na požadovanou přesnost
- Rušení signálu, vícecestné šíření signálu
- Různé souřadnicové systémy na přijímači x mapové podklady (WGS-84 x S-JTSK, BpV, MSL x HAE) a jejich konverze při zpracování

Není výška jako výška

- Běžné nadmořské výšky v mapách jsou vztaženy (zjednodušeně řečeno) nikoli k elipsoidu, ale k tzv. geoidu, tedy k nepravidelnému tělesu, které je fyzikálně definováno jako soubor bodů se stejným grav. potenciálem.
- Geoid kopíruje do určité míry reliéf, tj. v např. horských oblastech je jaksi vyboulený.
- Elipsoid je všude pravidelný (elipsoid definuje pár parametrů, globální geoid obrovsky soubor dat).
- V horách a jejich okolí je rozdíl mezi elipsoidickými a geoidickými výškami výraznější, přičemž elipsoidická výška(GPS) bude mít v horách vyšší hodnotu)

$$h = H + N$$

Topo surface (earth surface or GPS antenna)

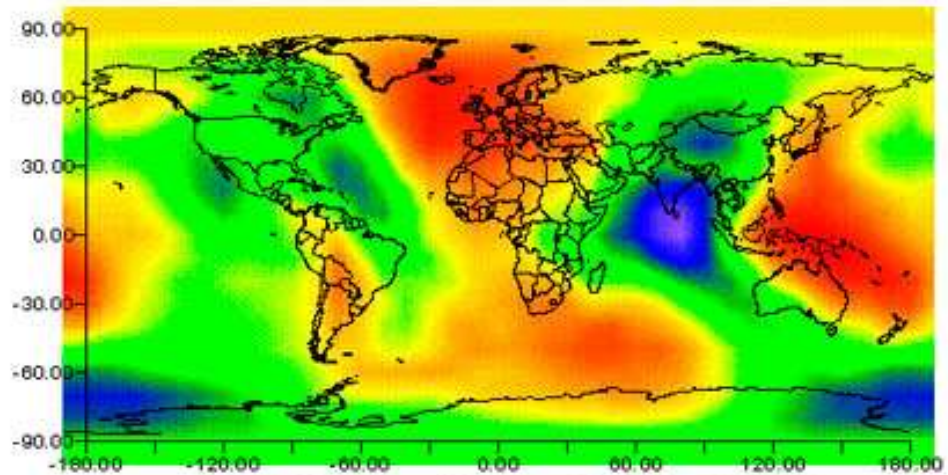


Geoid (MSL)

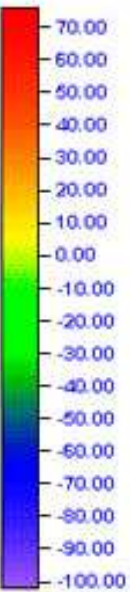
Ellipsoid

h =ellipsoid height
 H =orthometric height
 N =geoid height

WGS-84 Geoid Height



From DMA 10 by 10 Degree Geoid Height Grid



Meters

Omyly a chyby navigačních zařízení

- polohová chyba – dána uvedenými přírodními faktory, omezením „hardwaru“ přijímače, okamžitým výpočtem
- mapová chyba – nepřesnost v digitálních podkladech, neaktuálnost, chybějící parametry (atributy – jednosměrky, kruháče, víceproudovky) – známé výroky řidičů „ale navigace mi tam ukázala cestu“, navigační chyba – různé algoritmy síťových grafů, aktualizace, fóra, „selský rozum“

<http://forum.navigovat.mobilmania.cz/viewtopic.php?f=1852&t=1248462>

<http://tn.nova.cz/clanek/ridic-kamionu-veril-navigaci-a-sjel-na-cyklostezku-uvizl-na-moste.html>



Budoucnost a perspektivy GNSS

- Více satelitů, systémů = rychlejší a přesnější určení polohy („víc čárek – víc adidas“ 😊)
- Integrace do mobilních čipů – současné smartphony běžně GPS+Glonass, čínské i Beidou, zatím Galileo stranou
- Vývoj kombinace měření GNSS, IMU, INS – odstraněn problém s uzavřenými prostory (Indoor navigace) – softwarová cesta řešení
- GNSS všude kam se podíváš



Děkuji za pozornost

