

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Globální navigační satelitní systémy a jejich využití v praxi

SOUŘADNICOVÉ SYSTÉMY A TEORIE GNSS

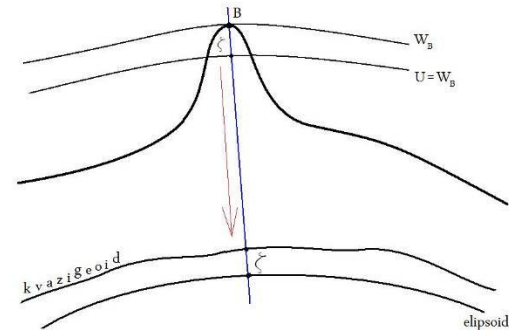
Ing. Zdeněk Láška (GEODIS BRNO, spol. s r.o.)

Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



Tělesa nahrazující Zemi

- **GEOID** - Ekvipotenciální plocha o tíhovém potenciálu W_0 , nelze exaktně matematicky definovat
- **KVAZIGEOID** - Náhradní geometrická plocha geoidu, která je matematicky definovatelná.

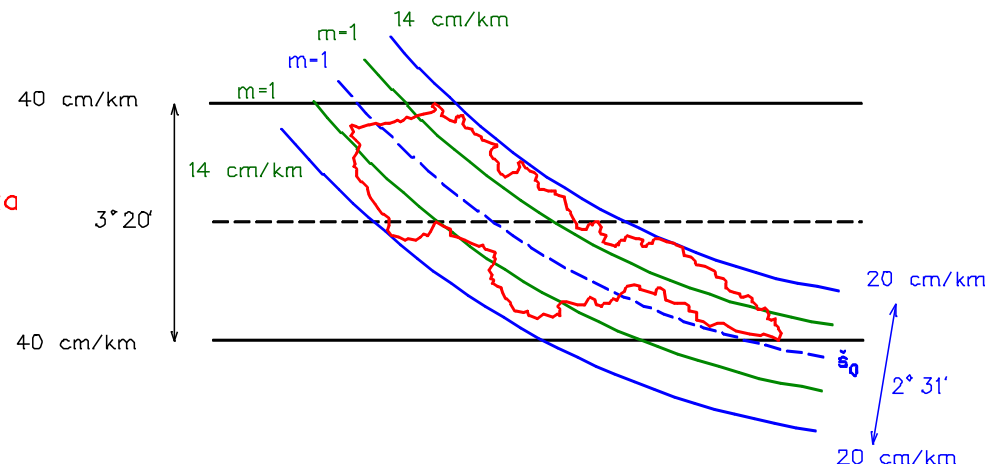
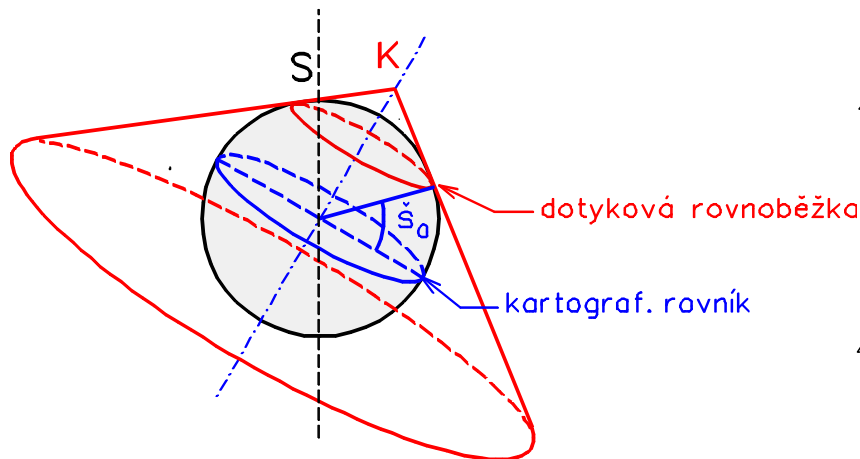


- **ELIPSOID** - V případě zemského rotačního elipsoidu se malá osa elipsoidu ztotožňuje s osou rotace Země a velká poloosa vytváří při své rotaci rovinu rovníku.
- **KOULE** - používá se často pro aproximaci menšího území, kde vhodnou volbou poloměru koule se můžeme značně přiblížit elipsoidu



Souřadnicové systémy

- **S-JTSK** – (systém jednotné trigonometrické sítě katastrální) rovinný, ČR, SR, dvojité konformní kuželové zobrazení, el. Bessel 1841
- **Bpv** – (Balt po vyrovnání) výškový systém, nulový výškový bod v Kronštadt, používá normální Moloděnského výšky.



