



# Zlepšování přesnosti družicové navigace



Prof. Ing. František Vejražka, CSc.

Ing. Václav Navrátil

Ing. Jiří Svatoň

katedra radioelektroniky  
fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze  
[vejrazka@fel.cvut.cz](mailto:vejrazka@fel.cvut.cz)

+420 2 2435 2246

(v. 5)

# Systemy GNSS – stav (1/4)

- GPS
  - 31 činných družic (Expanded 24 SV Constellation)
  - vypuštěno 72 družic (od 22. 2. 1978, všechny MEO)
  - 9 starých družic s téměř vyčerpanou životností, možno oživit a použít jako záložní
  - 30 družic vyčerpaná životnost, provoz ukončen
  - 2 družice selhaly (SVN 7 [19.12.1981], SVN42 – zničena po startu [17.1.1991])
  - družice IIIA-1 připravena ke startu jaro 2018



# Systemy GNSS – stav (1/4)

- GPS

- Poznámky:

- dokončena konstelace 12 družic IIF (2010 – 2016) – mají třetí kmitočet L5 1176,45 MHz bez dat v kvadrurní složce
    - velká šířka pásma – snáze odolává rušení
    - konstelace byla v r. 2011 rozšířena o 3 sloty pro lepší pokrytí Země (B1F, B1A, D2F, D2A, F2F, F2A)
    - dokument ICD připouští přesuny družic mezi sloty, ale ve stejných oběžných rovinách
    - nyní 6 slotů v každé rovině
    - blok III (IIIA-1 start 2018):
      - kontrakt je na 11 družic, ve výrobě 9. a 10.
      - nese (payload):
        - » Nuclear Detonation Detection System
        - » SAR
        - » pole laserových odražečů



# GPS

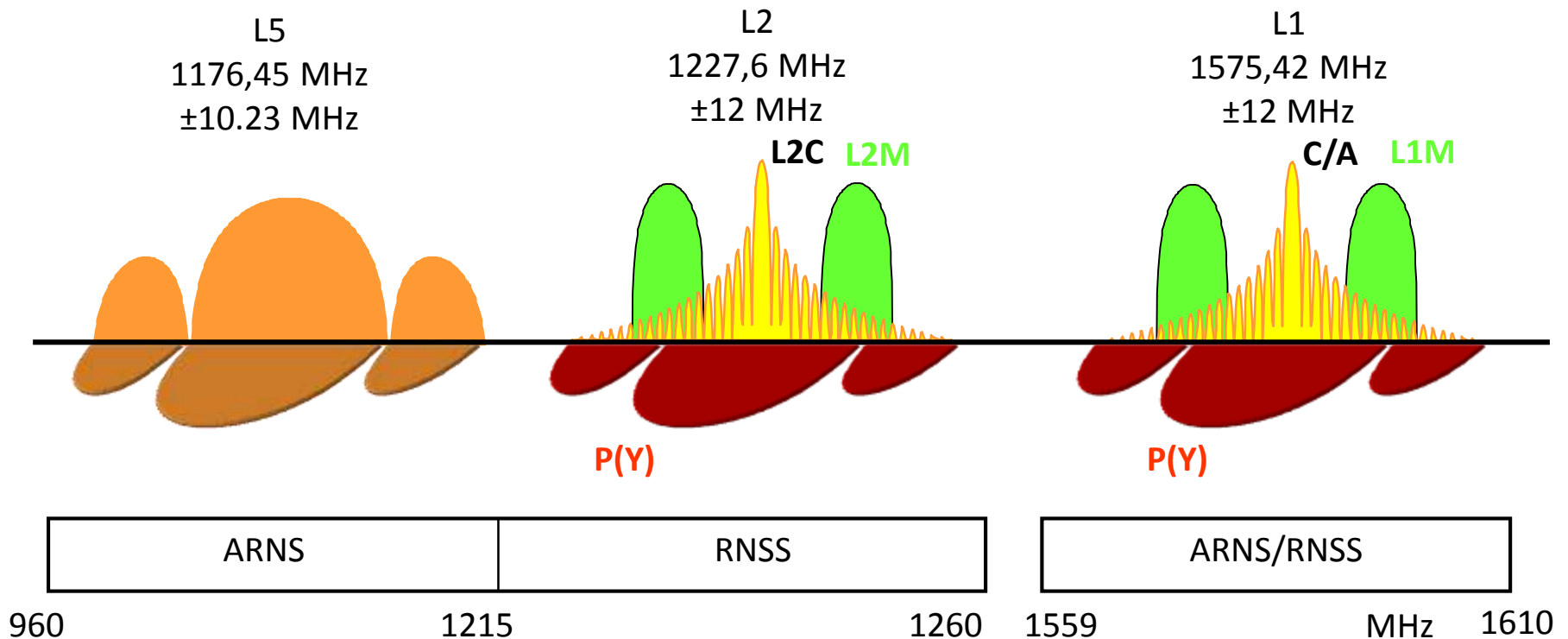
## signál a jeho spektrum (II F)

2005 – 2009: IIR-M – 2. civilní signál L2C a vojenské signály L1M a L2M

2010 – 2016: IIF – třetí civilní signál L5

pro aplikace SoL

24 družic s L5 ~2019



# GPS

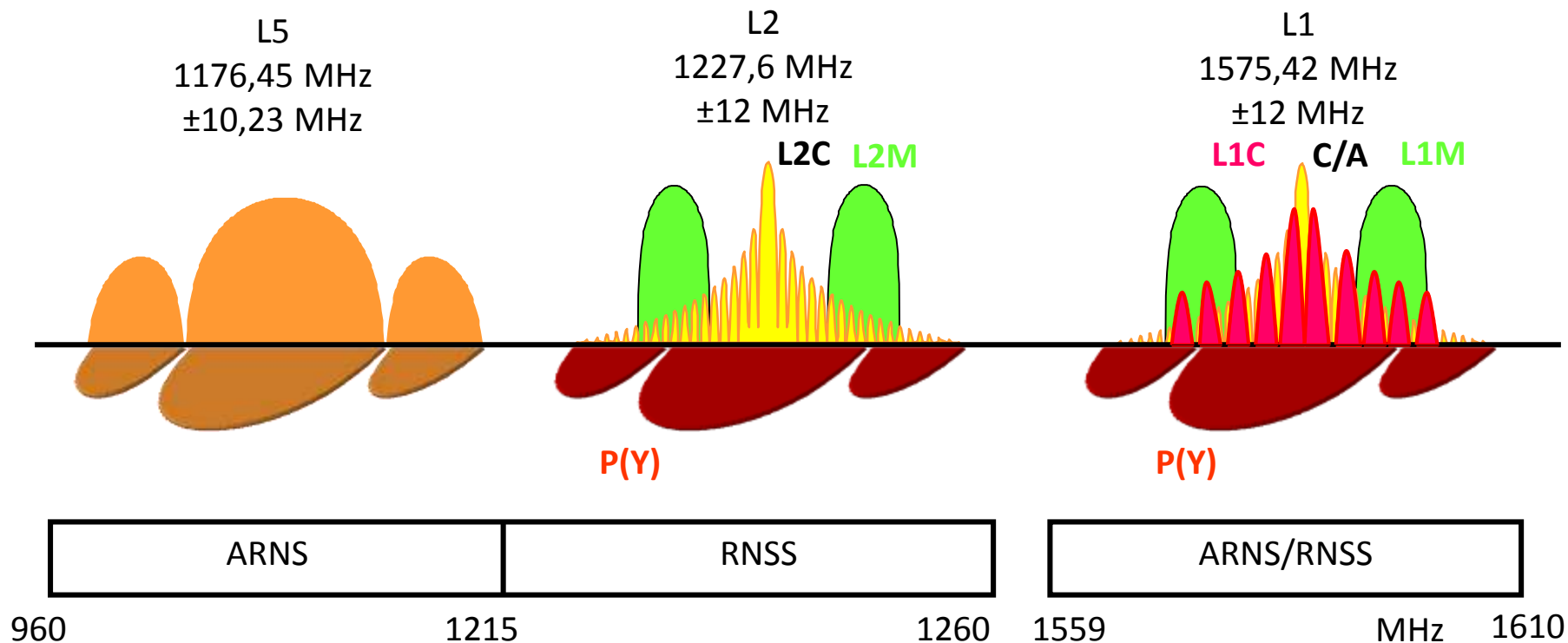
## signál a jeho spektrum (III)

2005 – 2009: IIR-M – 2. civilní signál L2C a vojenské signály L1M a L2M

2010 – 2016: IIF – třetí civilní signál L5

2018 – 2026: GPS III – civilní signál L1C

L1C pro interoperabilitu GNSS  
24 družic s L1C ~ 2026



960

1215

1260

1559

MHz

1610



# Systemy GNSS – stav (2/4)

- Glonass
  - 23 činných družic
  - vypuštěno 134 družic (od 1. 12. 2001, více, první starty od 12. 10. 1982)
  - v konstelaci 25 družic
  - 2 družice testy a experimenty
  - 22. 9. 2017 vypuštěna nejnovější družice, pracuje s kódovým dělením



# Systemy GNSS – stav (3/4)

- Galileo
  - 15 činných družic
  - plán 30 družic (27 MEO, 3 GEO)
  - vypuštěno 20
  - 2 odstaveny (GIOVE A, B)
  - 1 porucha napájení
  - 2 na chybných drahách
  - 11. 11. 2016 vypuštěny 4 družice jednou raketou
  - na 12. 12. 2017 naplánován start rakety nesoucí 4 družice



# Systemy GNSS – stav (4/4)

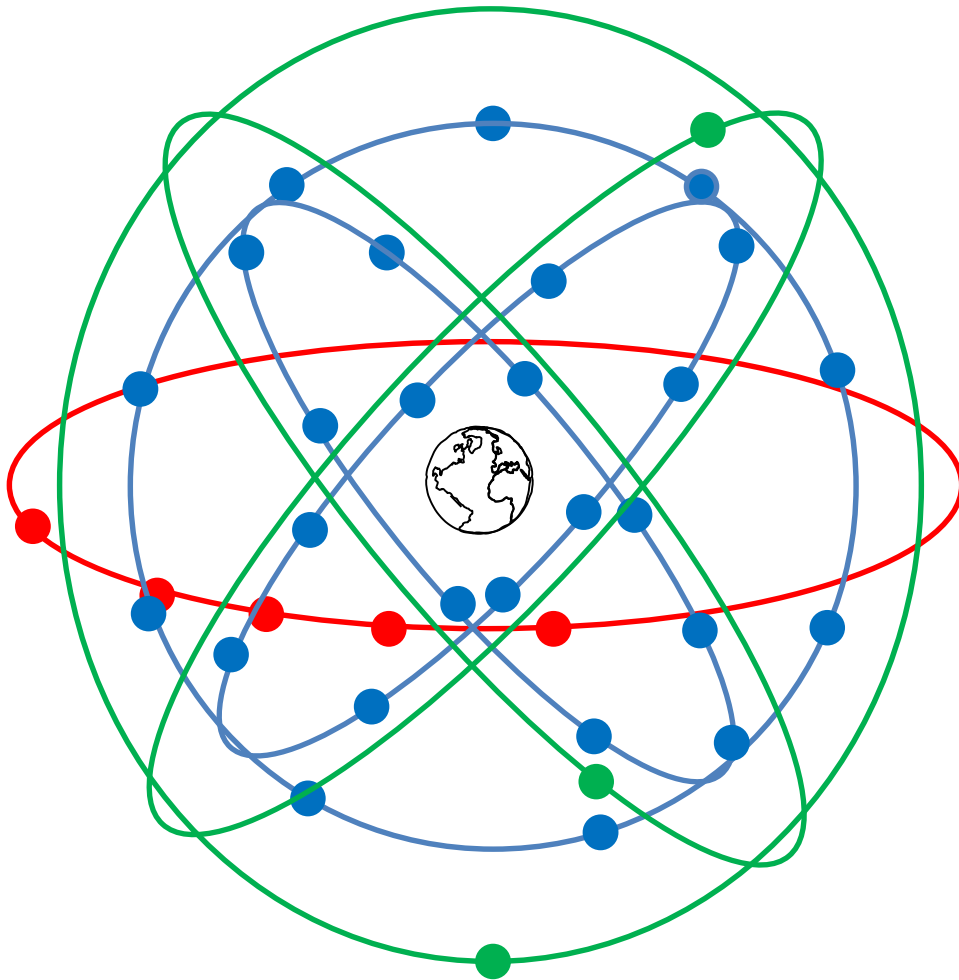
- Beidou
  - 20 činných družic (6 GEO, 8 IGSO, 6 MEO)
  - plánováno 35 družic (5 GEO, 25 MEO, 5 IGSO)
  - vypuštěno 27 družic, poslední 12. 6. 2016
  - provoz 7 družic ukončen, vyčerpaná životnost





# SYSTÉMY GNSS – BEIDOU

## konstelace



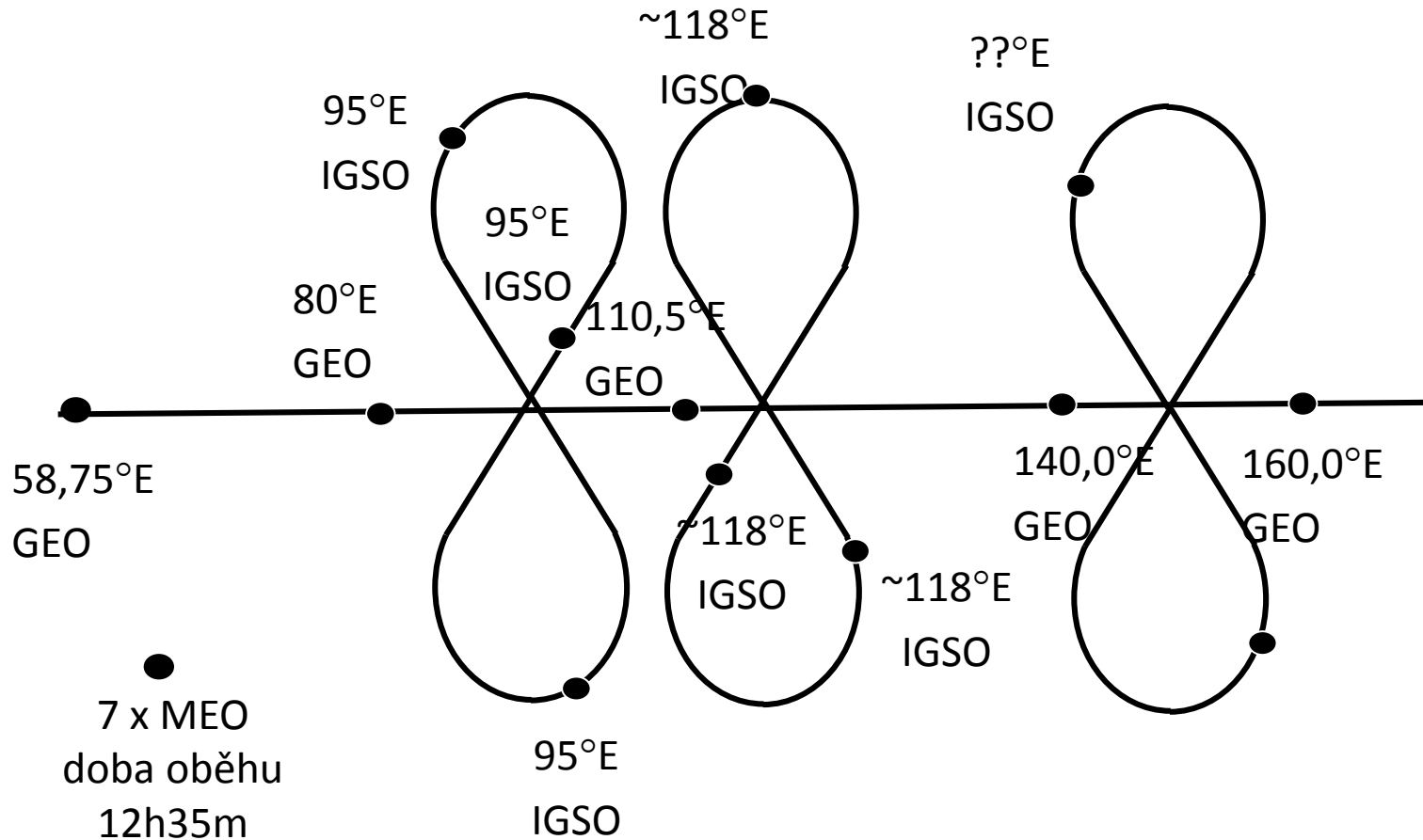
Konečnou konstelaci bude tvořit 35 družic (záměr 2016) :

- 5 na geostacionární dráze (GEO)
- 3 na 3 geosynchronních drahách (IGSO – Inclined Geosynchronous Orbit)
- 27 na 3 středních drahách (MEO)



# SYSTÉMY GNSS - BEIDOU 2/COMPASS

schéma konstelace 2.5.2016

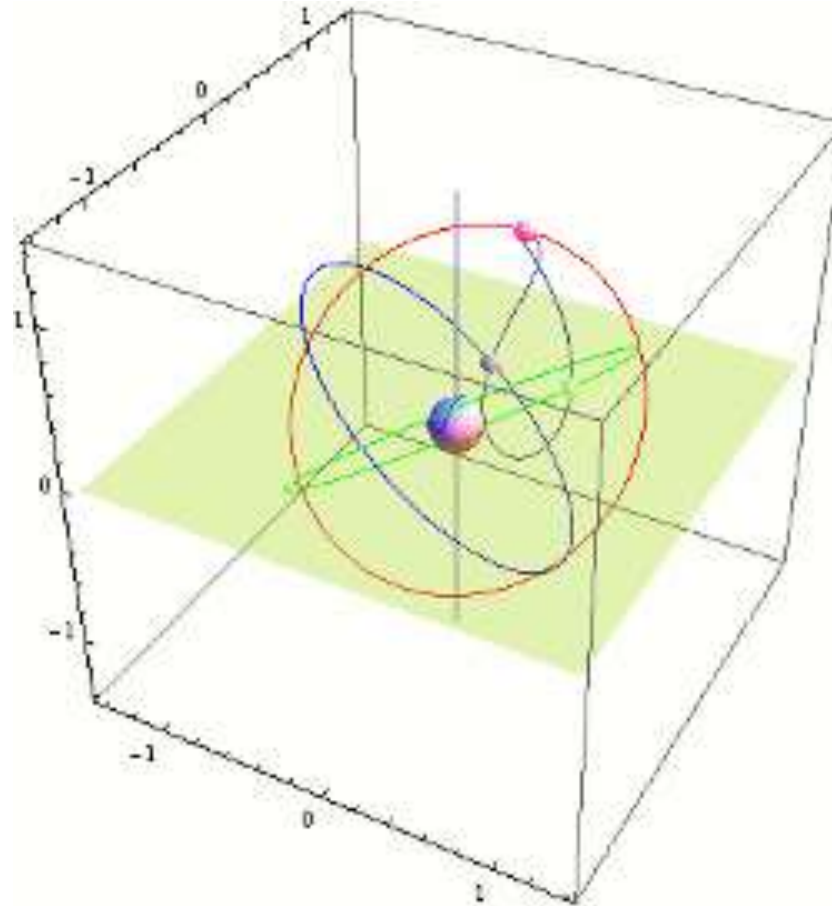


# Co to je IGSO oběžná dráha

- Inclined Geo-Synchronous Orbit
  - doba oběhu 24 h
  - dráha má nenulovou inklinaci (sklon k rovině rovníku)
  - pozemní stopa je „pentle“ kolem jednoho poledníku (může přejít v elipsu), družice střídavě poledník „předbíhá“ a „zpožďuje“ se za ním



