

Technologie GPS NAVSTAR

Souřadnicové soustavy a GPS

- Prostorové geocentrické – v těch pracuje GPS
- Rovinné kartografické – tyto jsou používány k lokalizaci objektů v mapách
- Důsledek: chceme-li využívat GPS, musíme obě soustavy realizovat a zprostředkovat mezi nimi vzájemný vztah

GNSS – globální navigační družicové systémy

- GPS NAVSTAR – americký
- GLONASS – ruský
- GALILEO – ESA (EU)
- další – čínský, japonský, indický

my se nyní budeme zabývat pouze GPS

GPS – globální poziční systém

- Vybudován armádou USA v 70-tých letech 20. století za účelem rychlého určení polohy kdekoliv na světě s přesností několika metrů
- Družicový radiový systém, podmínka: na každém místě na světě musí být vidět v každém okamžiku alespoň 4 družice
- Kromě vojenských aplikací i civilní aplikace:, **geodézie**,

GPS – globální poziční systém základní princip (1)

- Družice o známé poloze vysílá v přesně definovaný čas (atomové hodiny) *pípnutí*
- Toto *pípnutí* je přijato pozemní aparaturou v s jistým časovým zpožděním
- Z rychlosti šíření signálu (radiové vlny) a zpoždění se vypočte *vzdálenost*
- Prostorovým protínáním z délek se určí ze 4 družic *poloha* v prostorovém systému (XYZ) a *oprava hodin* v aparatuře

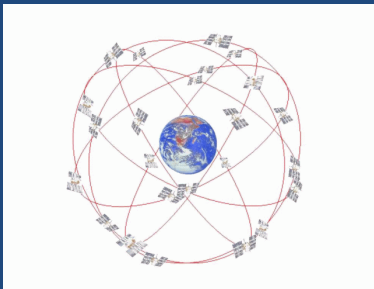
GPS – globální poziční systém základní princip (2)

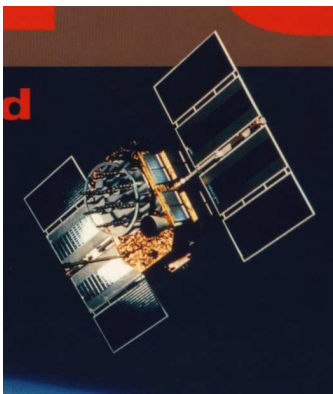
- Komplikace – *pípnutí* by muselo být hodně silné, přijímací anténa by musela být velká
- Řešení – místo *pípnutí* se vysílá v přesný čas *pseudonáhodný kód*, ten se v pozemním přijímači koreluje se stejně generovaným pseudonáhodným kódem a z korelace se určí zpoždění → *vzdálenosti*
- Poznámka: tento princip se používá pro navigaci
- Geodetické využití: *měření fáze nosné vlny* → *fázový dálkoměr*

GPS – globální poziční systém (2)

- Obsahuje tři segmenty
 - Kosmický – družice
 - Pozemní – řídicí operační stanice
 - Uživatelský – aparatury různých uživatelů pro různé účely a různou přesnost

GPS – kosmický segment





GPS – kosmický segment (2)

*** kosmický ***

24 + záložní družice (SVs) v šesti rovnoměrně rozložených drahách

- sklon dráhy k rovníku 55 stupňů,
- výška nad povrchem Země 20200 km
- doba oběhu 12 hvězdných hodin (= 11 h 58 min)

družice mají kromě vysílačů a přijímačů i atomové hodiny

- 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

Constellation Summary

Since 1 Jan 04

- 28 operational on-orbit satellites
- 3 satellites launched
 - SVN59 (PRN19): 20 Mar 04
 - SVN60 (PRN23): 23 Jun 04
 - SVN61 (PRN02): 6 Nov 04
- Next launch- May 2005



U.S. Department of Homeland Security
United States

GPS Space and Control Clock and Reaction Wheel Performance Status (as of 22 Nov 2004)