9.9.2010

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

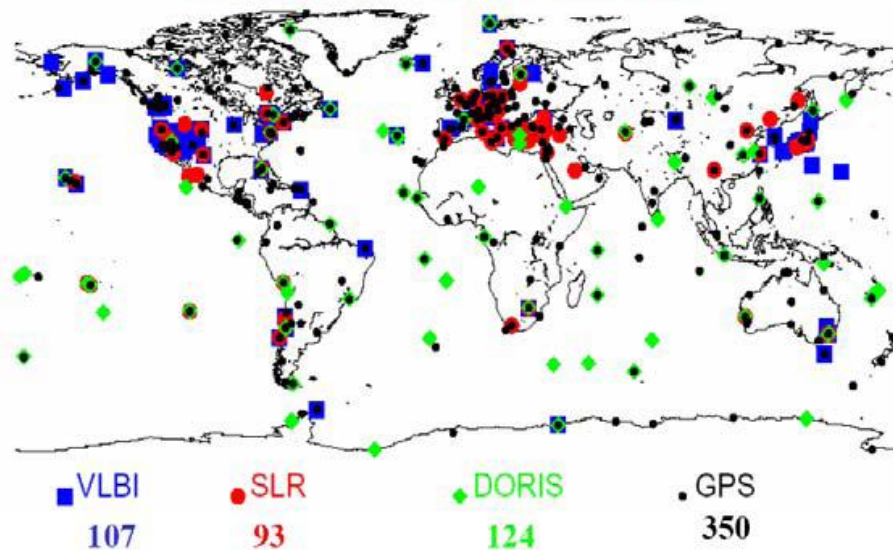




Souřadnicové systémy

- **WGS84** – vojenský prostorový systém, el. WGS 84, geocentrický, poslední realizace byla ztotožněna s ITRS 2000, výšky elipsoidické
- **ITRS** – celosvětový prostorový, GRS 80, výšky elipsoidické, roční změna souřadnic řádově centimetry