# Co to je IGSO oběžná dráha

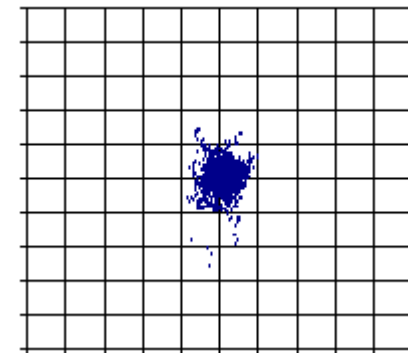


# Přesnost a chyby GNSS. Příčiny chyb

# Typické projevy chyb



červená – přesná poloha  
žlutá - GPS



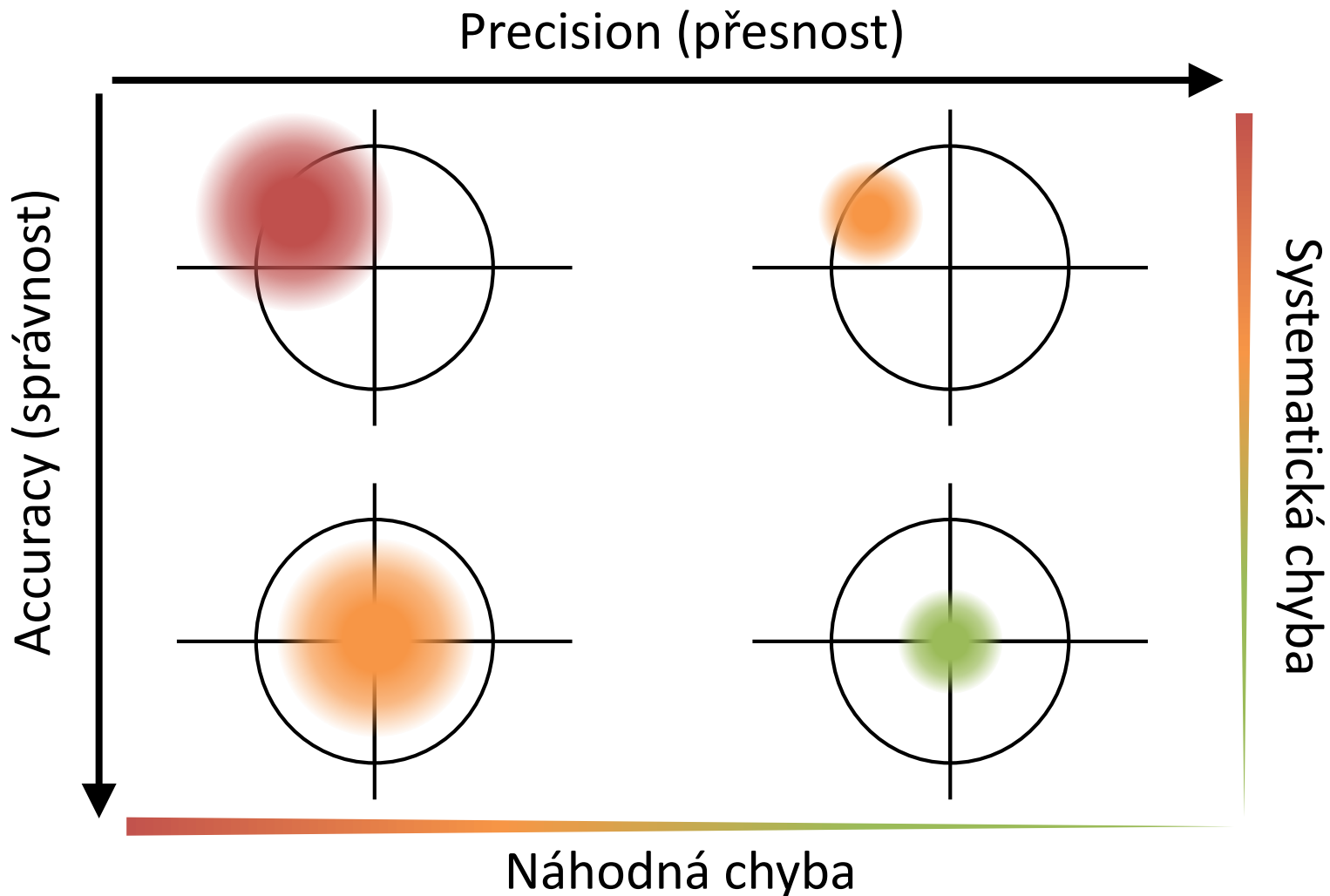
dílek 5 m

Poloha znehodnocena měřením:

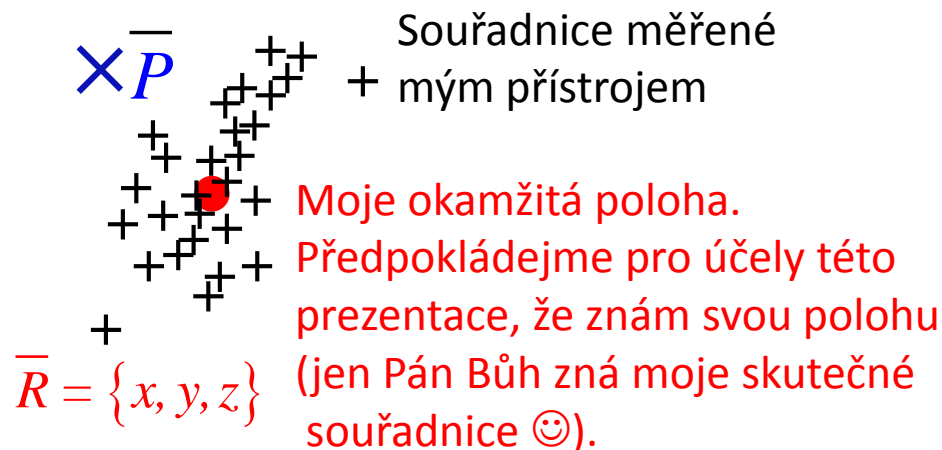
- pod korunami stromů
- v terénních zářezech
- v kaňonech ulic
- v budovách
- ...



# Co je to přesnost?



# Přesnost určení polohy



Bodový graf (scattered plot) je množina souřadnic opakovaných měření v jednom a totéž bodu.

$$\{x_i, y_i, z_i\}_{i=1}^N$$

Jestliže jsou chyby souřadnic nezávislé, rozptyl chyby polohy (rozptyl vzdálenosti  $\bar{P}$  a  $\bar{R}$ ) je

$$\sigma_P^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2$$

Mohu *odhadnout* svou polohu:

$$\bar{P} = \{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}, \quad \text{kde}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i; \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i; \quad \bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i$$

Pokud  $\bar{P} = \bar{R}$  je odhad *nestranný* a není zatížený systematickou chybou (např. mnohacestné šíření signálu).





# Přesnost určení polohy

Experimentálně dostaneme rozptyly z měřených souřadnic (z bodového grafu) jako

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2; \sigma_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2; \sigma_z^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2$$

kde  $N$  je počet bodů v grafu (počet měření).

NATO definovalo přesnost jako vzdálenost od skutečné polohy, v níž se nachází měřený bod s pravděpodobností menší než 0,95.

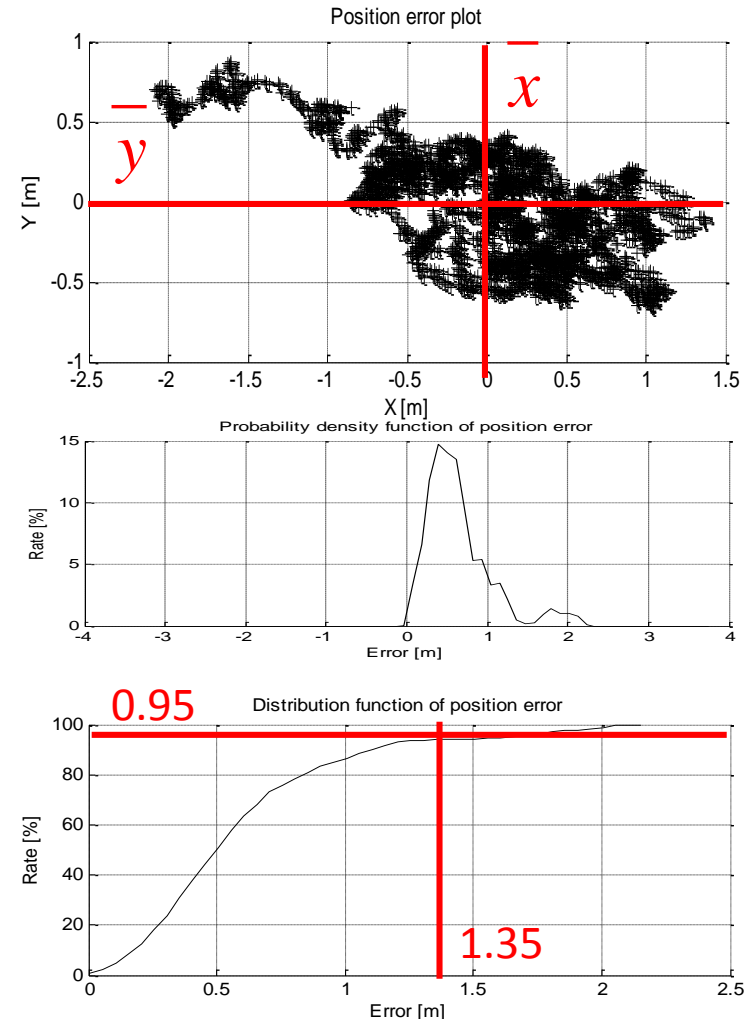
Jak určit tuto hodnotu pokud máme záznam měření polohy v pevném bodě (bodový graf)?



# Přesnost určení polohy

Experimentální určení přesnosti přijímače:

- změříme polohu N bodů  $\{x_i, y_i, z_i\}_{i=1}^N$
- vypočteme střední hodnoty a vzdálenosti  $\sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2}$
- zvolíme intervaly vzdáleností a vypočteme četnosti měření s výsledky v těchto intervalech (získáme histogram)
- sčítáme hodnoty z těchto intervalů a dostáváme distribuční funkci
- čteme nezávislou proměnnou pro hodnotu funkce 0.95



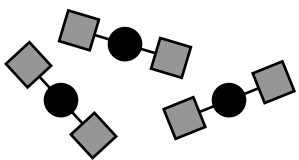
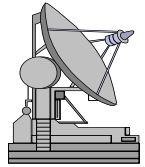
# Přesnost určení polohy

Co ovlivňuje přesnost určení polohy systémy GNSS?

- chyba  $\sigma_d$  měření vzdálenosti mezi družicí a uživatelem, která je
  - známá jako UERE (User Equivalent Range Error)
  - v současnosti přibližně 0,6 m pro GNSS
  - a jejíž příčiny jsou na dalších obrázcích



# Příčiny a velikost chyby UERE měření vzdálenosti uživatel – družice $\sigma_d$ (1975)

Segment	Zdroj chyby	Podíl na ekviv. chybě vzdálenosti $\sigma_d$ [m]
 Kosmický	Stabilita kmitočtového normálu družice	..... 3,0
	Predikce perturbací družice	..... 1,0
	Jiný	..... 0,5
 Řídicí	Chyba modelu predikce efemerid	..... 4,2
	Jiný	..... 0,9
  Uživatelský	Ionosférická refrakce	..... 5,0 - 10,0
	Troposférická refrakce	..... 2,0
	Šum a rozlišovací schopnost přijímače	..... 7,5
	Vícecestné šíření signálu	..... 1,2
	Jiný	..... 0,5

**Celková ekvivalentní chyba měření vzdálenosti  $\sigma_d$  [m] ..... 10,8 - 13,9**

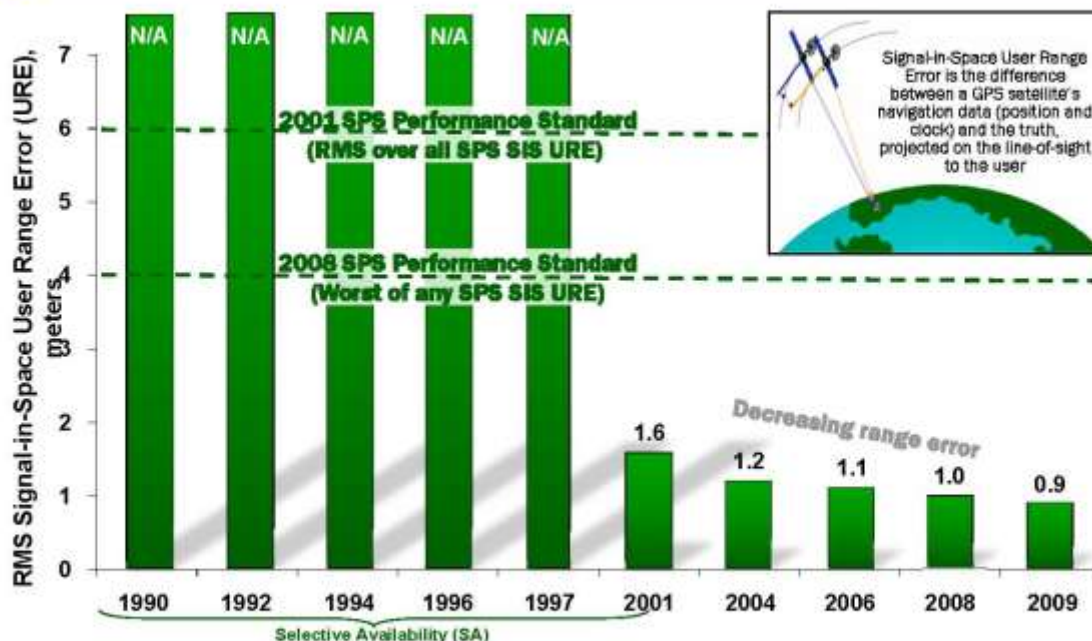


# Velikost chyby UERA měření vzdálenosti pro službu SPS (2010)

zdroj: US Air Force



## SPS Signal in Space Performance



**System accuracy exceeds published standard**

12

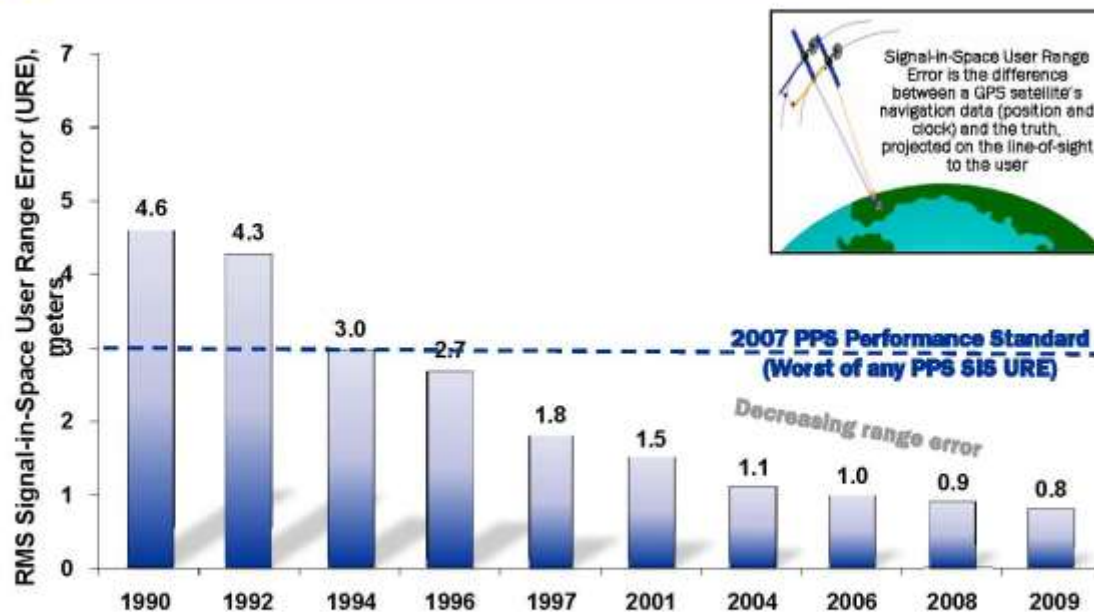


# Velikost chyby UERE měření vzdálenosti pro službu PPS

zdroj: US Air Force



## PPS Signal in Space Performance



**System accuracy exceeds published standard**

13



# Přesnost určení polohy

Co ovlivňuje přesnost určení polohy systémy GNSS?