SVN PRN SVN PRN SVN PRN SVN PRN SVN PRN SVN PRN

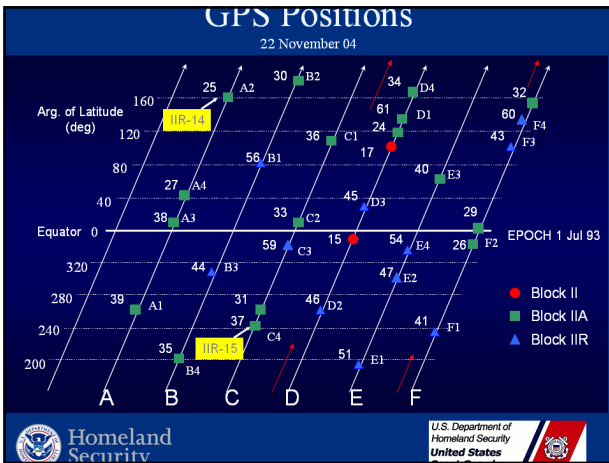
Clock*	1	2	3	4
Wheel	✓	✓	✓	✓

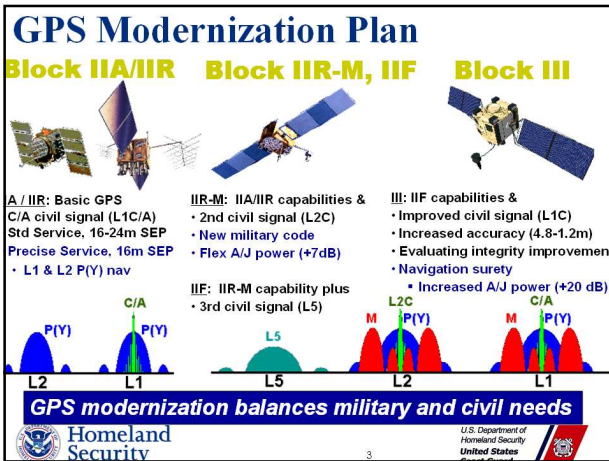
* IIIIA = Rb, Rb, Cs, Cs
IIIR = Rb, Rb, Rb
Diagonal Line = Unhealthy

Clock
meets spec
watch list
dead
unused
in use

Wheel
functional
watch list
dead







GPS – kosmický segment (3)

*** frekvence ***

Radiový GPS signál - Cs (1E-13) $\nu(0) = 10.23 \text{ MHz}$

$\nu(1) = 154 \nu(0) = 1575.42 \text{ MHz} \gg \lambda_1 = 19 \text{ cm} \ll L_1$

$\nu(2) = 120 \nu(0) = 1227.60 \text{ MHz} \gg \lambda_2 = 24 \text{ cm} \ll L_2$

GPS – kosmický segment (4)

*** kód (fázově modulovaná na nosná vlna) ***

P - precise; protected 10.23 MHz, 1 týden opakování
(30 m) na L_1 a L_2 (Y)

C/A - coarse acquisition, 1.023 MHz, 1 msec opakování
clear access (300 m) na L_1

D - data (1500 bitů) 50 Hz 30 sec
na L_1 a L_2

Kódy P a C/A jsou přesně definovanou funkcí času pro každou družici

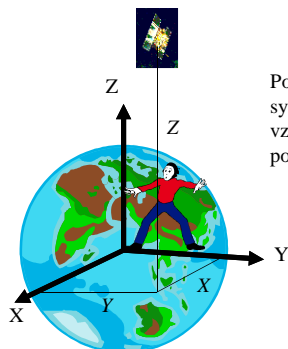
Důležitá skutečnost:

vzhledem k tomu, že vysílaný signál má malý výkon a chceme, aby přijímací antény byly co nejmenší, vyhodnocení vlastních měření spočívá na statistickém vyhodnocení přijatých signálů-kódů (i když se zpracovávají fázová měření - fáze se rekonstruuje z kódu).