ITRF2005: Co-locations





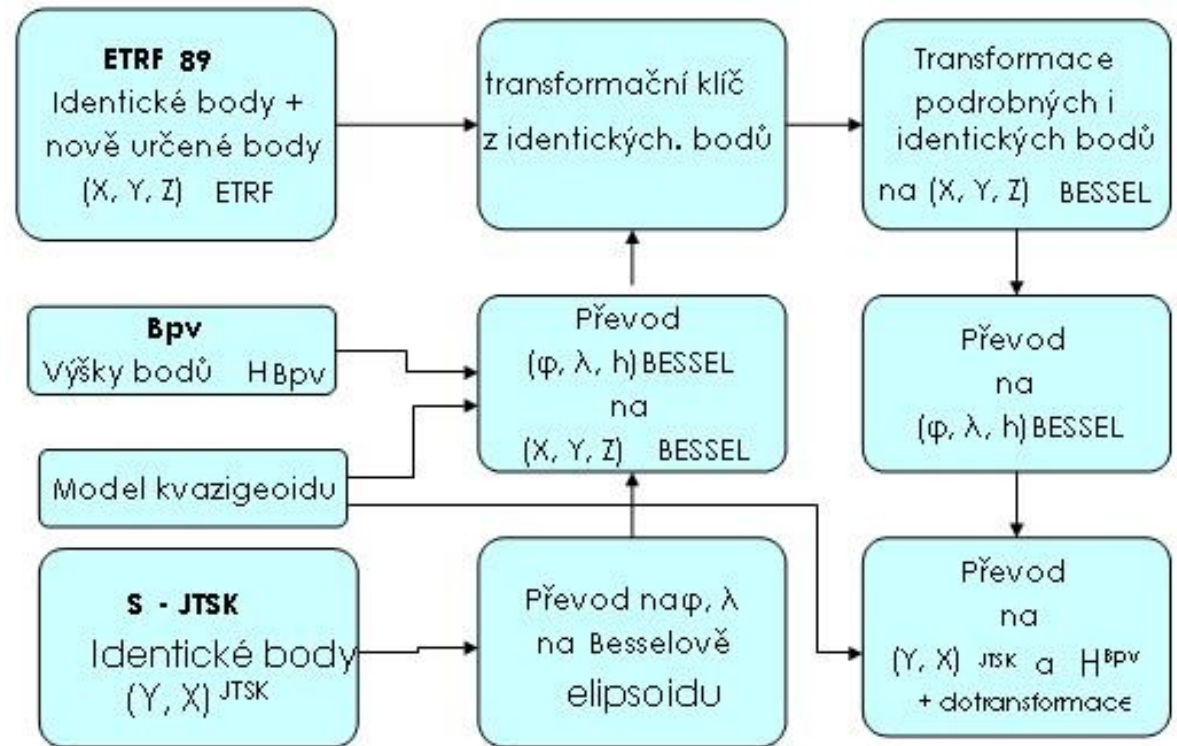
Souřadnicové systémy

- **ETRS** – evropský prostorový geocentrický, el. GRS 80, výšky elipsoidické. Je svázán s euroasijskou deskou, tudíž změny polohy bodů na evropském kontinentu v tomto systému jsou řádově menší než v ITRS
- **UTM** – (universal transversal mercator), el. WGS 84, jedná se o síť šedesáti 6° zón, zobrazených pomocí transverzálního Mercatorova zobázení do roviny.



Transformace mezi souřadnicovými systémy

- WGS 84–UTM
- ITRS2000–ETRS1989
- ETRS1989-S-JTSK



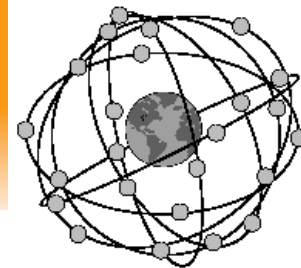


Globální navigační satelitní systémy

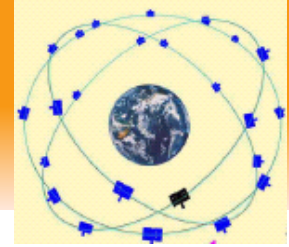
- **Kosmický segment** - zahrnuje aktivní umělé družice Země, jejichž poloha je kontinuálně určována v jednotné celosvětové geocentrické souřadnicové soustavě. Téměř kruhové dráhy, výška družic cca 20000 km nad Zemí. Každá družice je vybavena přijímačem, vysílačem, atomovými hodinami, solárními panely a raketovými motory.
- **Řídící segment** – vytváří a udržuje systémový čas, průběžně monitoruje a koordinuje činnost celého systému, provádí manévry satelitů. Skládá se z hlavní řídicí stanice a několika monitorovacích stanic, které nepřetržitě přijímají signály ze všech družic. Tyto data se zpracují v hlavním řídicím centru, vypočtou se korekce drah a hodin družic a ty jsou vysílány na družice. Družice pak tyto informace vysílají v navigační zprávě uživatelům.
- **Uživatelský segment** - zahrnuje pozemní přijímače schopné přijímat a zpracovávat družicové GNSS signály.



GPS



- Americký vojenský navigační systém, někdy označovaný jako NAVSTAR (Navigation System using Time and Ranging). Plně funkční od 17.7.1995.
- Vysílá na frekvencích L1 (1575,42 Mhz), L2 (1227,60 Mhz) a L5 (1176,45 Mhz) na tyto nosné vlny se moduluje P-kód, C/A kód, L1C nebo L2C kód. Všechny družice vysílají na stejných frekvencích, ale každá družice používá odlišnou sekvenci kódů (kódová identifikace družic).