- chyba  $\sigma_d$  měření vzdálenosti mezi družicí a uživatelem, která je
  - známá jako UERE (User Equivalent Range Error)
  - v současnosti přibližně 0,8 m
- rozložení družic na nebi, charakterizované činitelem **DOP**



# Přesnost určení polohy

- lze odvodit, že střední kvadratickou chybu (odmocnina z rozptylu) určení polohy a času můžeme vyjádřit jako

$$\sigma_G = \sigma_d \mathit{GDOP}$$

kde

$$\mathit{GDOP} = \sqrt{\mathit{tr}(\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1}}$$

kde  $\mathbf{A}$  je matice směrových kosinů

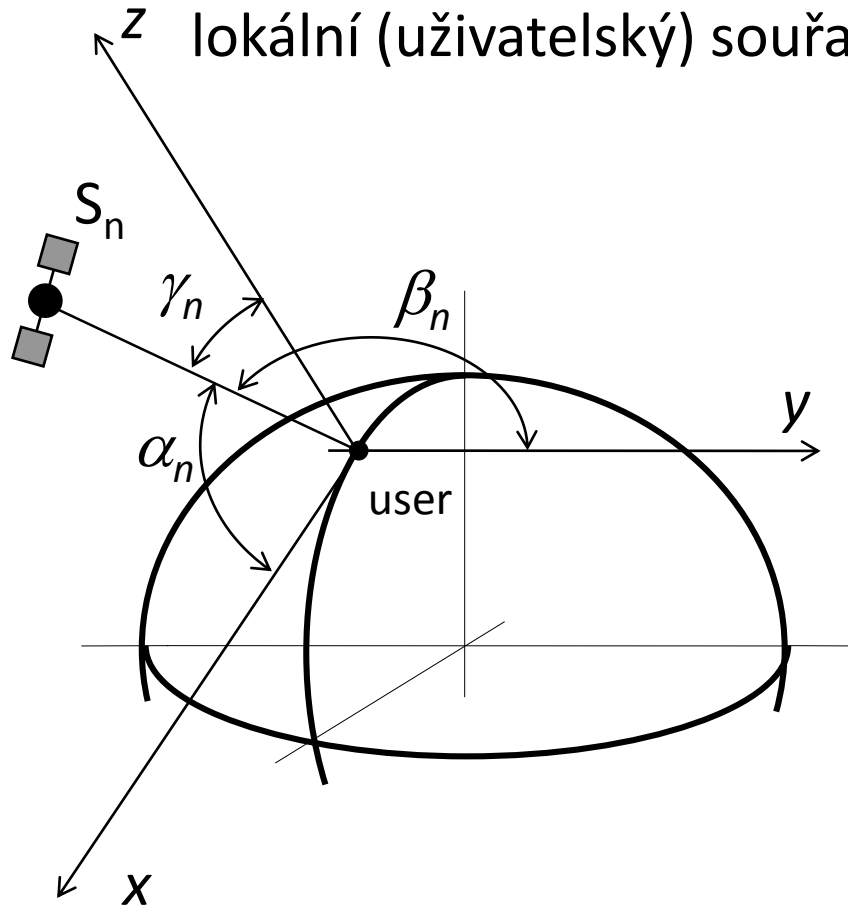
$$\mathit{tr}(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^n a_{ii}$$





# Přesnost určení polohy

## DOP a matice směrových kosinů



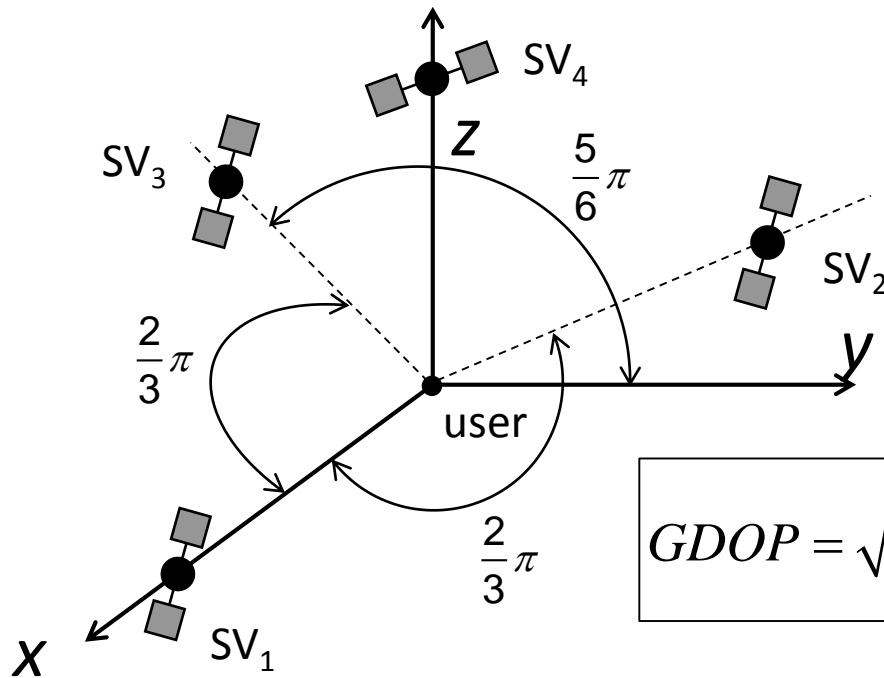
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cos \alpha_n & \cos \beta_n & \cos \gamma_n & 1 \end{bmatrix}$$

$n$  – počet viditelných družic

$n \geq 4$



# Přesnost určení polohy činitel GDOP



$SV_n$	$\alpha_n$	$\beta_n$	$\gamma_n$
1	0	$-\frac{\pi}{2}$	$+\frac{\pi}{2}$
2	$\frac{2}{3}\pi$	$\frac{\pi}{6}$	$-\frac{\pi}{2}$
3	$-\frac{2}{3}\pi$	$\frac{5}{6}\pi$	$-\frac{\pi}{2}$
4	$-\frac{\pi}{2}$	$+\frac{\pi}{2}$	0

$$GDOP = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}} = \sqrt{\frac{9}{3}} = 1.732$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

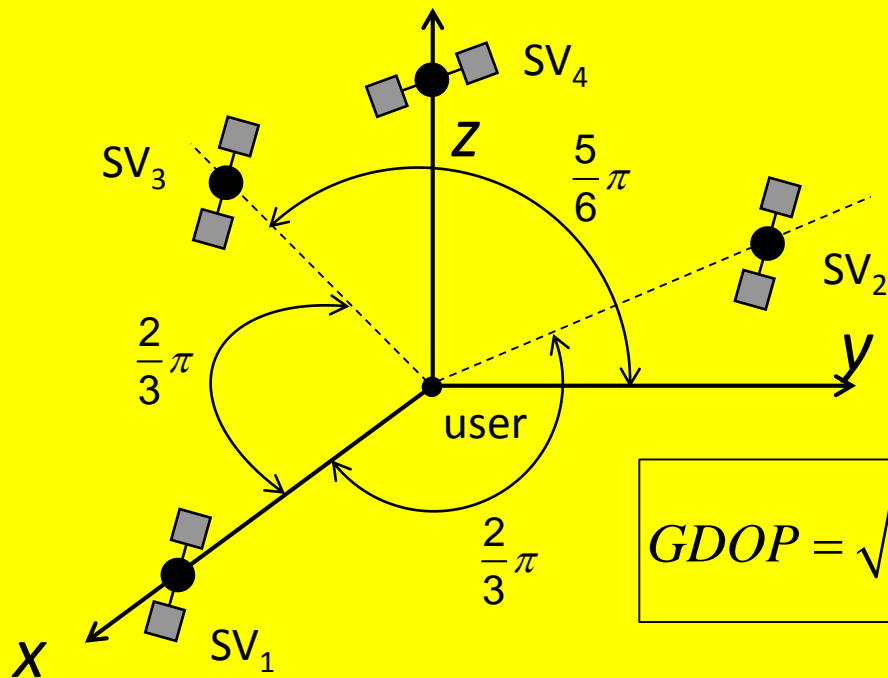
$$\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2} & \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 4 \end{bmatrix}$$

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{4}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$$



# Přesnost určení polohy činitel GDOP



$SV_n$	$\alpha_n$	$\beta_n$	$\gamma_n$
1	0	$-\frac{\pi}{2}$	$+\frac{\pi}{2}$
2	$\frac{2}{3}\pi$	$\frac{\pi}{6}$	$-\frac{\pi}{2}$
3	$-\frac{2}{3}\pi$	$\frac{5}{6}\pi$	$-\frac{\pi}{2}$
4	$-\frac{\pi}{2}$	$+\frac{\pi}{2}$	0

$$GDOP = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}} = \sqrt{\frac{9}{3}} = 1.732$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2} & \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 4 \end{bmatrix}$$

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{4}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$$



# Přesnost určení polohy činitelé DOP

Podobně můžeme vyjádřit směrodatnou odchylku chyby

- v 3D prostoru

$$\sigma_P = \sigma_d PDOP$$

- ve vodorovné rovině (2D)

$$\sigma_H = \sigma_d HDOP$$

- ve svislém směru (výška nad referenčním elipsoidem)

$$\sigma_z = \sigma_d VDOP$$

- v čase

$$\sigma_t = \sigma_d TDOP$$



# Přesnost určení polohy činitele DOP

Zbývající činitele DOP můžeme získat z inverzní matice  $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$  zachováním řádků a sloupců odpovídajících souřadným osám příslušného prostoru a vynecháním ostatních. Pro 4 družice zmíněné konstelace dostaneme

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{4}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} GDOP &= \sqrt{\text{tr}(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}} = \sqrt{\frac{9}{3}} = 1.732 & PDOP &= \sqrt{\frac{8}{3}} = 1.633 \\ HDOP &= \sqrt{\frac{4}{3}} = 1.155 & VDOP &= \sqrt{\frac{4}{3}} = 1.115 \\ TDOP &= \sqrt{\frac{1}{3}} = 0.577 \end{aligned}$$



# Přesnost určení polohy činitele DOP

Zbývající činitele DOP můžeme získat z inverzní matice  $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$  zachováním řádků a sloupců odpovídajících souřadným osám příslušného prostoru a vynecháním ostatních. Pro 4 družice zmíněné konstelace dostaneme

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{4}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

$$GDOP = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}} = \sqrt{\frac{9}{3}} = 1.732 \quad PDOP = \sqrt{\frac{8}{3}} = 1.633$$

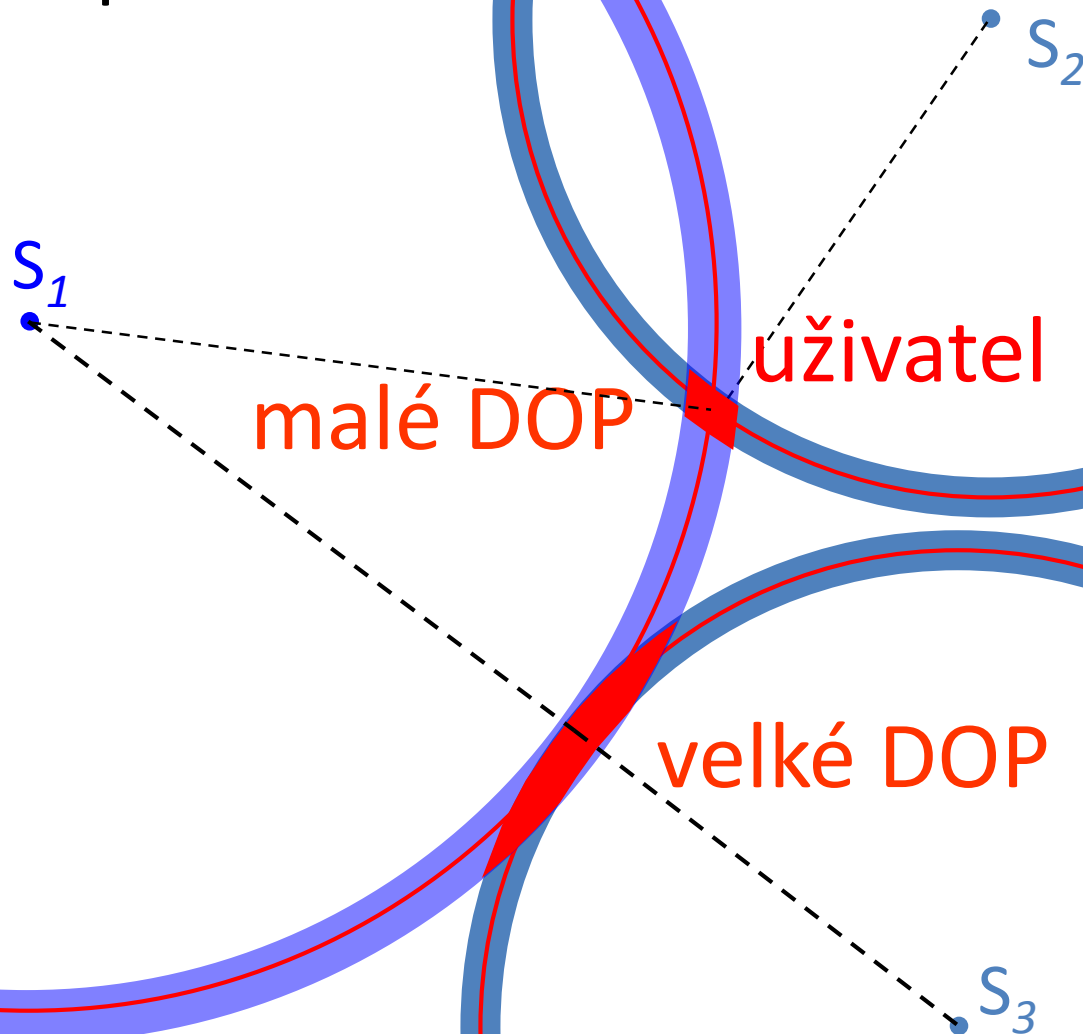
$$HDOP = \sqrt{\frac{4}{3}} = 1.155 \quad VDOP = \sqrt{\frac{4}{3}} = 1.115$$

$$TDOP = \sqrt{\frac{1}{3}} = 0.577$$



# Přesnost určení polohy

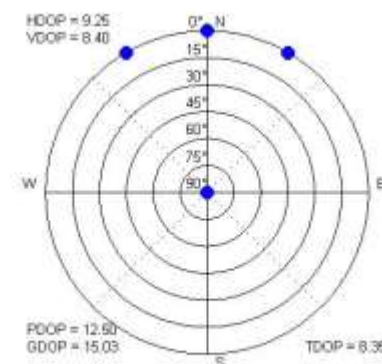
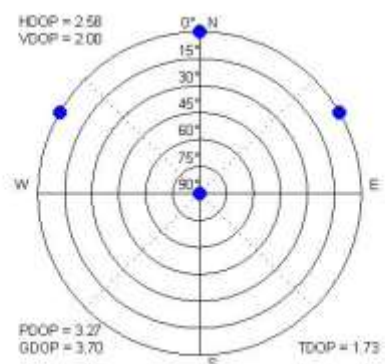
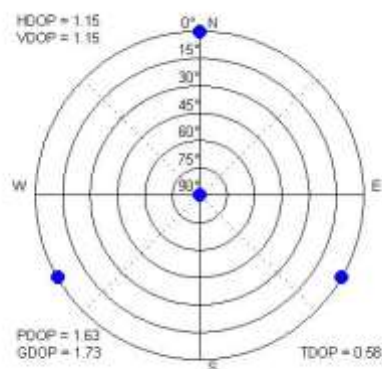
## Interpretace činitelů DOP



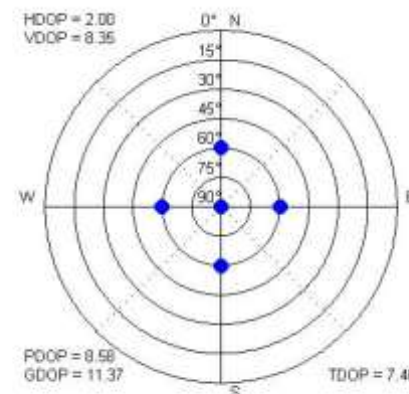
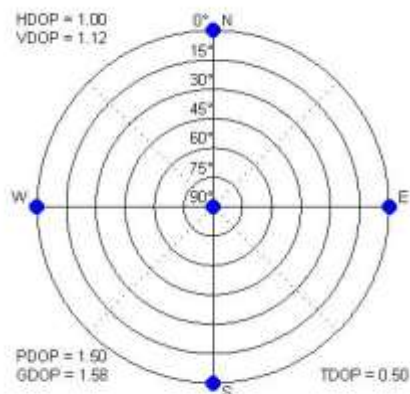
# Přesnost určení polohy

## Chování činitelů DOP – několik příkladů

### 4 družice:



### 5 družic:

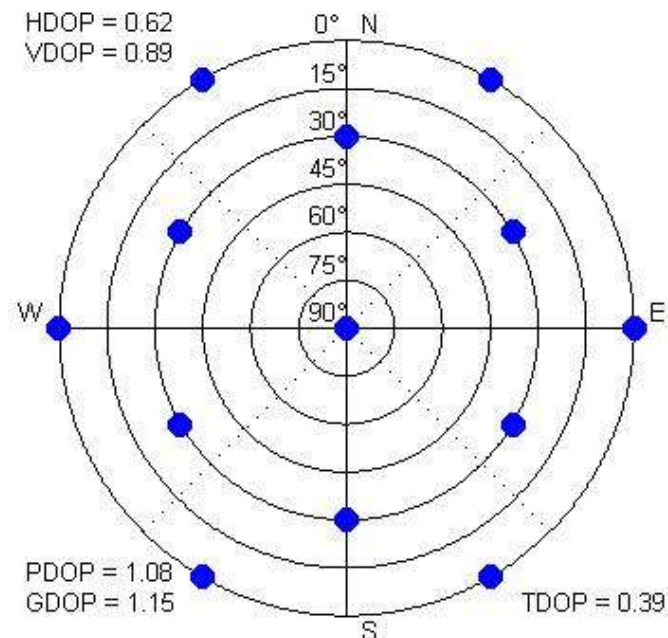
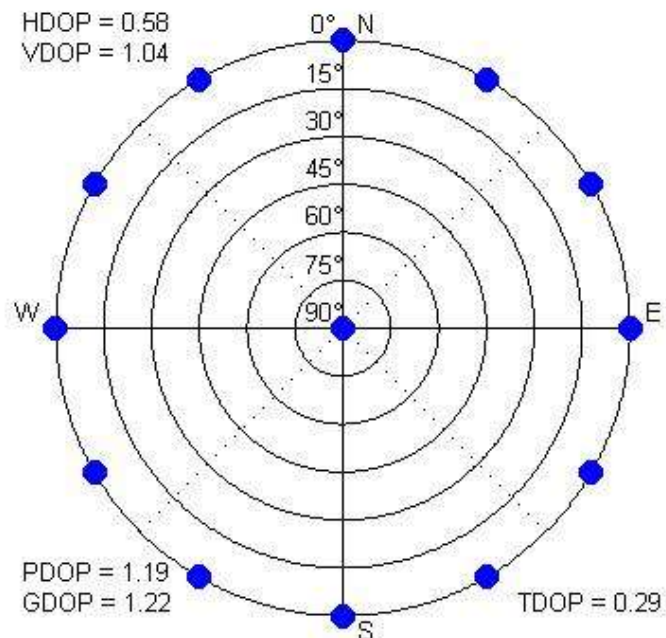




# Přesnost určení polohy

## Chování činitelů DOP – několik příkladů

13 družic:



# Přesnost určení polohy

## Chování činitelů DOP - závěr

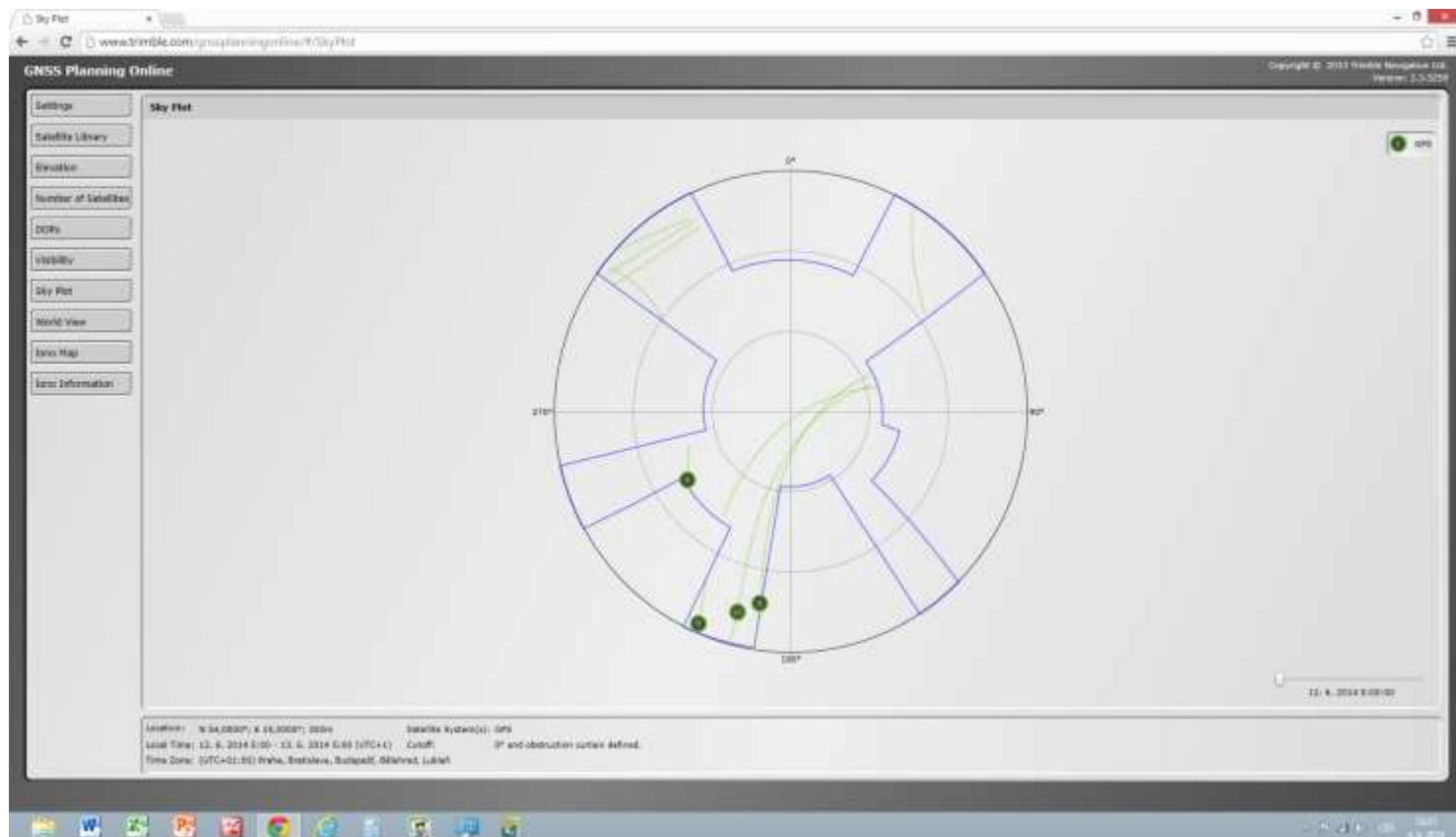
- Platí:
  - zvětšováním počtu družic klesá DOP.
  - pokud jsou družice v jedné rovině, DOP může růst nade všechny meze.
  - pokud se zvýší elevační maska, roste DOP
  - když se družice na obloze přiblíží k sobě, vzroste DOP.