GPS – pozemní segment (1)

- Zpracovatelská centra, která zpracovávají pozorování ze stanic se známými souřadnicemi, které určují polohu družic systému NAVSTAR a
 - Nahrávají ji do palubních počítačů družic – **palubní efemeridy** v systému WGS84 (s 1.6 m přesností) – umožňují okamžitý výpočet polohy družice v čase pozorování
 - Ukládají se (s jistým zpožděním) na server s internetovým přístupem – **přesné efemeridy** (s 5 cm přesností)
- Poznámka: pro geodetické měření se základnami do 100 km stačí používat palubní efemeridy

GPS – poloha družice



Polohu družice v geocentrickém systému rozumíme X, Y, Z vztahované vůči systému, jehož počátek je ve středu Země

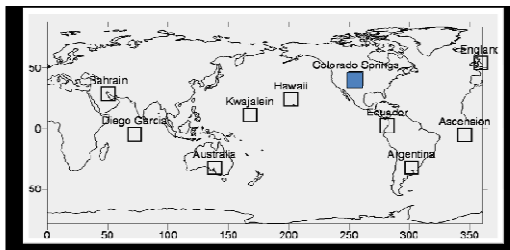
GPS – pozemní segment (2)

Operační řídicí systém (1985)

Hlavní řídicí stanice v Colorado Springs (shromažďuje výsledky a počítá efemeridy + parametry chodu hodin na družici >>> pro navigaci v reálném čase přesnost efemerid 30 m (1995), 1.6 m (2012)).

Monitorovací stanice - Colorado Springs, Hawaii (Tichý oceán), Ascension Island (Jižní Atlantik), Diego Garcia (Ind. oceán), Kwajalein (Tichý oceán) + další - některé předávají data na družice.

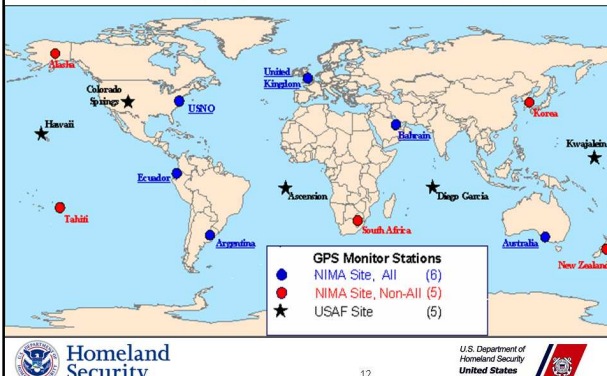
GPS – pozemní segment (3)



Stanice z jejichž pozorování se určují palubní efemeridy v systému WGS84

GPS Monitoring Stations

Accuracy Improvement Initiative (AII)



GPS – pozemní segment (4)

Mezinárodní GNSS služba (IGS)

produkuje (mimo jiné)

- *přesné dráhy družic*

zvlášť rychlé: rmse 10 cm v reálném čase

rychlé: rmse < 5 cm během 17 hod

výsledné: rmse < 5 cm během 13 dnů

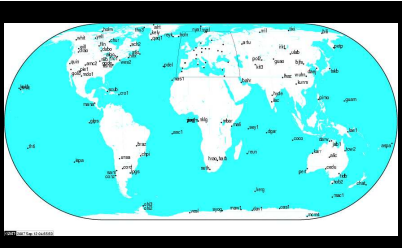
- *přesné souřadnice a rychlosti pozorovacích stanic*

rmse 3 mm v poloze/6 mm ve výšce, 0.2 mm/rok ve změně polohy, 0.3 mm/rok ve změně výšky

Pozorovací síť stále pozorujících stanic rozložených po celém světě >>> předávání dat do zpracovatelských center (INTERNET).

!!! Výsledky se distribuují INTERNETEM, nenahrávají se na družice !!!