- Ruský vojenský navigační systém, vyvíjený od roku 1972. Na rozdíl od GPS používá frekvenční identifikace družic (FDMA – frequency division multiple access). Všechny družice používají stejnou sekvenci C/A a P kódů, ale každá družice vysílá odlišné nosné frekvence L1 a L2 ($f_1=1602 \text{ Mhz} + 0.5625n$, $f_2=1246 \text{ Mhz} + 0.4375n$, kde n ...číslo frekvenčního kanálu družice $n=-7,-6,\dots,5,6$). Plánovaný počet družic je 21+3 rozmístěných rovnoměrně na 3 oběžných drahách.
- Používá geocentrický systém PZ90 pro definování poloh a rychlostí družic a používá systémový čas GLONASST.



GALILEO

- Evropský civilní navigační systém, který je ve fázi vývoje. Předpokládané spuštění v roce 2014, ale stále se oddaluje.
- Plánovaný počet družic 27+3, na 3 oběžných drahách. Stejně jako GPS by měl využívat kódovou identifikaci družic, které budou vysílat na shodných nosných frekvencích L1 (1575,42 Mhz), E5a (1176,45 Mhz), E5b (1207,140 Mhz) a E6 (1278,75 Mhz).



Globální navigační satelitní systémy

GNSS	GPS	GLONASS	GALILEO
začátek vývoje	1973	1972	2001
start první družice	1978	1982	2005
celkový počet družic	21 + 3 náhradní	21 + 3 náhradní	27 + 3 náhradní
dráhové roviny	6	3	3
sklon k rovníku	55°	65°	56°
výška nad Zemí	20 180 km	19 100 km	23 222 km
oběžná doba	11 h 58 min	11 h 15 min	14 h 05 min
souřadnicový systém	WGS 84	PZ90	GTRF
časový systém	GPST	GLONASS T	GST
charakteristika signálu	kódová identifikace	frekvenční identifikace	kódová identifikace
frekvence	L1 , L2 , (L5)	L1 , L2 , (L5)	E5a , E5b , E6 , E2- L1-E1

9.9.2010

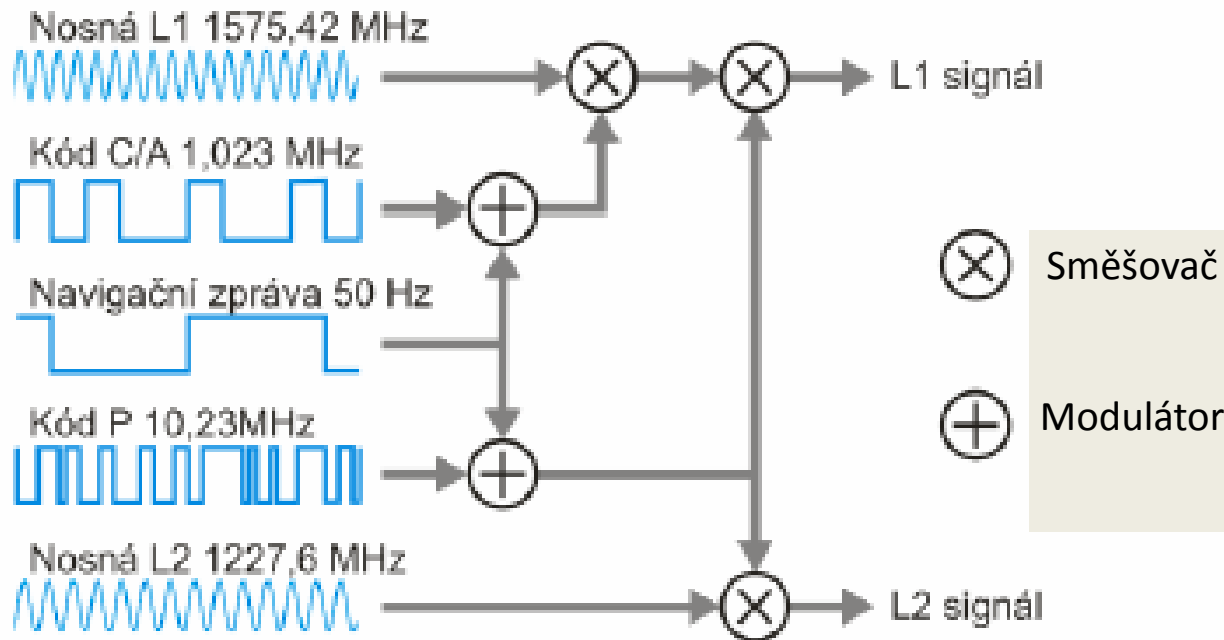
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