# Přesnost určení polohy

## Chování činitelů DOP - závěr

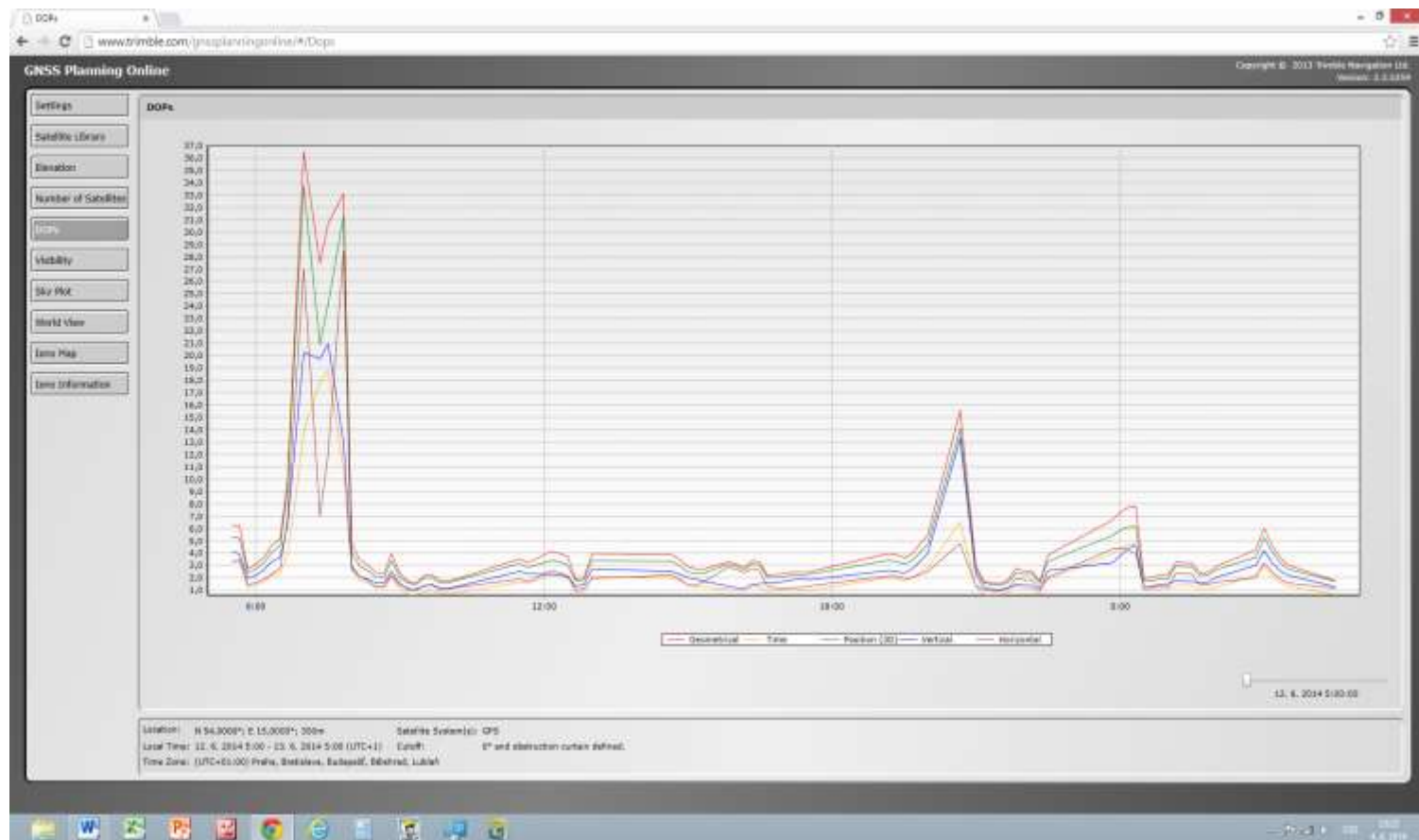
Typická situace v městské zástavbě (program Trimble Planning)



# Přesnost určení polohy

## Chování činitelů DOP - závěr

Průběh DOP v závislosti na čase pro danou zástavbu

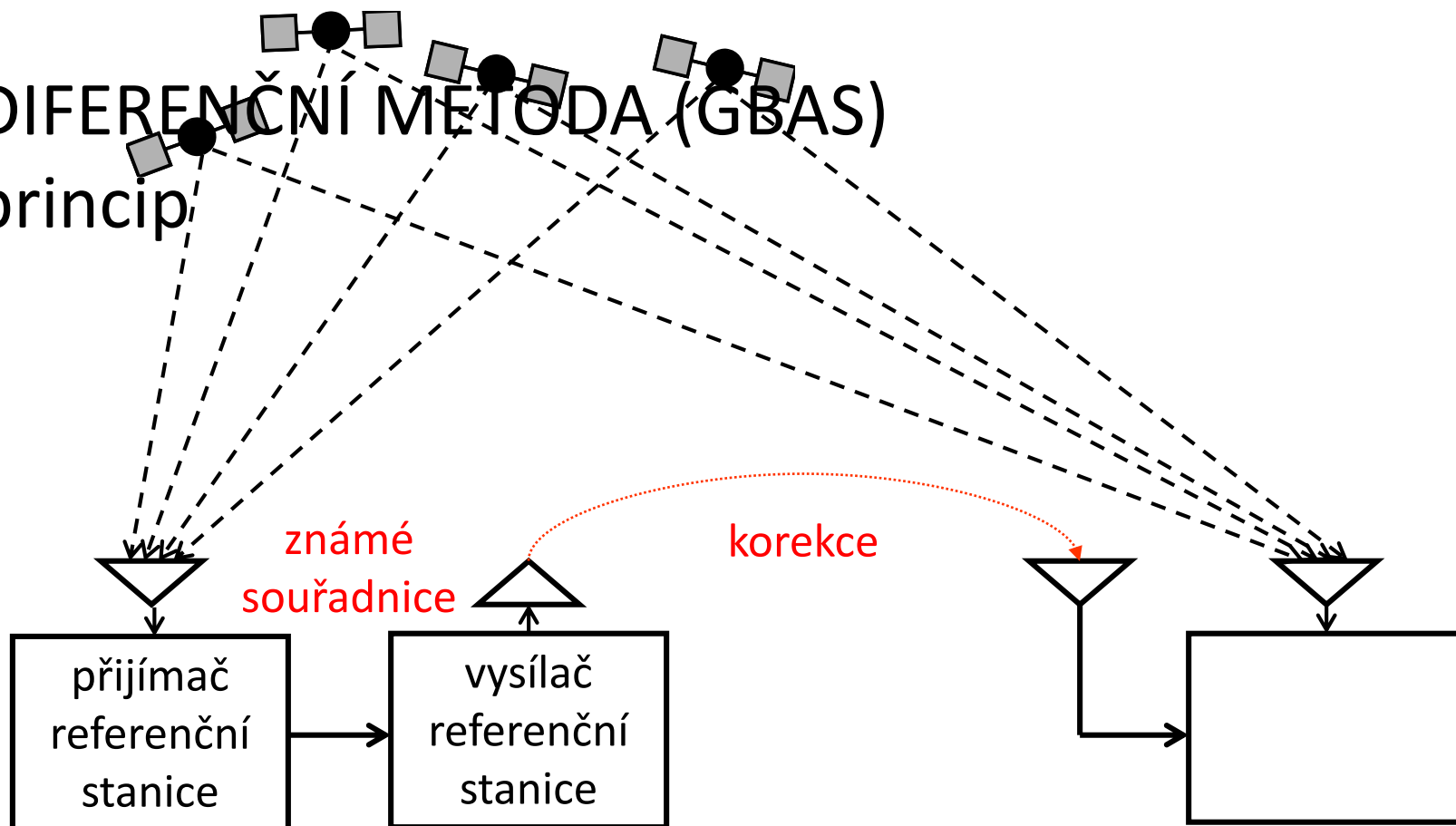


# Potlačení chyb

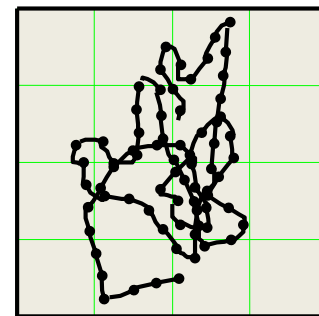
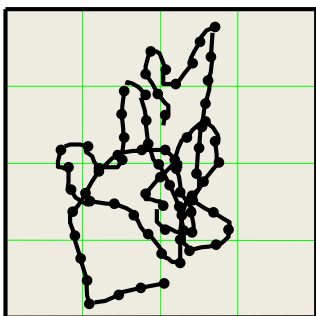
# Diferenční metody

# DIFERENČNÍ METODA (GBAS)

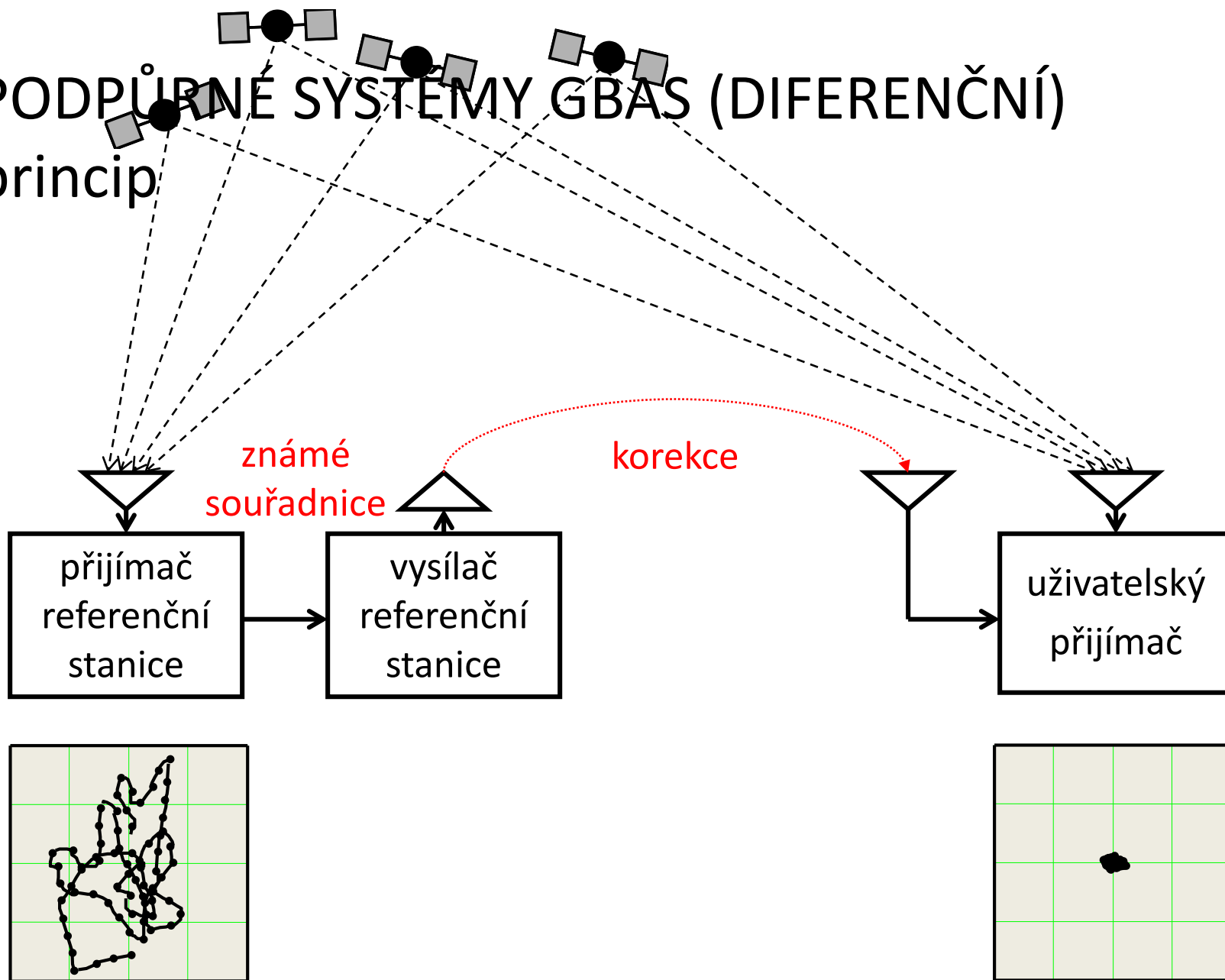
princip



Měření blízkých přijímačů je zatíženo korelovanými chybami



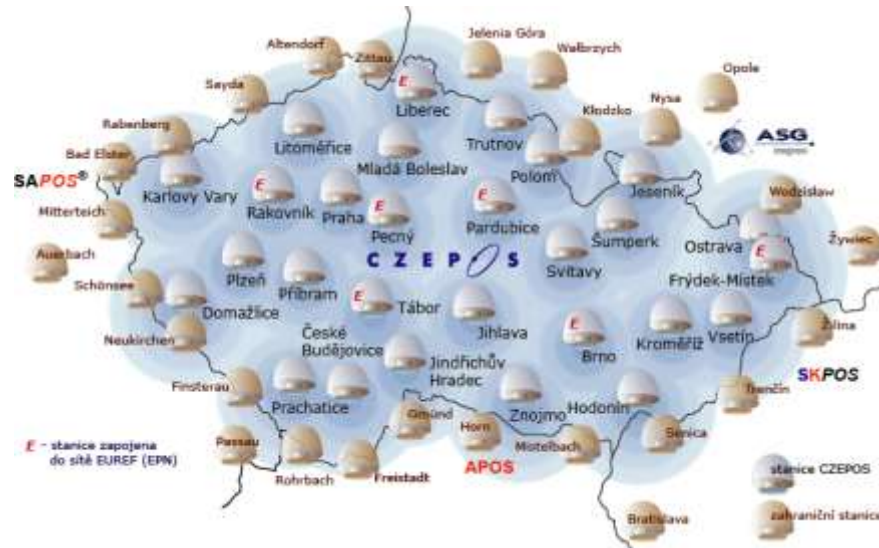
# PODPŮRNÉ SYSTÉMY GBAS (DIFERENČNÍ) princip





# Získání korekcí

- od některého provozovatele referenčních stanic, tj. služby GBAS/SBAS
  - v ČR např. ČÚZAK produkuje korekce CZEPOS
- z vlastní referenční stanice



# Získání korekcí

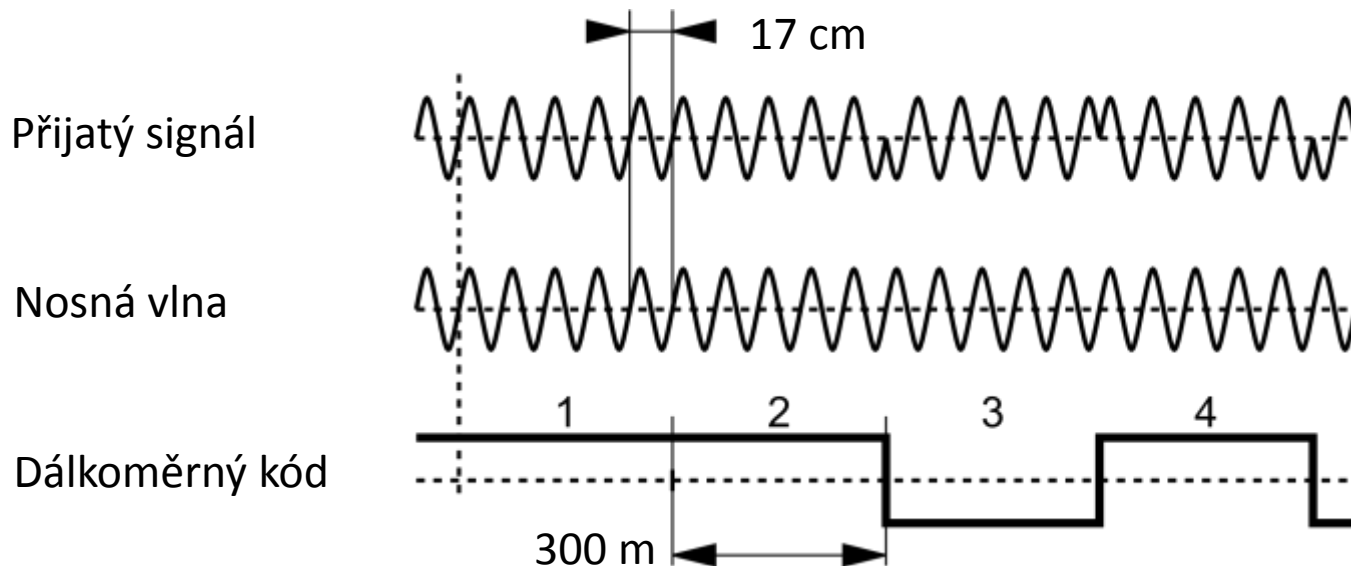
- od některého provozovatele služby GBAS/SBAS
  - v ČR např. ČÚZAK produkuje korekce CZEPOS
  - ze systému SBAS, např. EGNOS
- z vlastní referenční stanice
  - kvalita stejná jako v předchozím případě