GPS – pozemní segment (5)



Stanice, z jejichž pozorování se určují přesné efemeridy v systému ITRS2008=IGS08 (IGS – Mezinárodní GNSS služba)

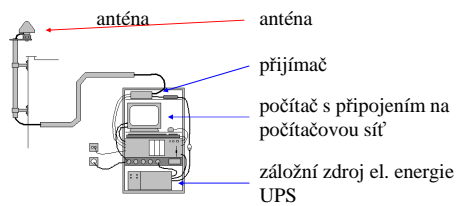
Vztah WGS84 a ITRS2008

- Oba souřadnicové systémy jsou identické podle definice
- WGS84 je starší, realizovaný GPS a používá se hlavně na méně přesné práce (i když se v něm principiálně dá počítat přesně)
- ITRS2008 je nejpřesnější geocentrický systém realizovaný různými metodami kosmické geodézie

GPS – uživatelský segment (1)



Permanентní stanice



Permanентní GNSS stanice GOPE



- V provozu od roku 1993
- Kontinuálně přijímá signály družic GPS NAVSTAR, od 1999 i GLONASS
- Výchozí (referenční) stanice pro lokální geodynamiku, sledovací stanice pro regionální a globální geodynamiku

GPS Applications




- ◆ Military
- ◆ Civil
 - Transportation
 - ◆ Aviation
 - ◆ Automobile
 - ◆ Maritime
 - ◆ Rail Control
 - Public Services
 - Timing & Frequency
 - Surveying
 - Surveillance
 - Other





















UNCLASSIFIED

Aplikace GPS – určování polohy nízko-letících družic

„Satellite to satellite tracking“ – pozorování mezi družicemi

- Měří se vzdálenosti nebo změny vzdáleností dopplerovsky, radarem, dálkoměrem nebo GPS

GPS – uživatelský segment (2)

přístroje od různých firem

dělení na 3 skupiny

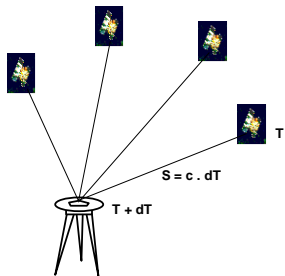
podle frekvencí (nosných):

1. jednofrekvenční (vlna L1)
2. dvoufrekvenční (vlna L1+L2)

podle kódu:

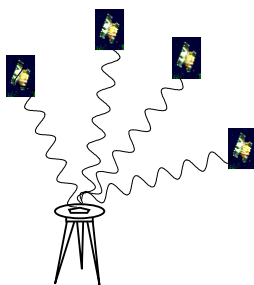
1. přijímače bez kódu,
2. přijímače s C/A kódem
3. přijímače s C/A + P kódem

Princip určení polohy z kódových měření



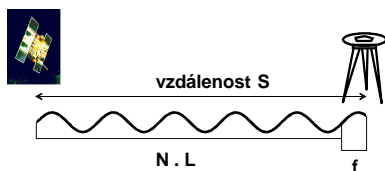
Známe čas vyslání signálu T, na stanici přijde v čase T + dT
 Vzdálenost $S = c \cdot dT$, kde c je rychlost světla
 Ze tří družic se známými souřadnicemi protínáním z délek určíme
 prostorovou polohu. Protože hodiny na stanici nejdou dobře, pomocí
 čtvrté družice určíme opravu hodin.

Princip určení polohy z fázových měření



Měříme fázi vysílaného záření ze čtyř nebo více družic.
 Ze tří družic se známými souřadnicemi protínáním z délek určíme
 prostorovou polohu. Protože hodiny na stanici nejdou dobře, pomocí
 čtvrté družice určíme opravu hodin.

Princip určení polohy z fázových měření



L je vlnová délka
 N je celý (neznámý) počet vln "ambiguity"
 f je měřená fáze
 $S = N \cdot L + f$
 N se musí určit speciálním postupem při zpracování

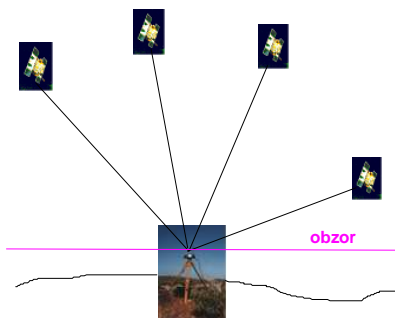
Problémy metody GPS (1)

- Radiová metoda, paprsek prochází atmosférou
→ korekce (až desítky metrů)
 - troposférická – počítá se z modelu, nebo se určuje výpočtem
 - ionosférická – počítá se z modelu, nebo se eliminuje měřením na dvou frekvencích