GNSS data

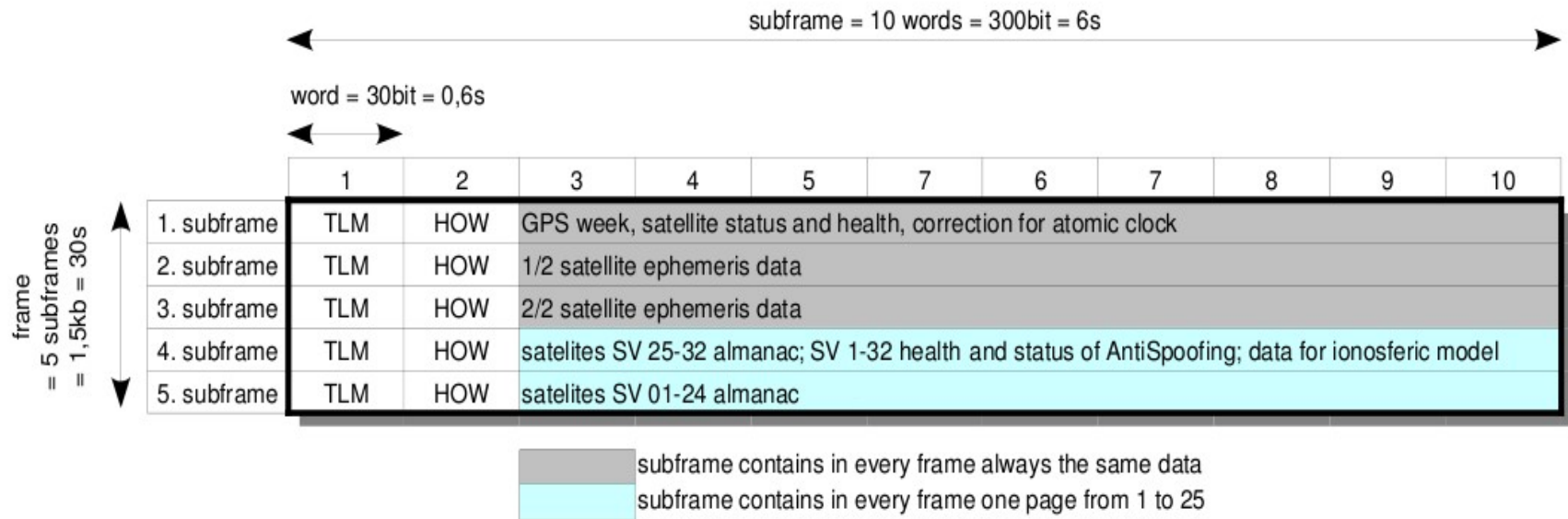
- Každá družice vysílá rádiový signál na několika nosných vlnách (L1, L2, L5). Na tyto nosné vlny se modulují pseudonáhodné dálkoměrné kódy (C/A, P, Y, L1C, ...) a navigační zprávy.





GNSS data

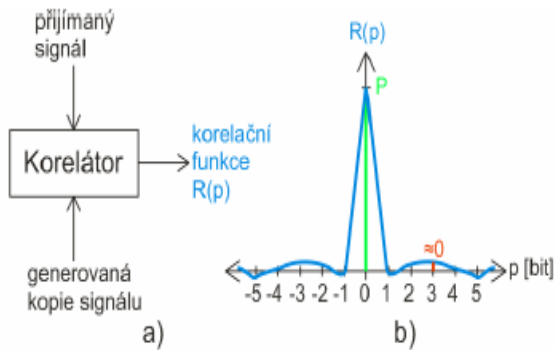
- **Navigační zpráva** — 25 rámců x 5 podrámců. Parametry dráhy družice, čas vysílání počátku zprávy, přesné keplerovské efemeridy družice, korekce hodin družice, almanach, koeficienty ionosférického modelu, stav družice (health), ...