# Real-Time Kinematics (RTK)

# RTK - využití fáze nosné vlny

- Měření fáze je nejednoznačné
  - není známa počáteční fáze
- Přesnost na jednotky stupňů
  - na frekvenci L1 jednotky milimetrů



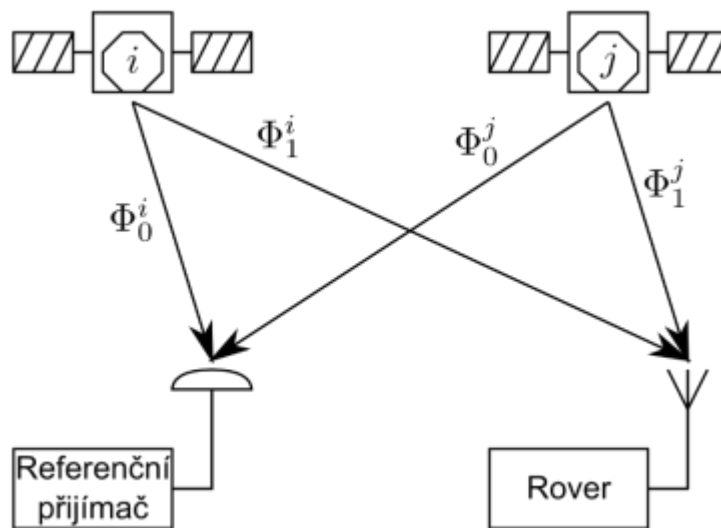
# RTK - potlačení chyb dvojitými diferencemi

## 1. difference: přijímač „rover“ – referenční přijímač

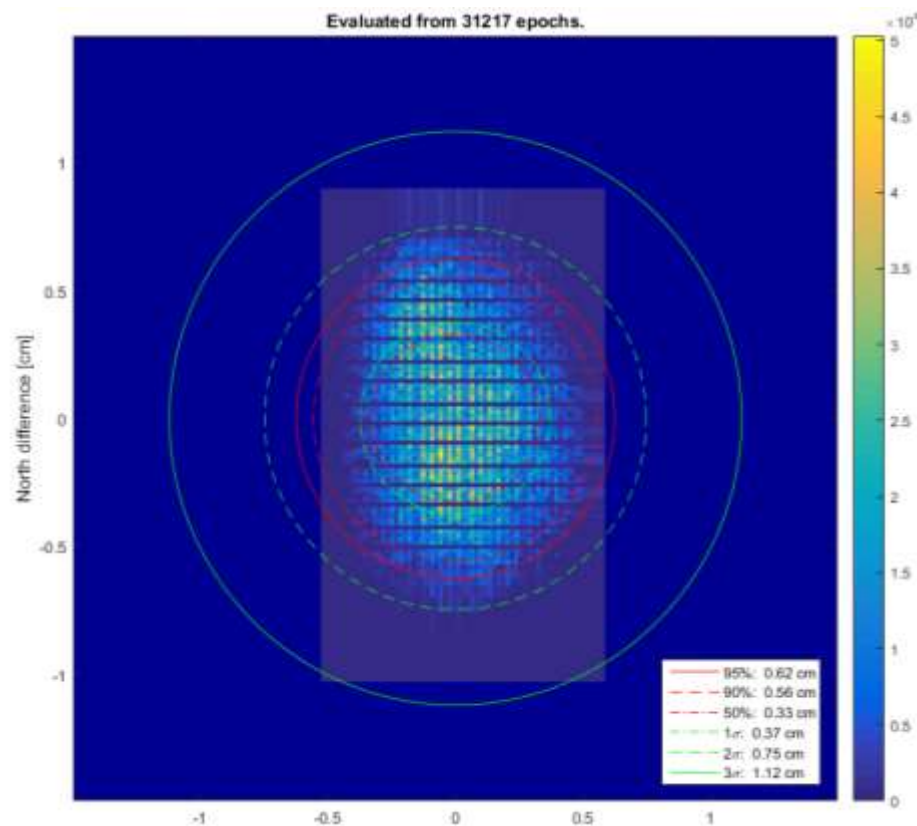
- Eliminovány chyby družice (chyby efemerid, hodin, RF systému)
- Potlačeny chyby šířením (ionosféra, troposféra)

## 2. difference: družice – „referenční“ družice

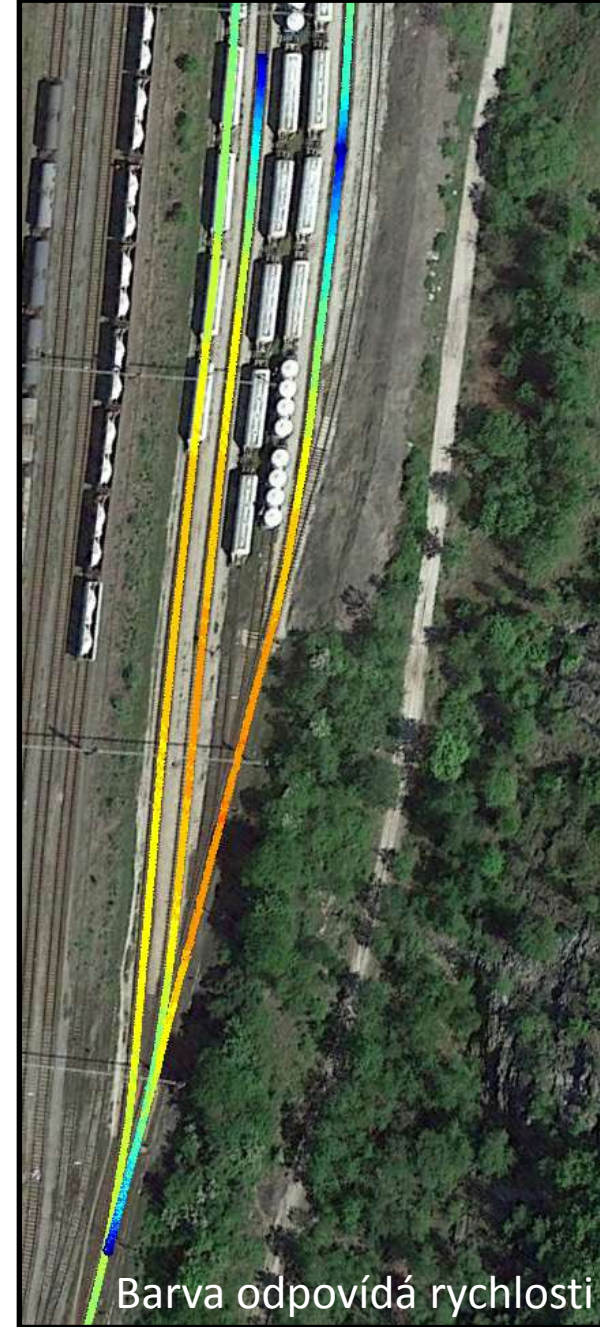
- Eliminovány chyby přijímačů (hodin, RF systému)



# RTK výsledky experimentu



Statické měření: R95 = 6,2 mm



Potlačení chyb  
Podporou jinými zdroji údajů o  
poloze

# Určování polohy za obtížných podmínek

## Obtížné podmínky:

- slabý signál
  - družice zastíněné vegetací
  - družice zastíněné zástavbou, terénním zářezem, ap.
    - slabý signál
    - velké DOP
  - požadavek na příjem v budovách (indoor)
- signál postižený mnohacestným šířením
- řešení
  - „novými signály“ družic
  - podpůrnými signály
  - zpracováním signálu v uživatelském přijímači





# Zlepšování přesnosti určování polohy nové signály GNSS

- přesnost závisí na korelační funkci družicového signálu
  - potlačení vícecestného šíření
    - ostřejší korelační funkce
      - nesečtou se korelační funkce přímého a odraženého signálu
      - obě funkce lze oddělit
      - korelační funkci odraženého signálu lze potlačit



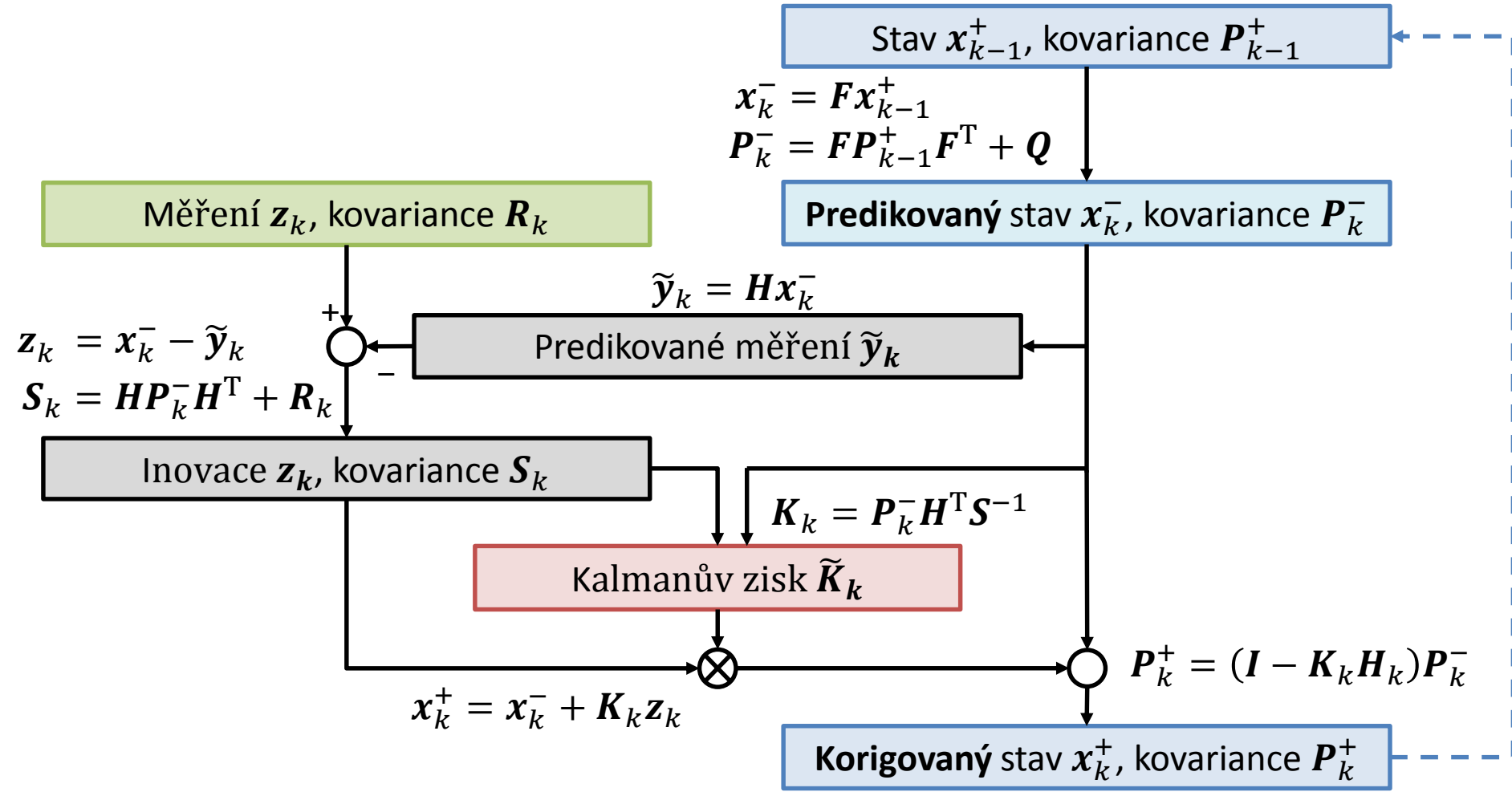
# Zlepšování přesnosti určování polohy podpůrné signály GNSS a jejich zdroje

- referenční stanice, korekce – viz výše
- rádiové signály s velkou šířkou pásma a s dostatečnou intenzitou elmag. pole pro překonání obtížných podmínek (indoor příjem, příjem pod vegetací, ap.), tzv. „signals of opportunity“
  - DVB-T
  - LTE
- signály spec. rádiových vysílačů a majáků
  - eLORAN
  - systémy vlastní konstrukce využívající spec. signály
- nerádiová čidla parametrů pohybu
  - inerciální a gyroskopické systémy
- **nutná fúze dat**



# Zlepšování přesnosti určování polohy

## Fúze dat: Kalmanova filtrace



# Typy Kalmanových filtrů

- *(Lineární) Kalmanův filtr*
  - Optimální estimátor stavu známých lineárních náhodných systémů s aditivním Gaussovským šumem
- *Rozšířený KF, Extended KF (EKF)*
  - Suboptimální algoritmus pro nelineární systémy
  - Využita linearizace v bodě odhadu
  - komplikované ladění, tíhne k oscilacím
- *Unscented Kalman filter (UKF)*
  - Místo linearizace využívá „Unscented“ transformaci
  - Lépe aproximuje transformaci náhodného rozložení



# Zlepšování přesnosti určování polohy

## nové metody zpracování signálu uživatelem

### Zpracování signálů GNSS na více kmitočtových pásmech:

- wide-laning
  - vytváříme signály s mnohem delší vlnovou délkou
  - využíváme k tomu toho, že všechny kmitočty GNSS jsou celistvými násobky základního kmitočtu 1,023 MHz
  - představme si signál v prostoru (zastavený čas) a vytvořme pásma (lane) šířky  $\lambda$ ; fáze signálu se v nich mění v intervalu  $<0, 2\pi$ )

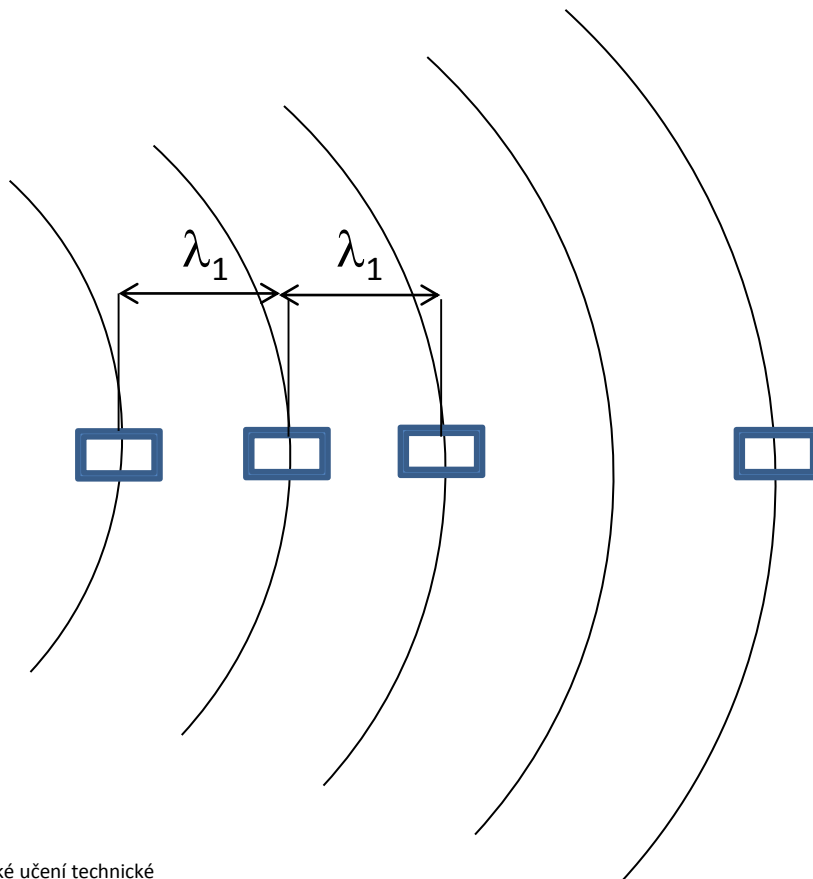


# Zlepšování přesnosti určování polohy

## nové metody zpracování signálu uživatelem

- wide-laning

1. poloze přijímače odpovídá čára stejné fáze
2. přijímač ale může být na všech čárách s poloměrem o  $\lambda_1$  větším – nejednoznačnost