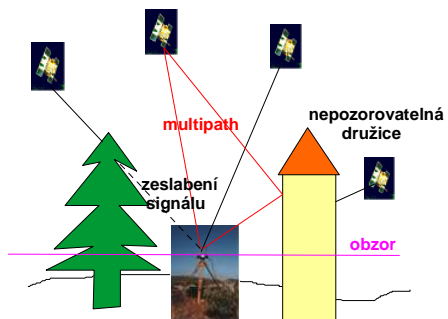
Problémy metody GPS (2)

- u fázového měření neznámý počet celých vlnových délek (ambiguit) – měří se pouze „doměrek“ – určují se výpočtem při zpracování
- oprava staničních i družicových hodin – určuje se výpočtem nebo se odstraní diferencováním
- „multipath“ – signál se odráží od blízkých předmětů, místo aby šel přímo na anténu

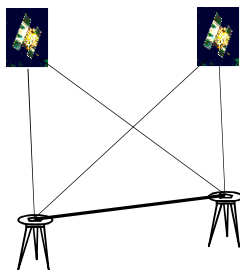
Podmínky pozorování družic GPS dobré



Podmínky pozorování družic GPS špatné



Geodetické využití – diferenciální měření

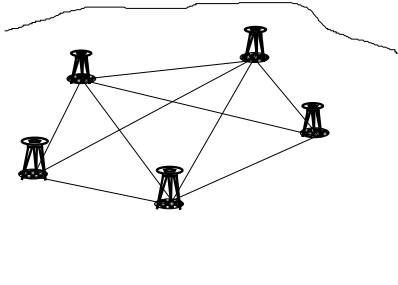


Určení vektoru spojnice v prostorovém souřadnicovém systému z fázových měření

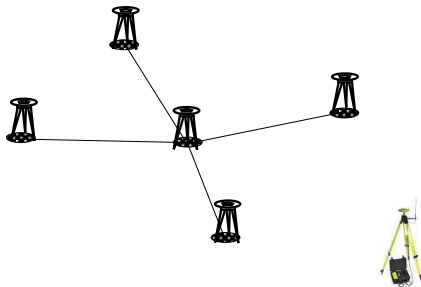
Metody zaměřování technologií GPS

- Statická - $\sigma_p = 3$ až 5 mm
- Rychlá statická - $\sigma_p = 5$ až 10 mm + 1 až 2 ppm
- Stop and Go - $\sigma_p = 10$ až 20 mm + 1 až 2 ppm
- Kinematická - $\sigma_p = 10$ až 30 mm + 1 až 3 ppm
- RTK – real time kinematic - $\sigma_p = 20$ až 50 mm
 - Metoda virtuálních referenčních stanic
 - Metoda plošných diferenciálních korekcí

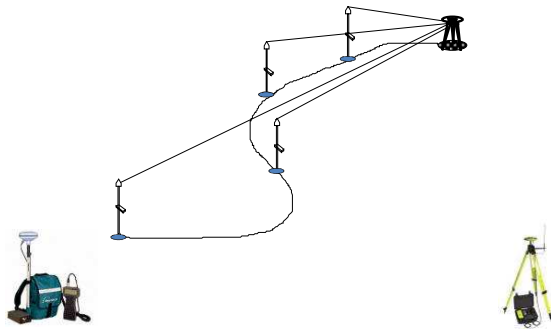
Statická metoda
postprocesing

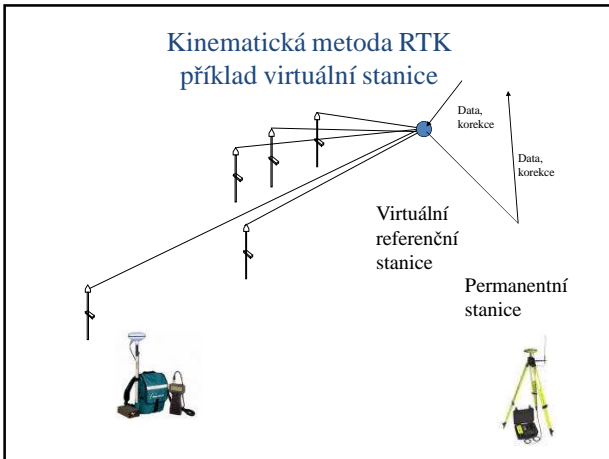


Rychlá statická metoda
postprocesing



„Stop and go“ – zastav se a jdi
postprocesing





Geodetické měření (komerčními aparaturami)