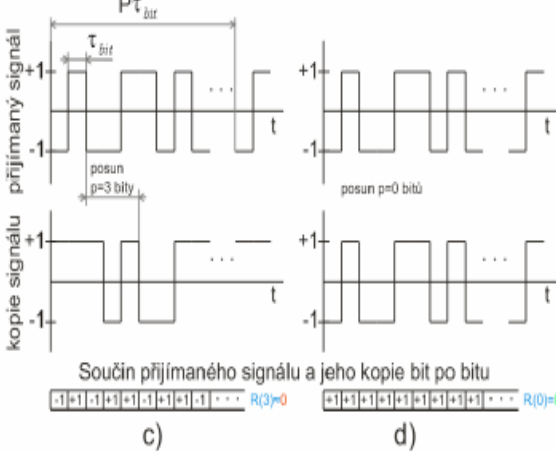


Principy určování polohy

- Kódová měření** - Přijímače generují repliku kódu v závislosti na čtení vlastních hodin. Tuto repliku potom porovnávají s kódem získaným z přijímané vlny a určují časový posun mezi nimi. Časový posun odpovídá transitnímu času. Vynásobením transitního času rychlostí světla získáváme vzdálenost družice - přijímač. V případě C/A kódu systému GPS, odpovídá jeden bit vlně o délce 300m. Uvažujeme-li přesnost synchronizace kódů 1%, pak maximální přesnost polohy je cca 3m. Využití P kódu je řádově desetkrát přesnější.



Korelace nesynchronních signálů Korelace synchronních signálů





Principy určování polohy

- **Fázová měření** – přibližná vlnová délka L_1 je 19cm a L_2 je 24cm, přesnost synchronizace vln 1% => fázový doměrek s milimetrovou přesností.

Protože ale u klasické sinusové vlny nelze určit čas jejího odeslání (jako je tomu u dálkoměrných kódů), obsahují fázová měření nejednoznačnost (ambiguity) v počtu celých vlnových délek.

Ambiguity se počítají vyrovnáním stejně jako ostatní neznámé v systému rovnic fázových pozorování. V této fázi získáme přibližné hodnoty, které však nejsou celočíselné.

Ambiguity lze snáze určit vhodnou volbou lineární kombinace obou nosných vln ($L_5 = (f_1 L_1 - f_2 L_2) / (f_1 - f_2)$, $\lambda = 0,86\text{m}$)



Principy určování polohy – metody výpočtu

- **Absolutní metoda** – přesnost řádově centimetrová, nutnost min. 12h observace, stačí jeden dvoufrekvenční GNSS přijímač, musíme znát přesné efemeridy družic, které jsou k dispozici s cca 14-ti denním zpožděním. Výsledné souřadnice získáme v systému WGS84. Firemní softwary většinou neumožňují, ale existují online internetové služby, kam pošleme Rinex a obdržíme výsledné souřadnice a protokol o výpočtu.

http://www.geod.nrcan.gc.ca/products-produits/ppp_e.php



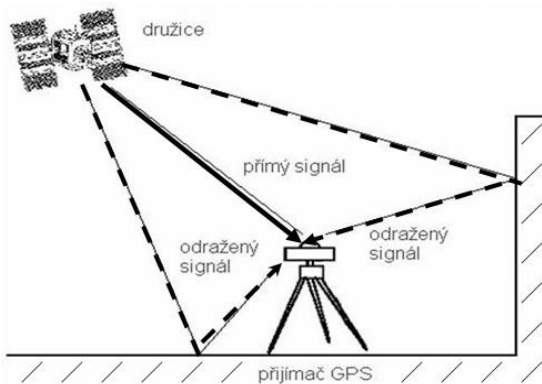
Principy určování polohy – metody výpočtu