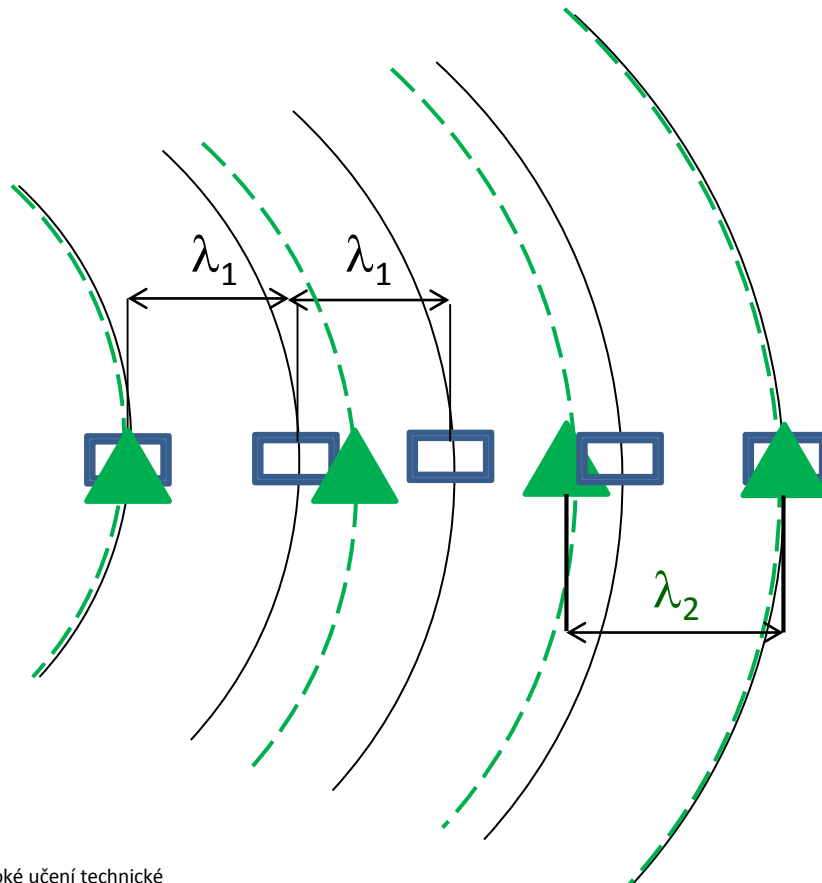
Zlepšování přesnosti družicové navigace



# Zlepšování přesnosti určování polohy

## nové metody zpracování signálu uživatelem

- wide-laning

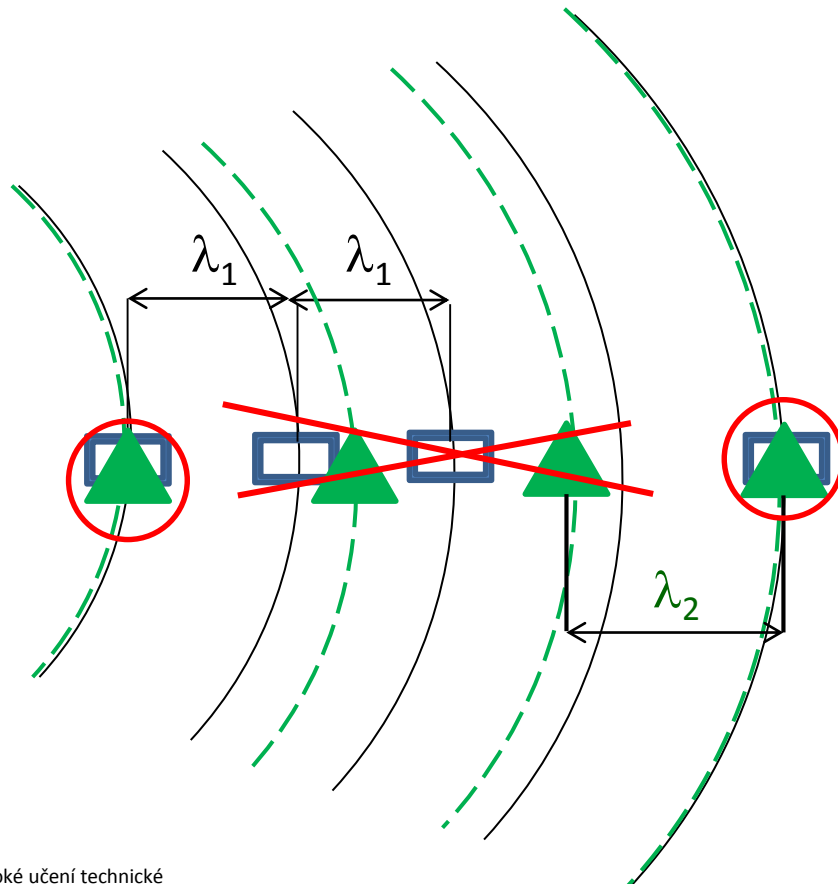


1. poloze přijímače odpovídá čára stejné fáze
2. přijímač ale může být na všech čárách s poloměrem o  $\lambda_1$  větším – nejednoznačnost
3. na kmitočtu  $f_2$  je obdobná situace,  $\lambda_2=c/f_2$



# Zlepšování přesnosti určování polohy nové metody zpracování signálu uživatelem

- wide-laning



1. poloze přijímače odpovídá čára stejné fáze
2. přijímač ale může být na všech čarách s poloměrem o  $\lambda_1$  větším – nejednoznačnost
3. na kmitočtu  $f_2$  je obdobná situace,  $\lambda_2=c/f_2$
4. přijímač může být jen čarách stejné fáze společných oběma kmitočtům – nejednoznačnost se zmenšila

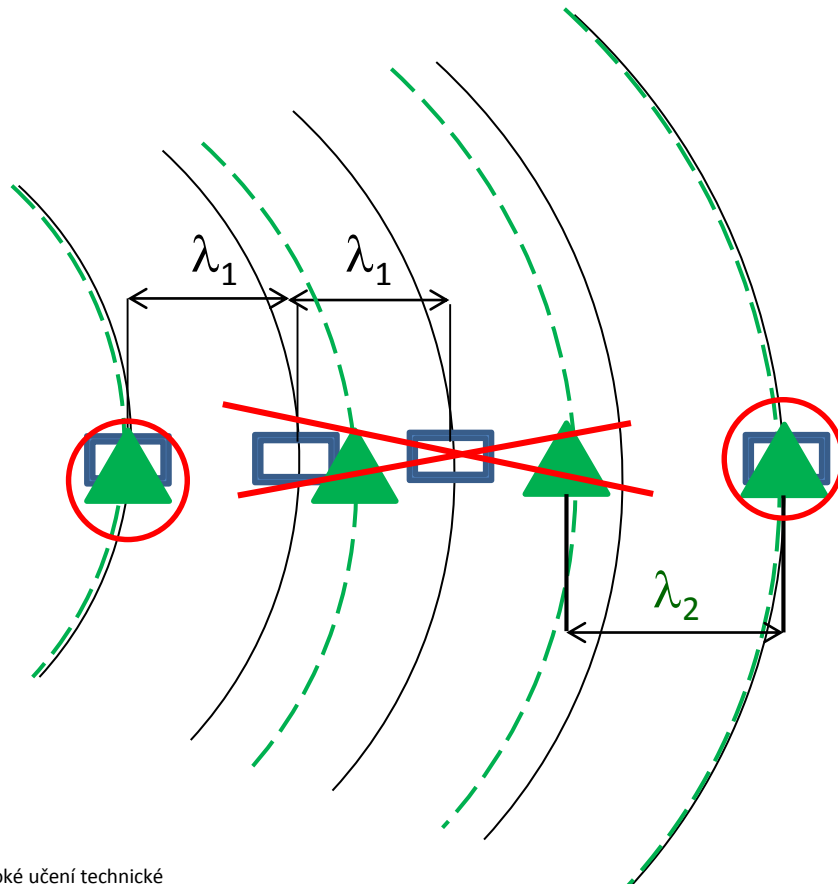




# Zlepšování přesnosti určování polohy

## nové metody zpracování signálu uživatelem

- wide-laning

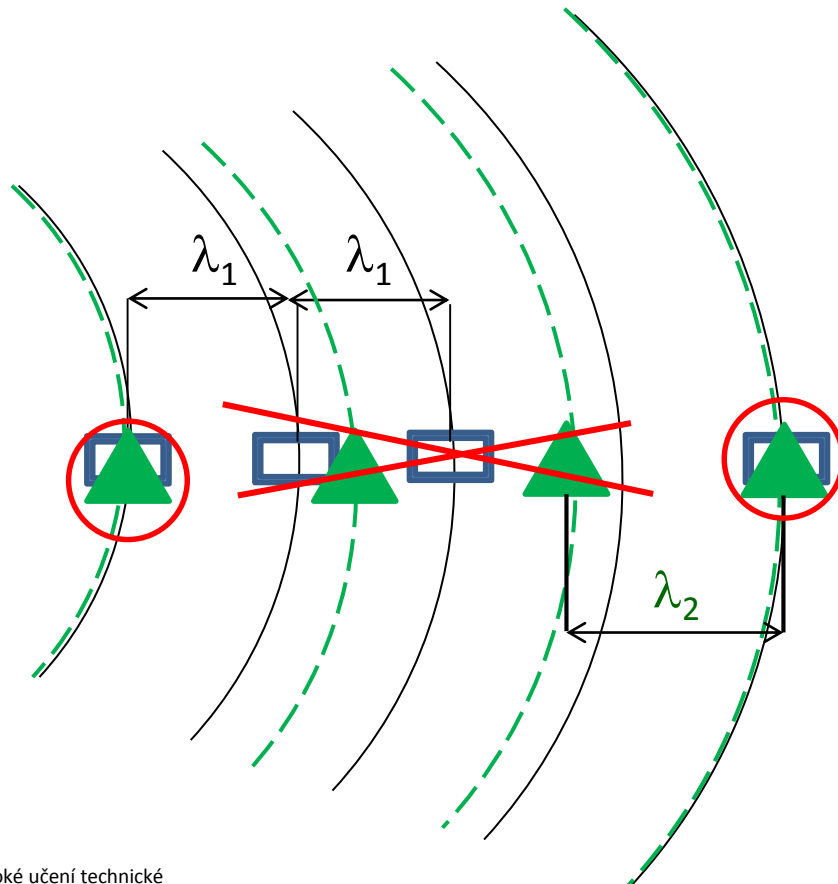


1. poloze přijímače odpovídá čára stejné fáze
2. přijímač ale může být na všech čarách s poloměrem o  $\lambda_1$  větším – nejednoznačnost
3. na kmitočtu  $f_2$  je obdobná situace,  $\lambda_2=c/f_2$
4. přijímač může být jen čarách stejné fáze společných oběma kmitočtům – nejednoznačnost se zmenšila
5. vytvořila se virtuální pásma šířky  $m\lambda_1=n\lambda_2$ ,  $m$  a  $n$  jsou celá nesoudělná čísla



# Zlepšování přesnosti určování polohy nové metody zpracování signálu uživatelem

- wide-laning

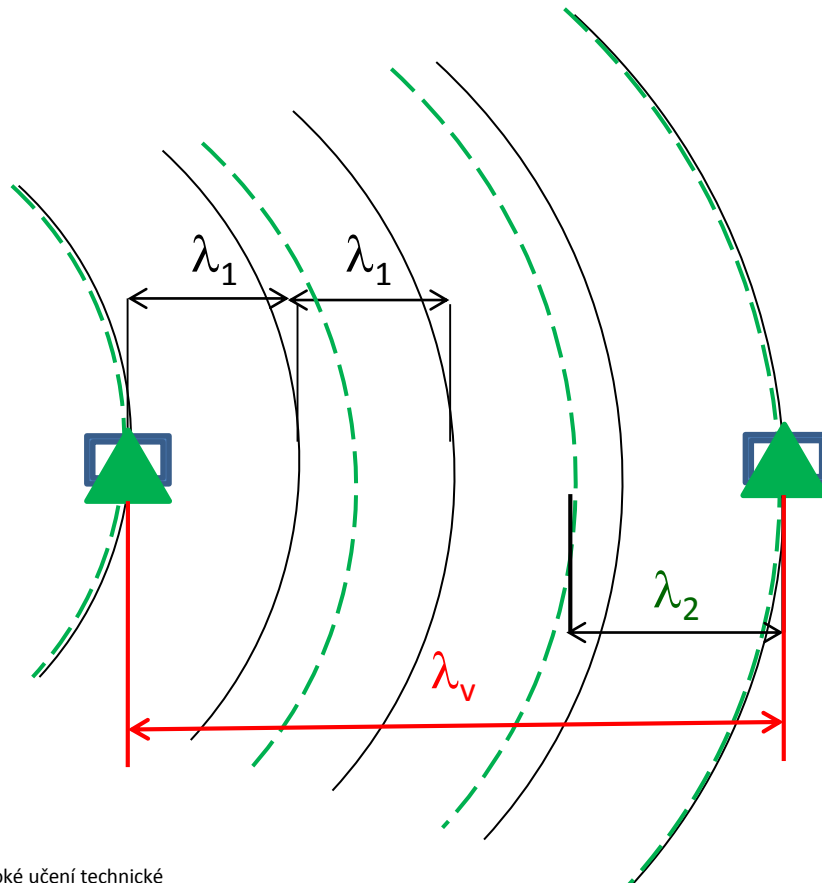


1. poloze přijímače odpovídá čára stejné fáze
2. přijímač ale může být na všech čarách s poloměrem o  $\lambda_1$  větším – nejednoznačnost
3. na kmitočtu  $f_2$  je obdobná situace,  $\lambda_2=c/f_2$
4. přijímač může být jen čarách stejné fáze společných oběma kmitočtům – nejednoznačnost se zmenšila
5. vytvořila se virtuální pásma šířky  $m\lambda_1=n\lambda_2$ ,  $m$  a  $n$  jsou celá nesoudělná čísla
6. pracujeme na virtuálním, podstatně nižším kmitočtu  $f_v=c/m\lambda_1=c/n\lambda_2$



# Zlepšování přesnosti určování polohy nové metody zpracování signálu uživatelem

- wide-laning



7. s výhodou užijeme pro odstranění nejednoznačnosti fáze, jako prostředek proti prokluzu pásem, uplatní se rovněž při potlačení vlivu ionosféry a při potlačení šumu přijímače



# Zlepšování přesnosti určování polohy nové metody zpracování signálu uživatelem

System	Signal	Frequency (MHz)	Wavelength $\lambda_i$ (m)	Signals combined	Widelane $\lambda_W$ (m)	Narrowlane $\lambda_N$ (m)
	$i$	$f_i$	$\lambda_i = c/f_i$	$ij$	$c/(f_i - f_j)$	$c/(f_i + f_j)$
GPS	$L1$	1575.420	$\lambda_{L1} = 0.190$	$L1, L2$	0.862	0.107
	$L2$	1227.600	$\lambda_{L2} = 0.244$	$L1, L5$	0.751	0.109
	$L5$	1176.450	$\lambda_{L5} = 0.255$	$L2, L5$	5.861	0.125
GLONASS ( $k=0$ )	$G1$	1602.000	$\lambda_{G1} = 0.187$	$G1, G2$	0.842	0.105
	$G2$	1246.000	$\lambda_{G2} = 0.241$	$G1, G3$	0.760	0.107
	$G3$	1204.704	$\lambda_{G3} = 0.249$	$G2, G3$	7.827	0.122
Galileo	$E1$	1575.420	$\lambda_{E1} = 0.190$	$E1, E5b$	0.814	0.108
	$E5b$	1207.140	$\lambda_{E5b} = 0.248$	$E1, E5a$	0.751	0.109
	$E5a$	1176.450	$\lambda_{E5a} = 0.255$	$E5b, E5a$	9.768	0.126

S poděkováním Navipedia

Podobně jako wide-planing použijeme u GPS tzv. tri-planing na kmitočtech L1, L2 a L5.



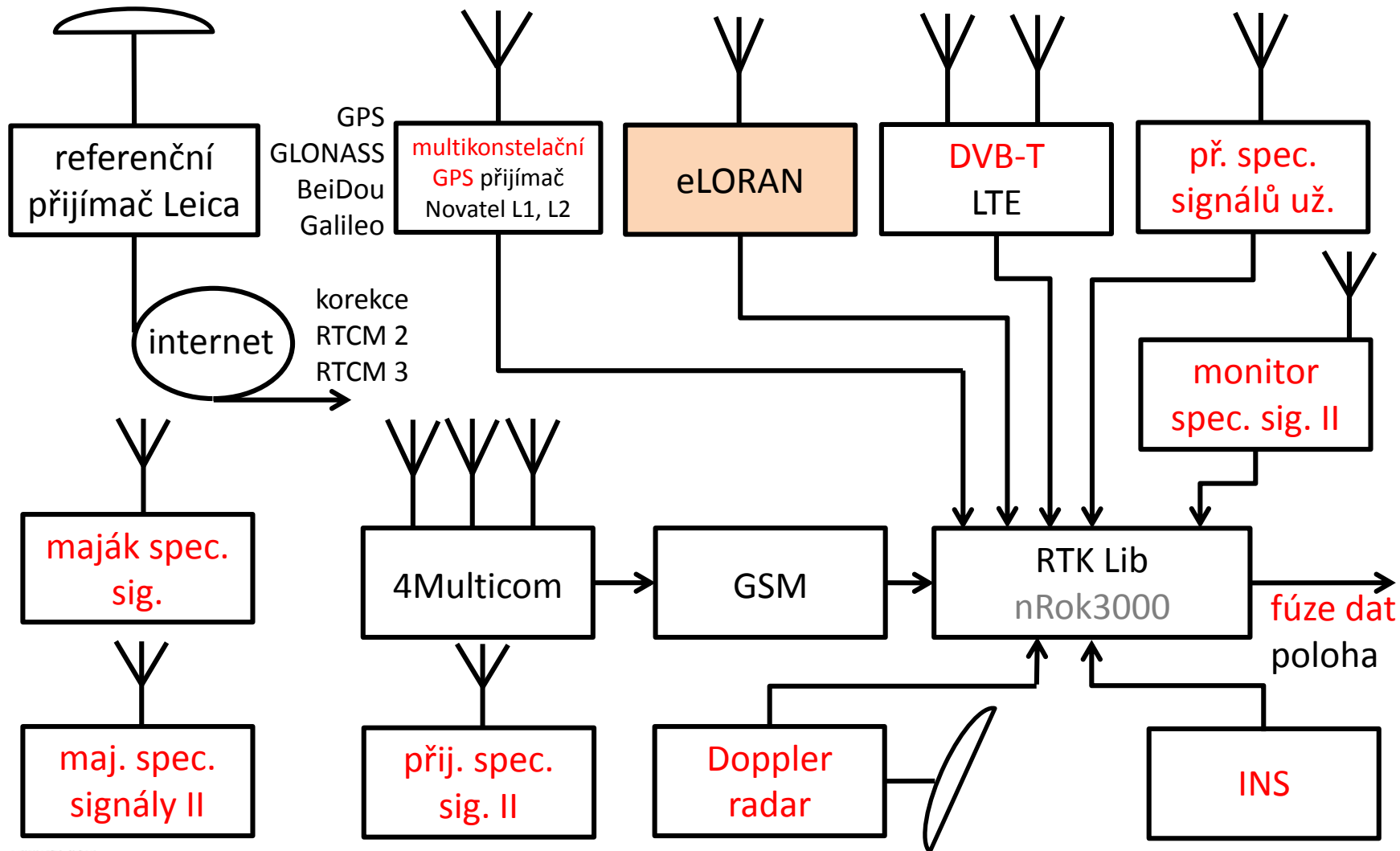
# System určování polohy za obtížných podmínek

Centrum integrovaných družicových a pozemských  
rádiových navigačních systémů

DEMONSTRÁTOR

# System určování polohy za obtížných podmínek

Experimentální zařízení „MACEK 2017“ (demonstrátor)