navigace - měření pseudovzdáleností
 geodetické měření - fázová měření + pseudovzdáleností
 (analogie radiových dálkoměrů)

Výsledky získané z aparatury jsou v souborech, které mimo jiné obsahují:

- a) údaje, ze kterých je možno vypočítat polohy družic v souřadnicovém systému WGS-84,
- b) vlastní měření:
 PRN, datum, čas, odečet pseudovzd., odečet fáze, počet cyklů načtených během časového intervalu od předchozího času (Doppler count) a to vše pro každou frekvenci a pro každý kód.

Geodetické zpracování

softwary: firemní - pro běžné geodetické práce,
 "univerzitní" - pro přesné geodetické a geodynamické práce

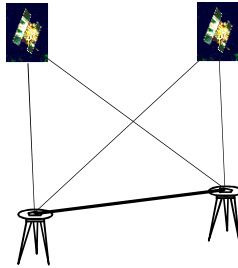
technologie zpracování závisí na nutnosti odstranění systematických chyb >>> relativní měření, simultánní pozorování, tvorba diferencí

definice:

1. diference - rozdíl měř. veličin provedený pro dvě stanice a jeden bod družice v $t(i)$
2. diference - rozdíl předchozích prvních diferencí pro různé družice v $t(i)$

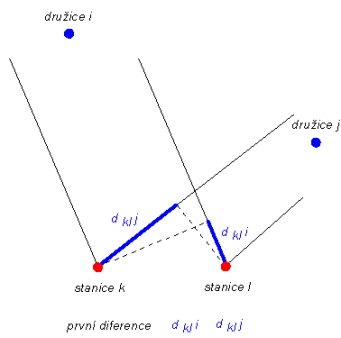
(je možné definovat další/jiné typy diferencí!)

Geodetické využití – diferenciální měření

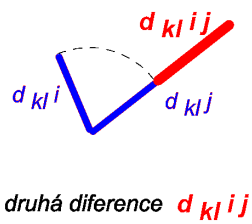


Určení vektoru spojnice v prostorovém souřadnicovém systému z fázových měření

Tvoření diferencí první diference



Tvoření diferencí druhá diference



Systematické chyby

Zdroj	Efekt	Eliminace	Zbýlá chyba
<u>Družice</u>	Chyba polohy	1. diference	0.5-5 ppm
		--	2 m/5 cm
	Syst. ch. hodin	1. diference	0
		--	10-100 m
	Exc. fáz. centra ant.	1. diference	0
	--	dm	
Variace fáz. centra ant.	1. diference	0	
	--	--	m
<u>Prostředí</u>	Trop. refrakce	model/výpočet	0
		--	2-3 m
	Ionosférická ref.	L ₁ & L ₂	0
	L ₁	0.1-5 ppm	
<u>Přijímač</u>	Variace fáz. centra ant.	2. dif./poč.	0
		--	mm/cm
	Syst. chyba hodin	2. diference	0
		--	m
Chod hodin	zprac. (PV)		

*** Metoda MNČ ***

určované veličiny

- počáteční neurčitosti (ambiguities) vzdáleností
- troposférické parametry
- souřadnicové rozdíly (souřadnice), prostorové ve WGS-84 (nebo analogickém systému ETRF-89)
- (opravy drah družic)
- nebo pouze některé z nich !