- **Relativní metody** – přesnost řádově centimetrová, kratší observace, nutnost současného měření dvěma GNSS aparaturami, souřadnice obou stanic jsou ve stejném systému.
 - **Statická metoda** – observace řádově hodiny, dlouhé vektory až stovky km, přesnost až 5mm + 1ppm
 - **Rychlá statická metoda** – kratší observace cca 5 - 20 min, vektory řádově desítky km, přesnost až 5mm + 1ppm
 - **Stop and GO** – inicializace, pak měření na bodě cca 3sec a přesun na další bod, při přesunu nesmíme ztratit signál z družic
 - **Kinematická metoda** - inicializace, pak se pohybujeme po dané trase a přijímač zaznamenává body s intervalem např. 1sec, v průběhu měření můžeme ztratit družice. Přesnost 1 - 2cm + 1ppm
 - **RTK** – observace 1sec, přesnost cca 2 - 5cm, vektory řádově desítky km
 - **DGNSS** - observace 1sec, přesnost cca 0.1 – 1m, vektory řádově stovky km



Faktory ovlivňující přesnost měření

- **Stav družic** - družice je v navigační zprávě označena jako *zdravá/nezdravá*, (správná poloha na oběžné dráze, funkčnost)
- **Poměr signál/šum** – poměr užitečných informací v signálu a jeho šumu, čím menší číslo, tím horší přesnost. Oslabení signálu - průchodem korunami stromů, nízkou polohou družice nad horizontem, ...
- **Vícecestné šíření (multipath)** - GPS přijímač zpracovává nejen přímo přijatý signál, ale také signál odražený od blízkých ploch, čímž dochází k interferenci těchto signálů a chybám ve zpracování měření. Kódová měření mohou mít chyby až 50 m, fázová měření až 10 cm.





Faktory ovlivňující přesnost měření

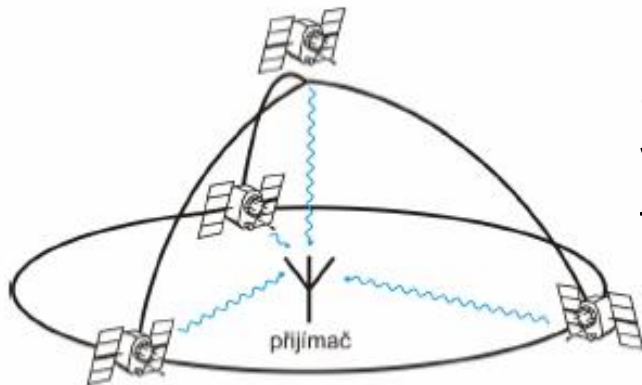
- **Platnost a přesnost efemerid** – existuje několik druhů efemerid, každý typ má jinou přesnost udávaných parametrů a je dostupný v jiném čase.

Efemerida	přesnost polohy/hodin	k dispozici	zdroj
vysílaná (broadcast)	~ 2 m / 7 ns	reálný čas	navigační zpráva
ultra-rapid (predikce)	~ 10 cm / 5 ns	reálný čas	IGS datová centra
ultra-rapid (výpočet)	< 5 cm / 0,2 ns	po 3 hod.	IGS datová centra
rapid	< 5 cm / 0,1 ns	po 17 hod.	IGS datová centra
přesná (precise)	~ 2 cm / <0,1 ns	po ~ 13 dnech	IGS datová centra



Faktory ovlivňující přesnost měření

- **Počet a geometrické uspořádání viditelných družic** – abychom byli schopni vypočítat polohu (X,Y,Z,T), je minimální počet viditelných družic 4. Ideální je mít jednu družici v zenitu a zbylé tři s elevací kolem 20° , svírající horizontální úhel 120° . Kvalitu geometrického uspořádání nám určuje základní parametr snížení přesnosti DOP



- PDOP – faktor snížení přesnosti v určení polohy
- HDOP – ... v určení horizontální polohy
- GDOP – faktor globálního snížení přesnosti
- VDOP – ... ve výšce
- TDOP – ... v určení korekce hodin přijímače