# System určování polohy za obtížných podmínek

## Experimentální zařízení „MACEK 2017“ (demonstrátor)



# Výsledky experimentů



# System určování polohy za obtížných podmínek

## Experimentální zařízení „MACEK 2017“ (demonstrátor)

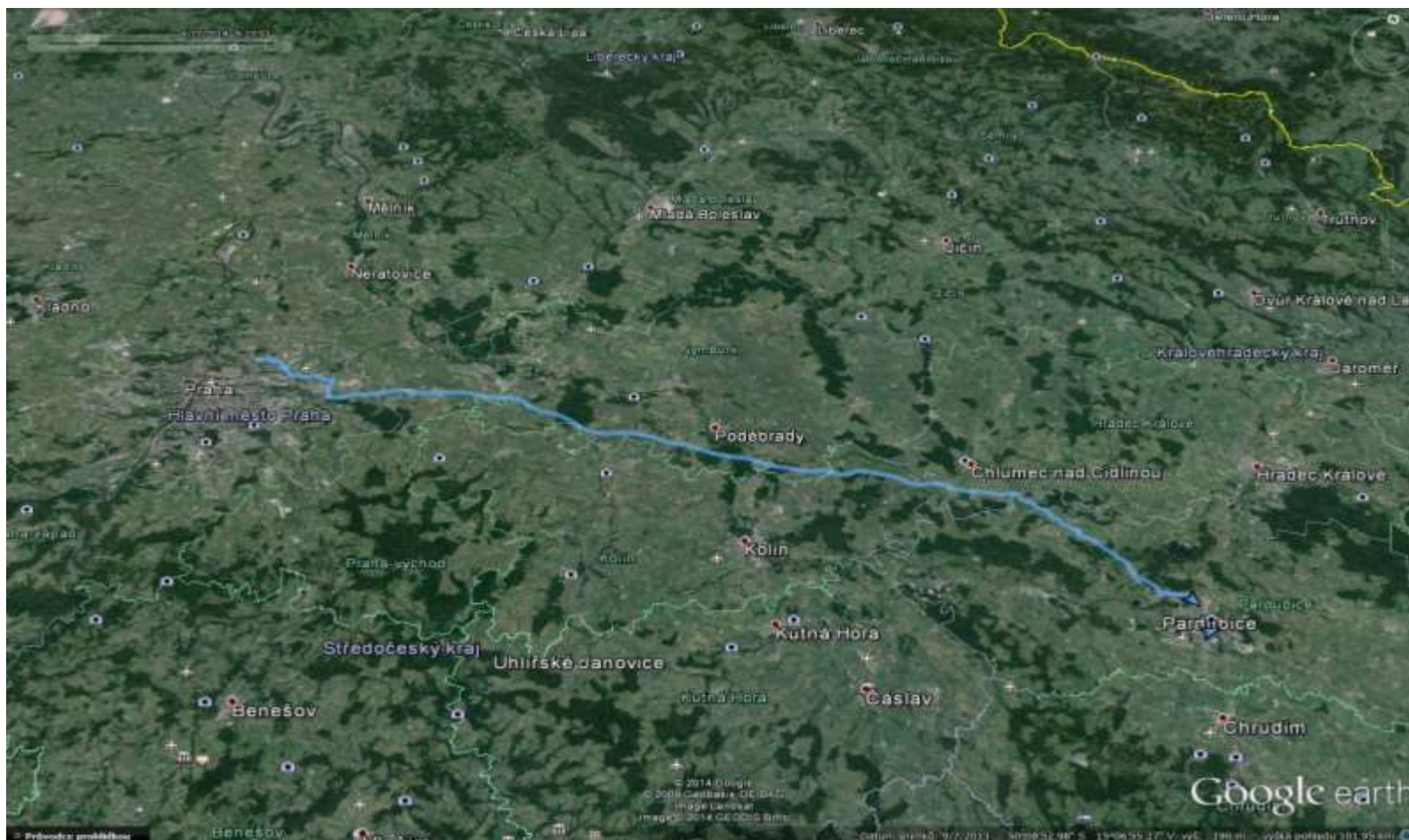
- Instalace do auta



# System určování polohy za obtížných podmínek průjezd letenským tunelem v Praze



# System určování polohy za obtížných podmínek měření po dálnici a místní komunikaci Praha - Pardubice



# System určování polohy za obtížných podmínek průjezd křižovatkou Praha Prosek



# System určování polohy za obtížných podmínek

## Kruhový objezd Lázně Bohdaneč

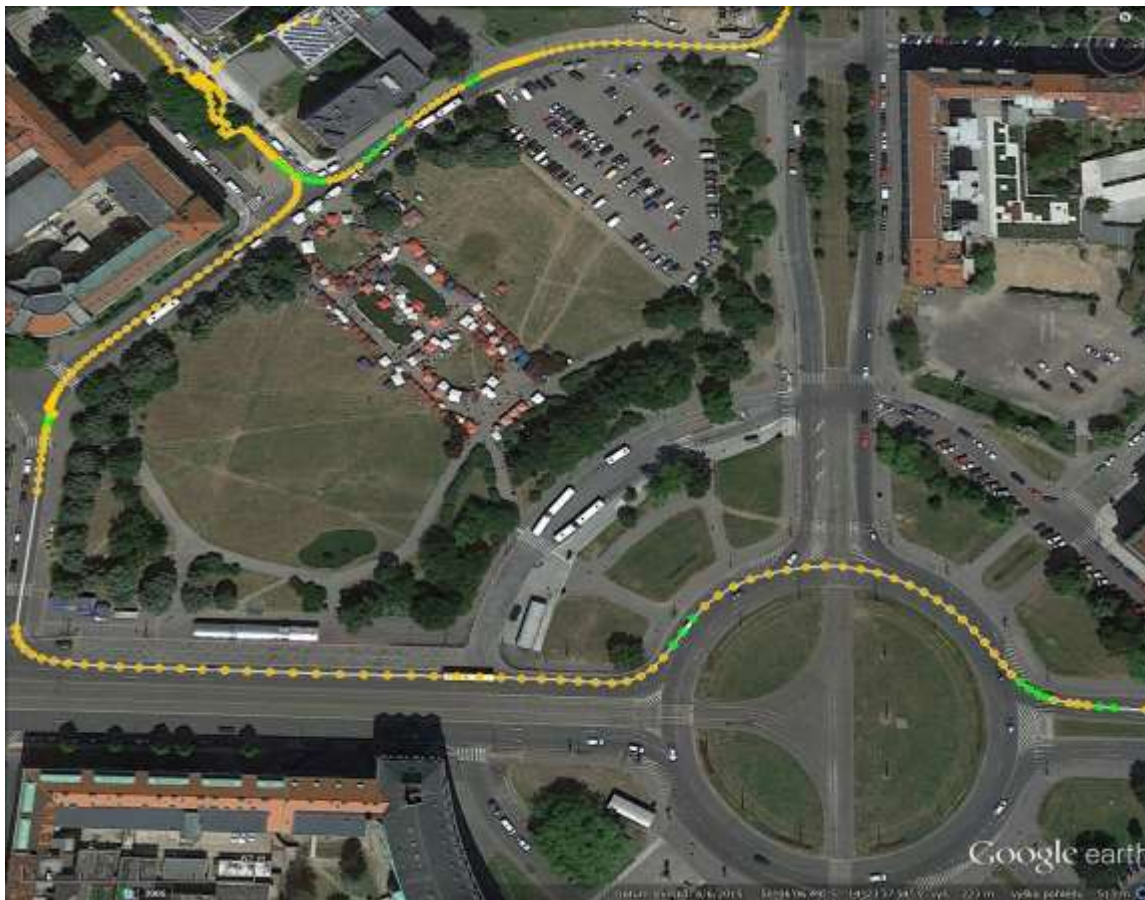


# System určování polohy za obtížných podmínek průjezd pod nadjezdem



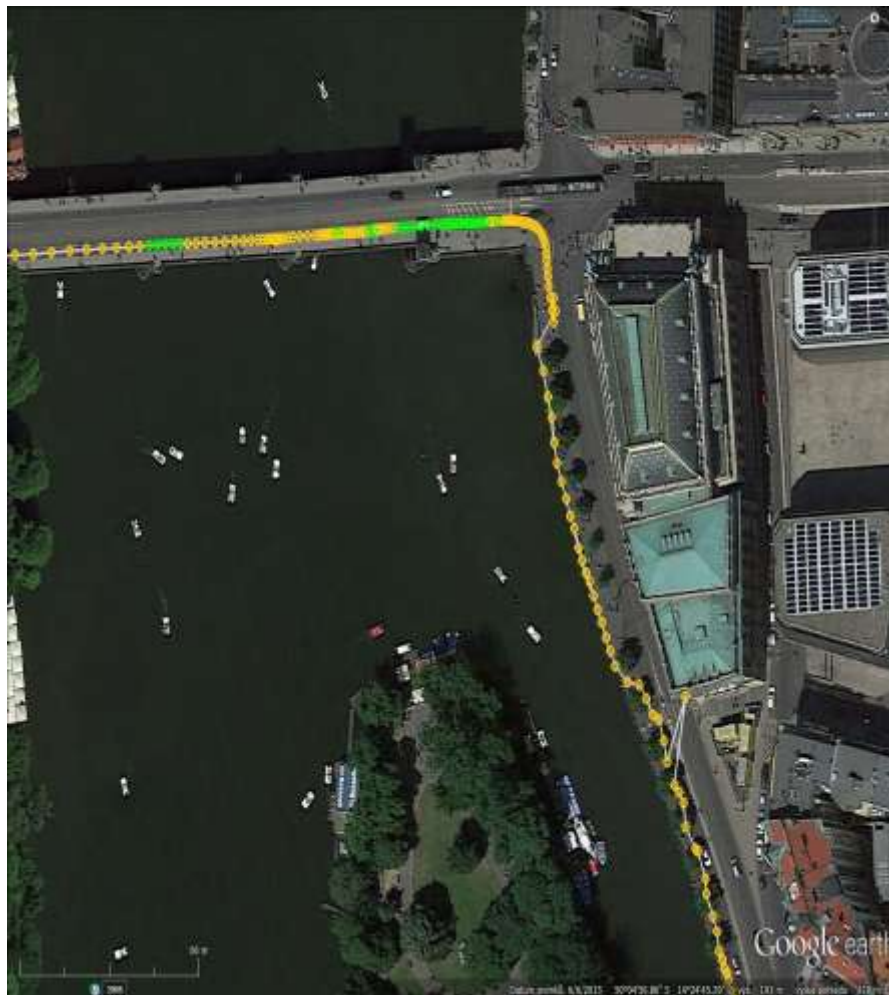
# System určování polohy za obtížných podmínek

## Vítězné náměstí Praha Dejvice



# System určování polohy za obtížných podmínek

## Záznam jízdy „nábřeží“ 23.3.2016





# System určování polohy za obtížných podmínek

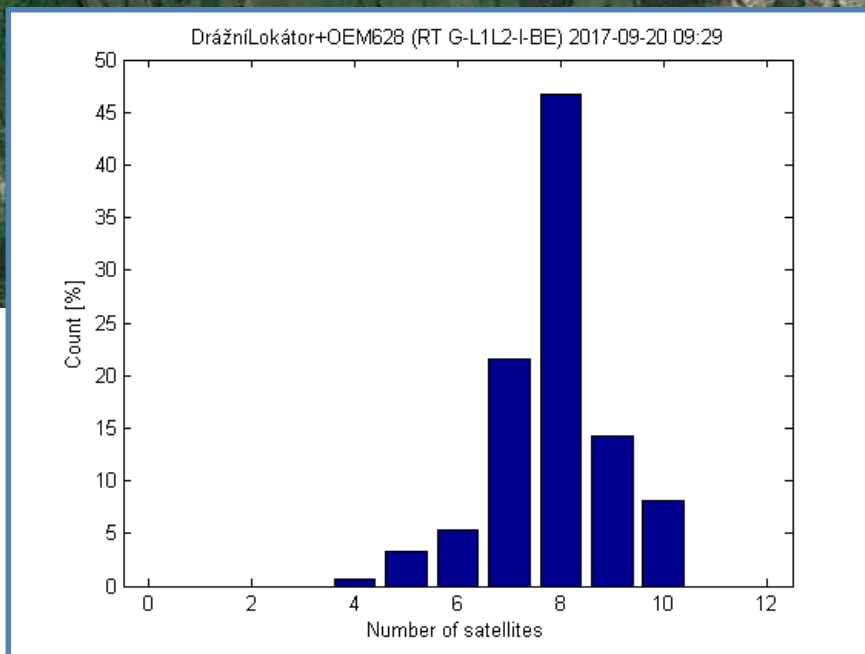
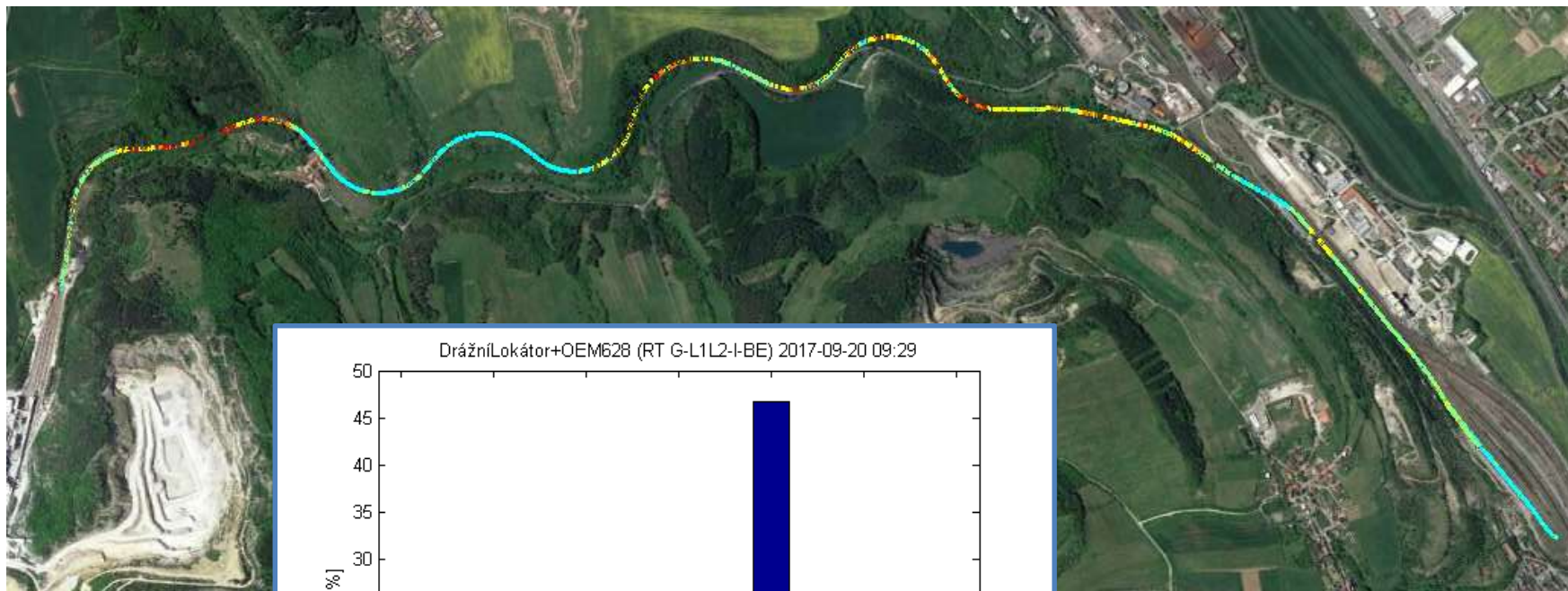
## Záznam jízdy „nábřeží“ 28.8.2016



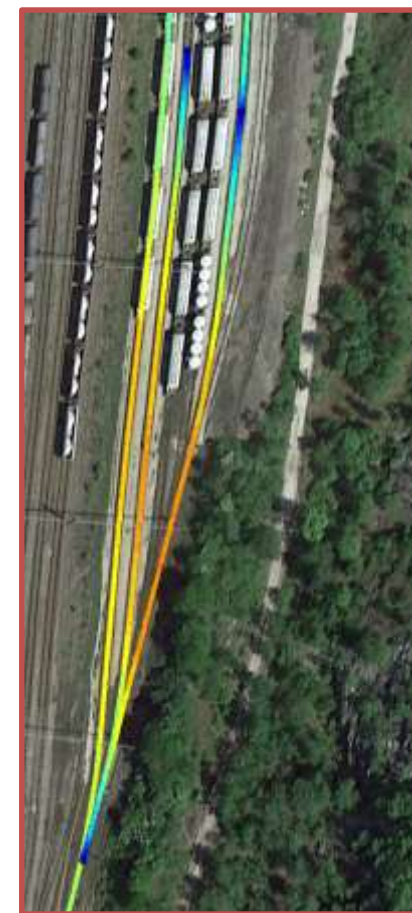
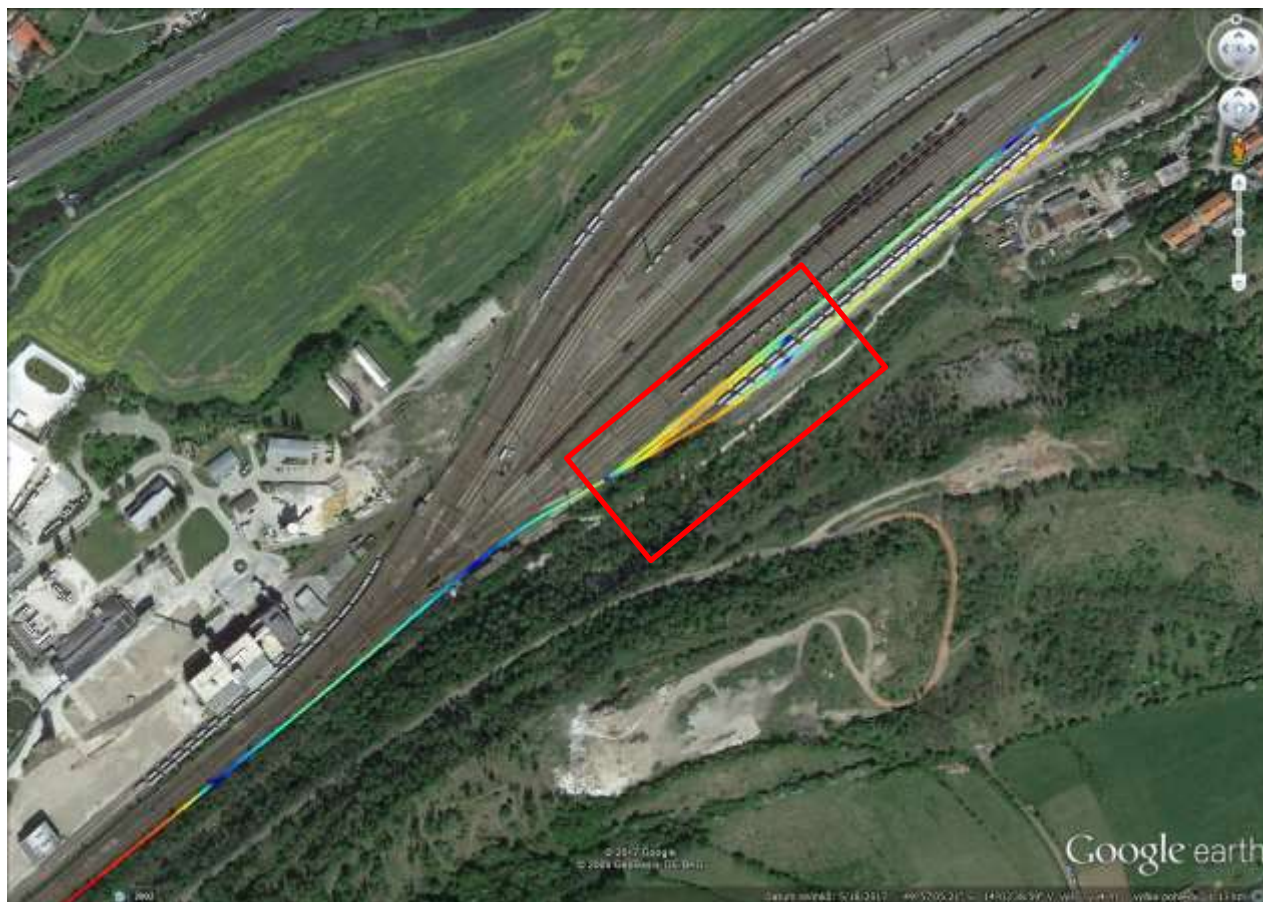
# Experiment na železniční vlečce a pod elektrickou trakcí instalace antén (GNSS a 3 pro přenos korekcí)