Pro další geodetické využití jsou nejdůležitější
souřadnicové rozdíly
 (resp. souřadnice)
 pro n bodů na kterých současně pozorovalo n aparatur

Metoda PPP

- PPP = Precise Point Positioning
 - určování polohy z kódových a fázových měření bez tvorby diferencí z přesných pozic družic ($m_{\text{polohy družice}} < 5 \text{ cm}$)
 - v současné době lze z celodenních pozorování dosáhnout určení polohy s přesností „rmse“ 2.5 cm
 - jsou vyvíjeny metody k dosažení přesnosti 2 cm v „téměř reálném čase“

Rekapitulace (1)

- Předpokládáme, že jednou z dříve uvedených metod máme zaměřeny jednotlivé vektory v systému ETRS-89, to znamená, že vektory jsou správně orientovány, ale nejsou doposud umístěny

Hodnocení výsledků určení souřadnic metodou GPS

Hodnocení výsledků – část 1.

- Hodnocení vnitřní přesnosti měření a vlivu konfigurace družic při měření na přesnost výsledku:
 - A) Pomocí středních chyb ze zpracování
 - B) Pomocí hodnoty DOP (Dilution of Precision)
- Střední chyby jsou někdy nadhodnocené, liší se podle použitého software – není ustálená definice pro jejich výpočet – pro hodnocení nepoužitelné.
- DOP je jednoznačně definován, některou z jeho podob dává každá aparatura GPS.

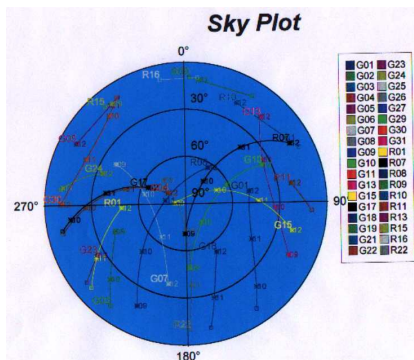
Co je to DOP ?

- DOP – Dilution of Precision („zředění/zhoršení“ přesnosti) – charakteristika přesnosti určení některého parametru (polohy, výšky, času, ...) – vyjadřuje zejména vliv konfigurace družic
- $m_x = (q)^{1/2} \cdot m_0$ - střední chyba vyrovnané veličiny
- $m_x = DOP \cdot m_0$
- Protože m_0 je dána přesností fází nebo pseudovzdáleností v systému GPS, hodnota DOP modifikuje základní přesnost podle konfigurace družic při měření. DOP je bezrozměrné číslo, je charakteristikou konfigurace družic při měření. Čím větší DOP, tím nižší přesnost.

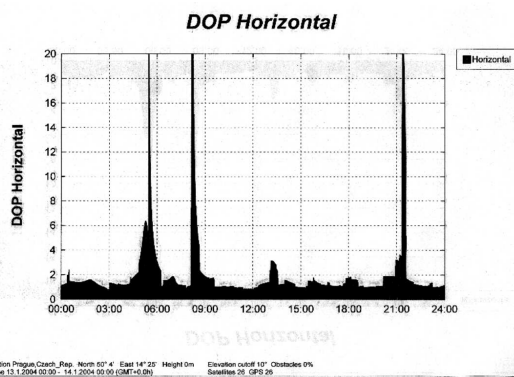
Typy DOP (Dilution of Precision)

- GDOP – Geometric DOP – geometrický DOP (vliv prostorové polohy a času)
- PDOP – Position DOP – polohový DOP
- TDOP – Time DOP – DOP v času
- HDOP – Horizontal DOP – DOP ve vodorovných souřadnicích
- VDOP – Vertical DOP – DOP ve výšce
- Platí: **HDOP < PDOP < GDOP**

Změna konfigurace družic v čase



Příklad: Horizontal DOP během dne



Hodnocení výsledků – část 2.

- Hodnocení podle DOP (HDOP/PDOP/GDOP):
- Při určování PPBP:
- Je-li DOP menší nebo roven 4: OK
- Je-li DOP mezi 4 a 7: ověřit jinou technologií
- Je-li DOP větší jak 7: nelze výsledky GPS použít
- Při určování podrobných bodů:
- Je-li DOP menší nebo roven 7: OK
- Je-li DOP větší jak 7: nelze výsledky GPS použít