Faktory ovlivňující přesnost měření

- **Přesnost hodin na družicích** – na družicích se pro uchování času a nosných frekvencí používají cesiové, rubidiové nebo vodíkové oscilátory, jejichž stabilita je 10^{-11} až 10^{-13} za 24 hodin.
Přibližné korekce hodin družice na GPS čas jsou vysílány v navigační zprávě (součást Broadcast Ephemered). Přesné korekce jsou pak určovány se zpožděním z měřených dat a jsou dostupné v rámci přesných efemerid.
- **Chyba hodin přijímače** – protože přesnost hodin v přijímači je o několik řádů horší než na družici, jsou korekce hodin přijímače řádově vyšší a časově méně stabilní.
Obvykle se korekce určují pro jednotlivé epochy měření v rámci výpočtu polohy (proto musíme měřit min. na 4 družice)



Faktory ovlivňující přesnost měření

- **Vliv atmosféry** – rádiové signály vysílané z družic jsou nejvíce ovlivněny Ionosférou a Troposférou.
 - **Ionosferická refrakce** - v ionosféře (50 – 1000km), je závislé na množství volných elektronů v jednotce objemu atmosféry, je závislá na frekvenci procházejícího vlnění a proto je různá pro kódová a fázová měření. Odstraňuje se měřením na obou frekvencích vytvořením vhodné lineární kombinace (L1+L2... označuje se jako Ionofree), zaváděním ionosferických korekcí z navigační zprávy, nebo použitím regionálních/globálních modelů ionosféry. Pro malá území lze považovat vliv ionosféry za stejný a při tvoření diferencí se její vliv z větší části vyruší.



Faktory ovlivňující přesnost měření

- **Troposférická refrakce** – vzniká v troposféře (10 – 18km), je závislá na hustotě prostředí a není závislá na frekvenci nosné vlny. Maximální troposférické ovlivnění dosahuje hodnot 2.3 m ve směru zenitu a až 25 m pro družice s elevací kolem 15°.

U kratších vektorů se při tvorbě diferencí její vliv vyloučí. Další možnost snížení vlivu troposférické refrakce je použití standardního modelu atmosféry nebo výpočet parametrů troposféry z GPS měření na známých bodech.



Faktory ovlivňující přesnost měření

- **přibližné hodnoty jednotlivých systematických vlivů na GNSS určování polohy**

Zdroj chyb	Vliv na absolutní určení GPS polohy	Vliv na relativní určení GPS polohy
dráhy družic Broadcast E (Precise E)	3 – 5 m (0.03 – 0.1 m)	0,1- 0,2 ppm (1-3 ppb)
hodiny družic B E (P E)	3 – 5 m (0.05 - 0.2 m)	-
fázová centra antén družic	1 - 2 m	0 - 0.1 m
ionosféra (L1 bez korekce)	1- 100 m	0,08 - 8 ppm
troposféra (stand. model)	0.05 – 0.4 m	0.01 – 1.0 m
fázová centra antén přijímačů	0.01 – 0.1 m	0.01 – 0.1 m
multipath - kódová (fázová) měření	1 - 10 m (0.01 – 0.05 m)	2 - 20 m (0.02 – 0.1 m)
šum signálu	0.2 - 5 mm	0.6 - 10 mm



Vytváření diferencí

- Tvorba diferencí částečně eliminuje systematické vlivy na měření
 - **Jednoduché difference** - $\Delta\varphi_{AB}^j(t) = \varphi_B^j(t) - \varphi_A^j(t)$, kde $\varphi_A^j(t)$... fáze měřená k družici j z bodu A v epoše t
 - **Dvojité difference** - $\delta\varphi_{BA}^{jk}(t) = \Delta\varphi_{BA}^j(t) - \Delta\varphi_{BA}^k(t)$, je to rozdíl dvou jednoduchých diferencí získaných ze simultánního měření na dvou stanovištích (A, B), ke dvěma družicím (j, k)
 - **Trojité difference** - $d\varphi_{BA}^{jk}(t) = \delta\varphi_{BA}^{jk}(t) - \delta\varphi_{BA}^{jk}(t')$, rozdíl dvou dvojitých diferencí v časech t a t'

Název difference	Vyloučené a zmenšené vlivy
jednoduché	Hodiny družice, troposféra, ionosféra
dvojité	Hodiny družice, hodiny přijímače, troposféra, ionosféra
trojité	Hodiny družice, hodiny přijímače, troposféra, ionosféra, počet celých cyklů (ambiguity)