# Experiment na železniční vlečce a pod elektrickou trakcí záznam jízdy Tmář - Beroun



# Experiment na železniční vlečce a pod elektrickou trakcí záznam jízdy Tmář – Beroun/vlečka lomu Čertovy schody



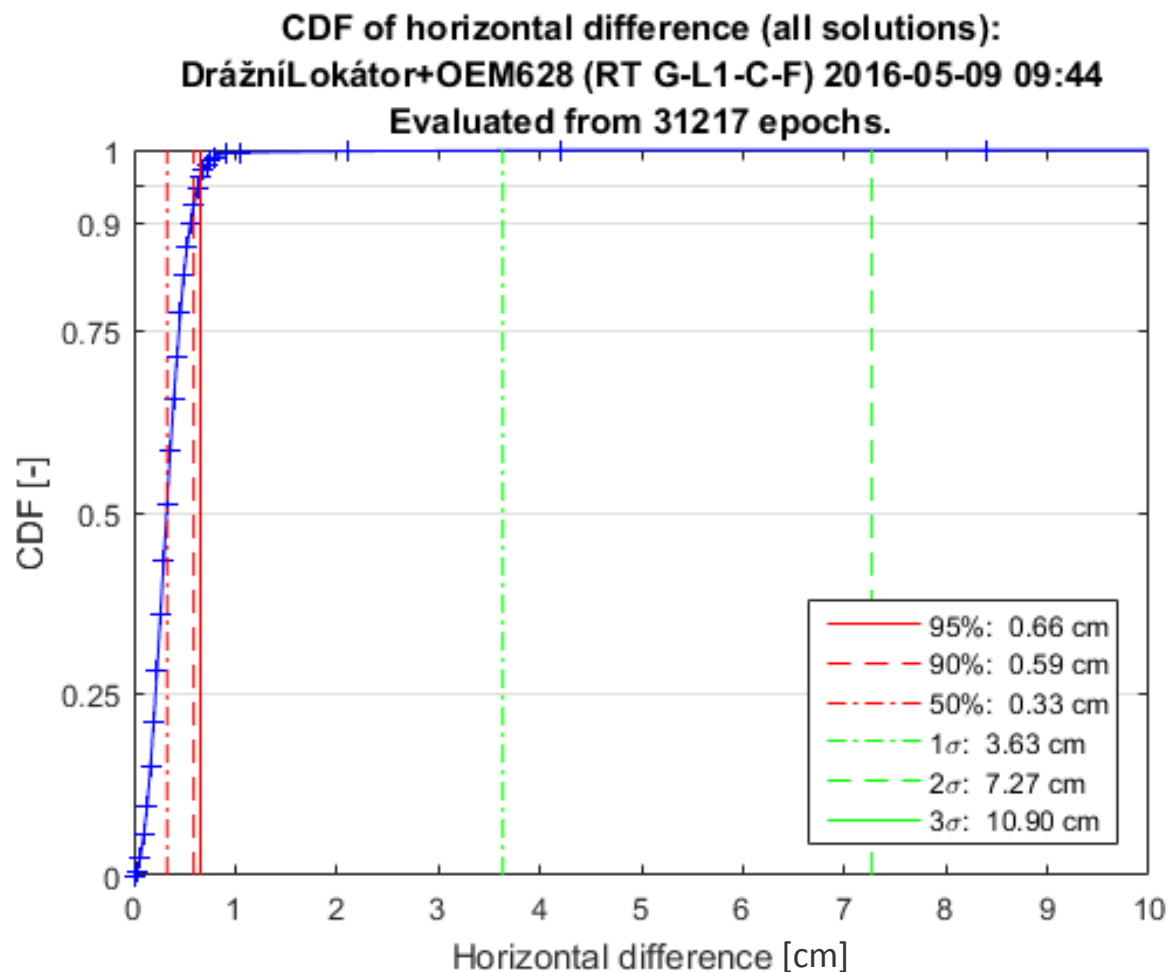
# Experiment na železniční vlečce a pod elektrickou trakcí Tmář - Beroun statistické výsledky – výpadky GPS

<b>Délka výpadků</b>	<b>Počet výpadků</b>
<b>Kratší než 1 sekunda</b>	83
<b>1-10 sekund</b>	44
<b>Nad 10 sekund</b>	2
<b>Celkem</b>	129

Délka záznamu přibližně 2 hod. 30 min.  
Nejdelší výpadky 16 a 18 sekund.  
Výpadky byly překlenuty inerciálním systémem.

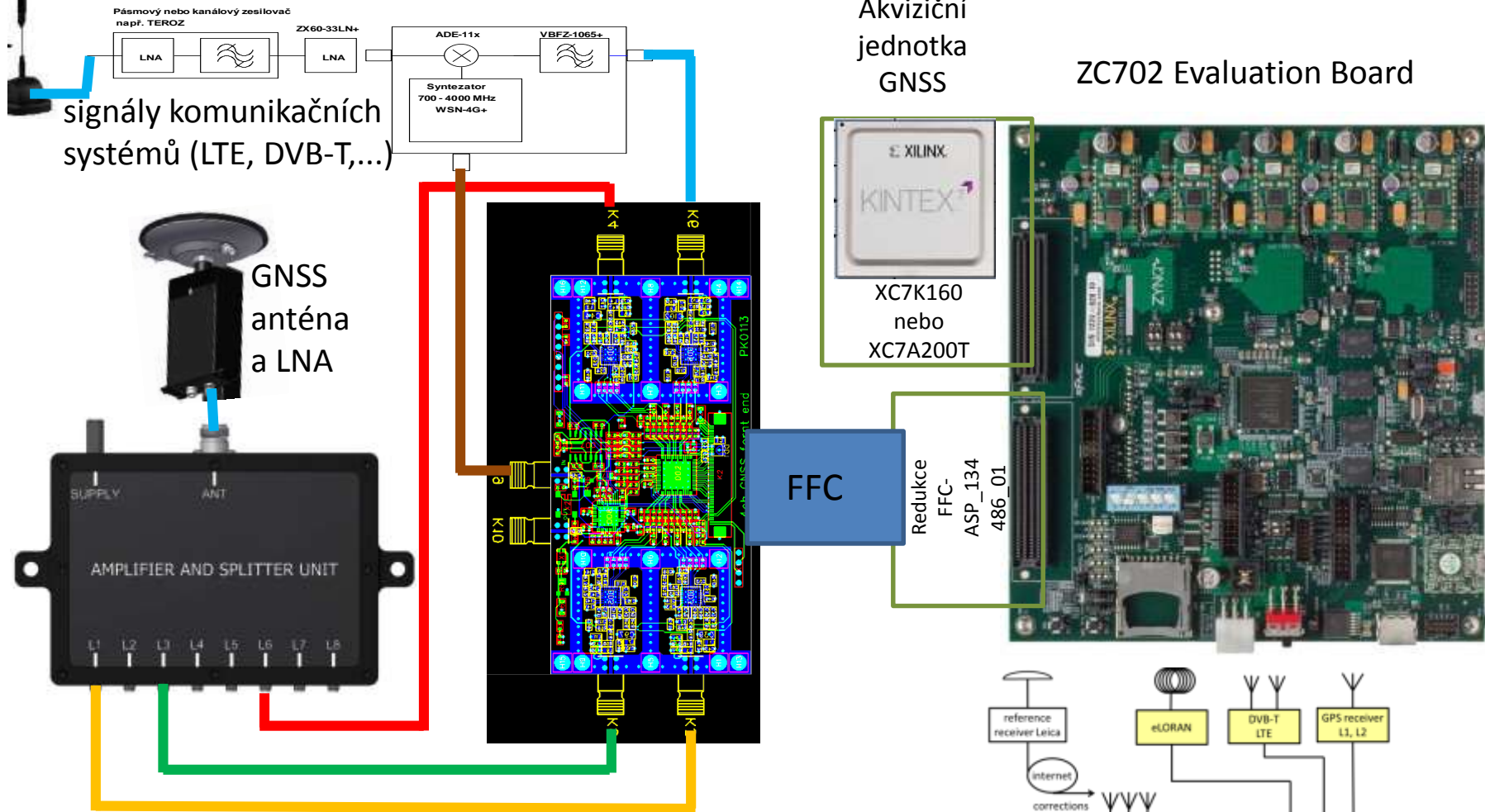


# Statistické vyhodnocení výsledků experimentálního přijímače (Demonstrátor/drážní lokátor za rok 2017)



Další práce

# Experimentální přijímač Zynq





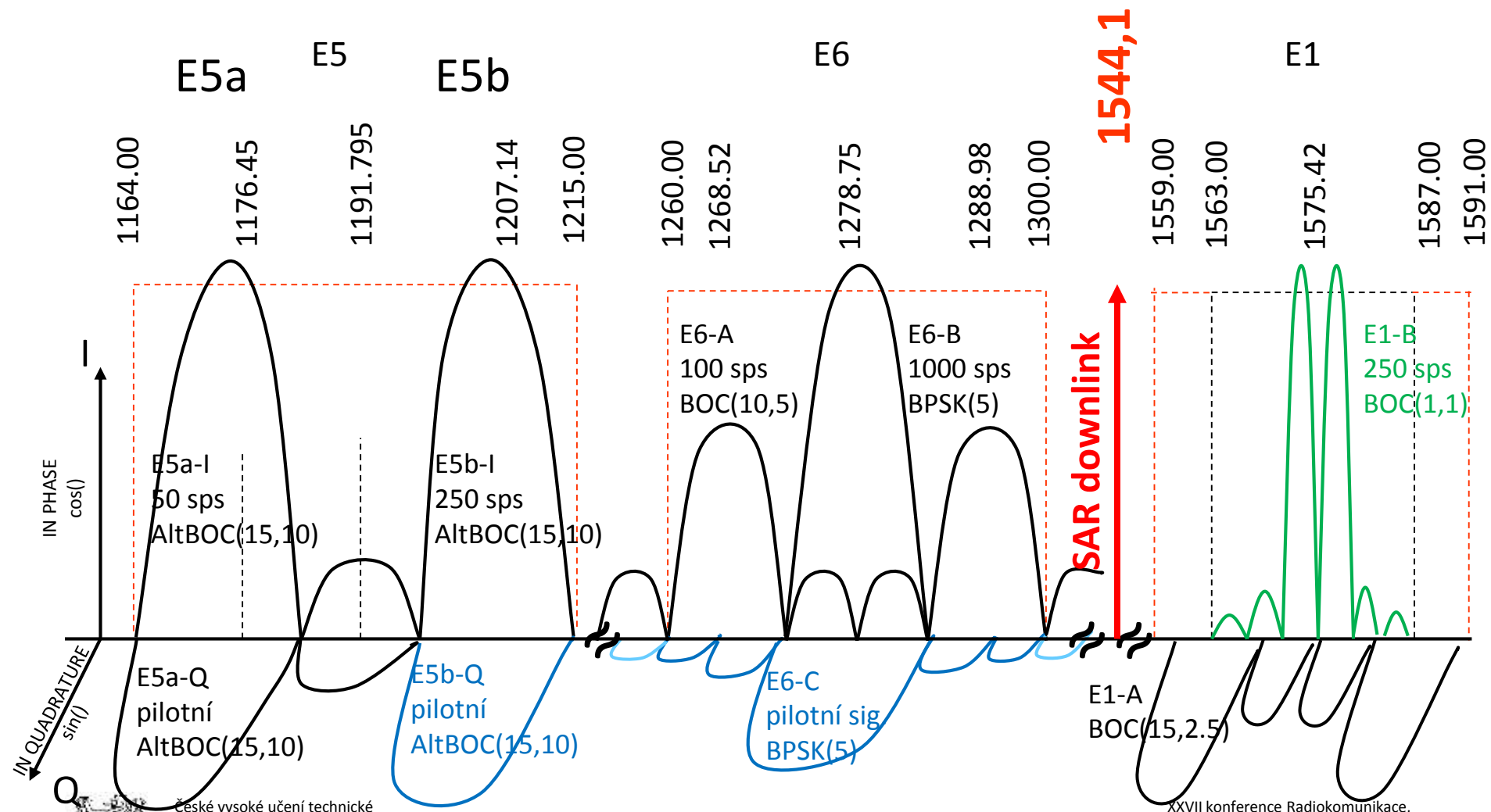
COSPAS/SARSAT

# COSPAS/SARSAT

- Dotaz: Galileo přenáší hovorový/informační signál Země/Země.
- Zřejmě inspirováno spektrem Galilea:



# GALILEO spektrum po r. 2007



# COSPAS/SARSAT

- **COSPAS** – kosmičeskaja sistema poiska avarijnych sudov
- **SARSAT** – Search and Rescue Satellite System
- systém družic (od r. 1979 Kanada, USA, Sov. svaz) přijímajících signály na tísňovém kmitočtu 406 MHz
  - původně přijímal i na tísňových kmitočtech
    - 121,5 kHz
    - 243 MHz

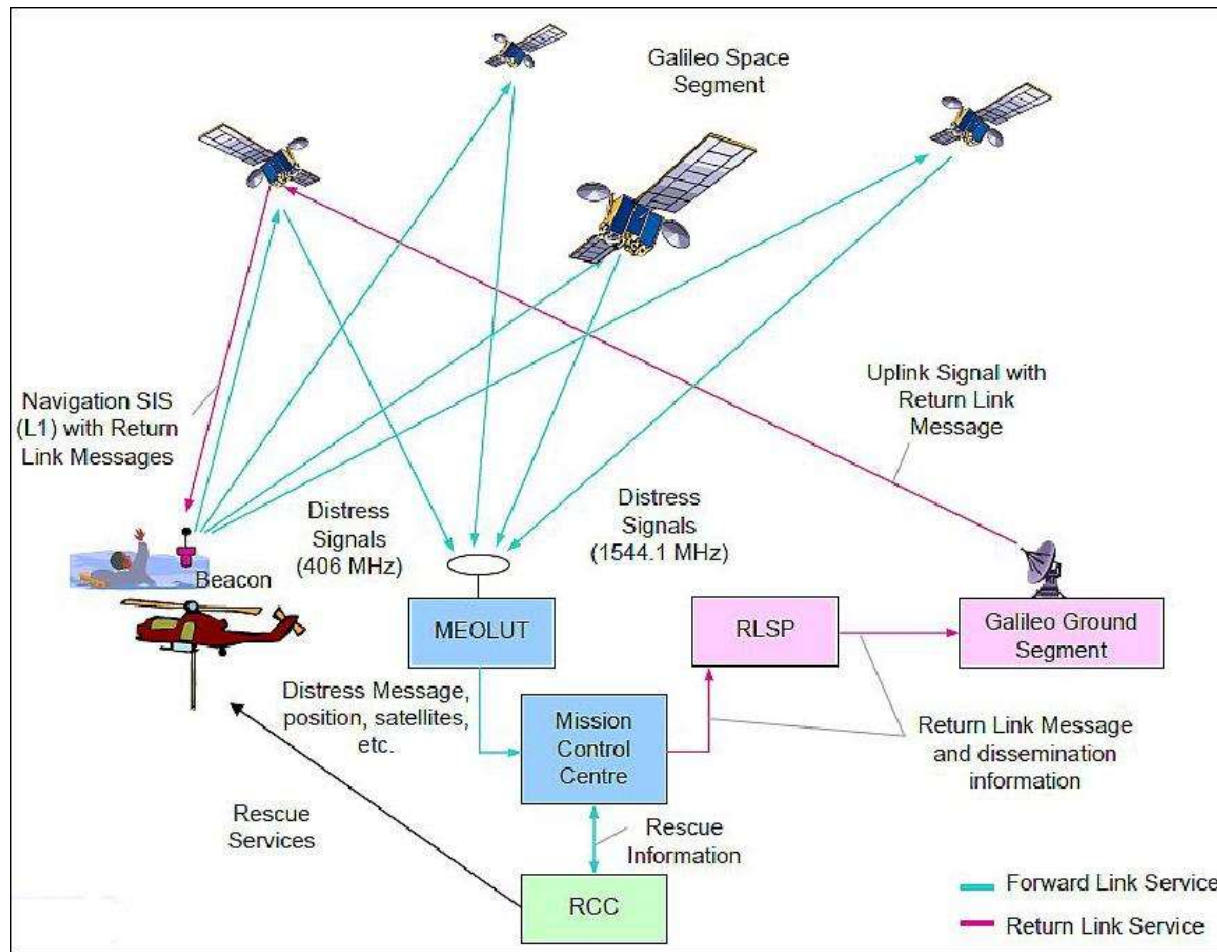


# COSPAS/SARSAT

- tíšňový/nouzový signál generují bóje
  - EPIRB - v námořním a lodním provozu, aktivuje se stykem s vodou  
*Emergency Position-Indicating Radio Beacons*
  - ELT – v leteckém provozu, aktivuje se nárazem  
*Emergency Locator Transmitters*
  - PLB – pro osoby mimo dosah obv. záchranných služeb  
*Personal Locator Beacons*)
- po aktivaci každých 50 s vyšlou signál dlouhý 0,25 s, 122/144 bitů, 49 bitů na identifikaci a souřadnice GPS, výkon 5 W
- některé bóje nesou vysílač 121,5 kHz pro navedení záchrany k bóji
- družice signály přijme, dopplerovskou metodou určí polohu bóje
- tíšňovou zprávu přijímá některý z 38 LUT terminálů, vypočítá polohu
- polohu předá národnímu MCC (Mission Control Centre), příp. Rescue Control Centre (RCC)
- MCC/RCC zajistí záchranné složky



# COSPAS/SARSAT - princip



# COSPA/SARSAT – maják PLB



# COSPAS/SARSAT – maják ELT





# COSPAS/SARSAT – maják EPIRB





ZÁVĚR

# Zlepšování přesnosti družicové navigace

## Závěr

1. Hlavní předností družicové navigace je přesnost, ale dosahuje se jí jen pod otevřenou oblohou.
2. I jen tenká vrstva listí může způsobit degradaci signálu.
3. Hlavní předností při využití signálů pozemských rádiových systémů je vysoká intenzita pole.
4. Signály širokopásmových pozemských systémů jsou vhodné pro určování polohy.



# Zlepšování přesnosti družicové navigace

## Závěr

5. Přesnost pozemských systémů bude horší v zastavěném prostředí. I tak může být systém důležitý pro určení polohy členů záchranných složek.
6. Doporučujeme pokračovat ve výzkumu v této oblasti. Je třeba zlepšit hardware i software vysílačů, vysílat jejich identifikaci/polohu.
7. Podstatnou součástí uživatelského zařízení bude software pro slučování signálů z různých čidel, nejčastěji na principu Kalmanovy filtrace.



# Zlepšování přesnosti družicové navigace

## Závěr

8. Pro IZS apod. použít lokálního systému, rozvinutého při zásahu



Děkuji vám za pozornost