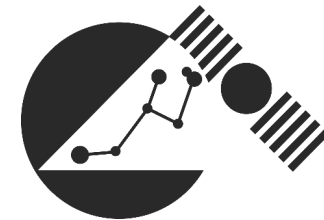




FACULTY  
OF ELECTRICAL  
ENGINEERING  
CTU IN PRAGUE



# Přehled navigačních systémů, limity a principy družicové navigace, nové služby

**Václav Navrátil**

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

*Katedra radioelektroniky*



# Obsah

- Princip družicové navigace
- Chyby a obvyklá přesnost
- Zpřesnění odhadu polohy
  - Dvoufrekvenční GNSS
  - SBAS, DGNSS
  - RTK, PPP
- Nové technologie v GNSS
  - Autentifikace
  - High-Accuracy Service

FACULTY  
OF ELECTRICAL  
ENGINEERING  
CTU IN PRAGUE



# Princip družicové navigace

Metoda ToA – Time of Arrival  
Struktura GNSS systémů  
Současné systémy

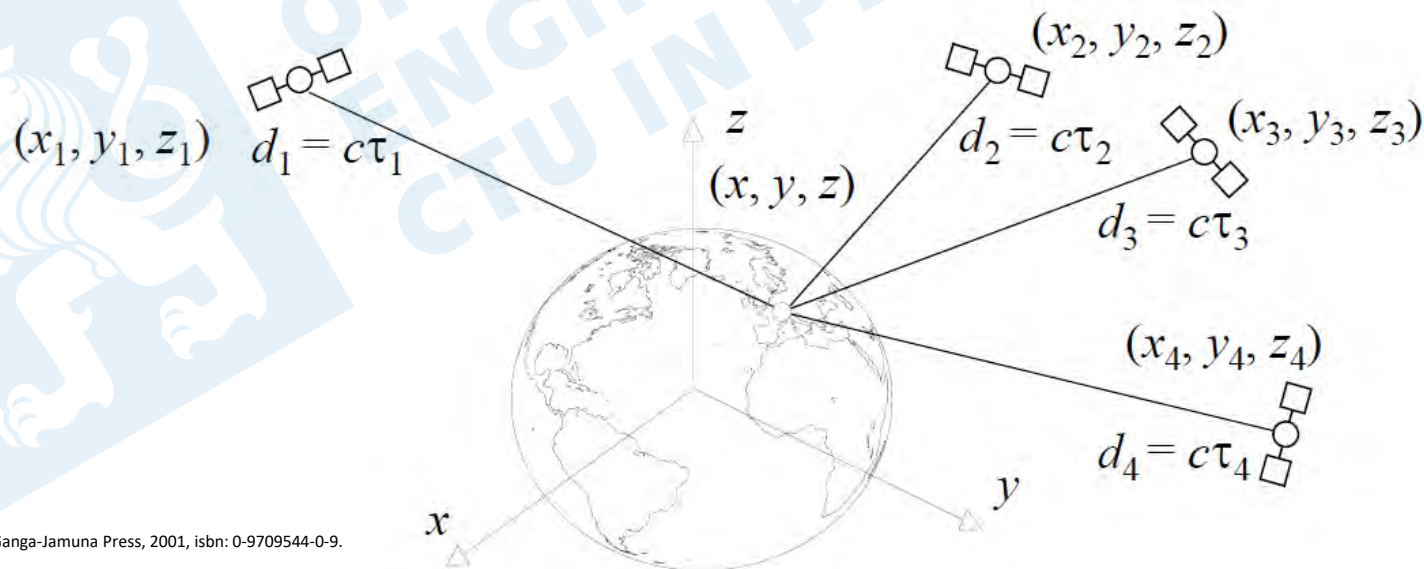
FACULTY  
OF ELECTRICAL  
ENGINEERING  
CTU IN PRAGUE



# Princip GNSS odhadu polohy

## Cíl: odhad PVT (Position, velocity & time)

- Měříme čas příchodu (Time of Arrival – ToA) **dálkoměrného signálu** z družic
- **PVT družice je známé**, PVT uživatele je třeba vypočítat
- Je třeba odhadnout **bias** - zpoždění hodin přijímače (systém vs. uživatel),  
 $b = c_0 \Delta t$



[1] P. Misra and P. Enge, *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, Ganga-Jamuna Press, 2001, isbn: 0-9709544-0-9.

[2] F. Vejražka, *Přednášky k předmětu RSY – Rádiové systémy*, ČVUT FEL, Praha, 2014/2015



# Segmenty GNSS

- Vesmírný segment
  - Družice navigačního systému vybavené atomovými hodinami a generátory navigačního signálu
- Uživatelský segment
  - Uživatelské přijímače vypočítávají polohu na základě měření signálu z družic a navigační zprávy
- Řídící segment
  - Pozemské stanice sledující pohyb a stav družic
  - Vypočítává orbity družic a nahrává do nich obsah navigační zprávy



[1] B. W. Parkinson and J. J. Spilker Jr., *Global Positioning System: Theory and Applications*. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996, vol. 1, isbn: 9781563471063

[2] Lockheed-Martin Corporation, "GPS III," url: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/gps.html>



# Současné GNSS

Většina systémů využívá kódové dělení (CDMA)

Všechny družice vysílají na stejných frekvencích, ale mají unikátní ortogonální dálkoměrné kódy

- GPS (USA): Global Positioning System
  - První ze současných GNSS (probíhá modernizace na GPS III)
- GLONASS (Rusko): Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistěma
  - Jediný systém používající FDMA (plánováno přepnutí na CDMA)
- Galileo (EU)
  - EOC fáze, první systém používající BOC signály
- BeiDou (Čína)





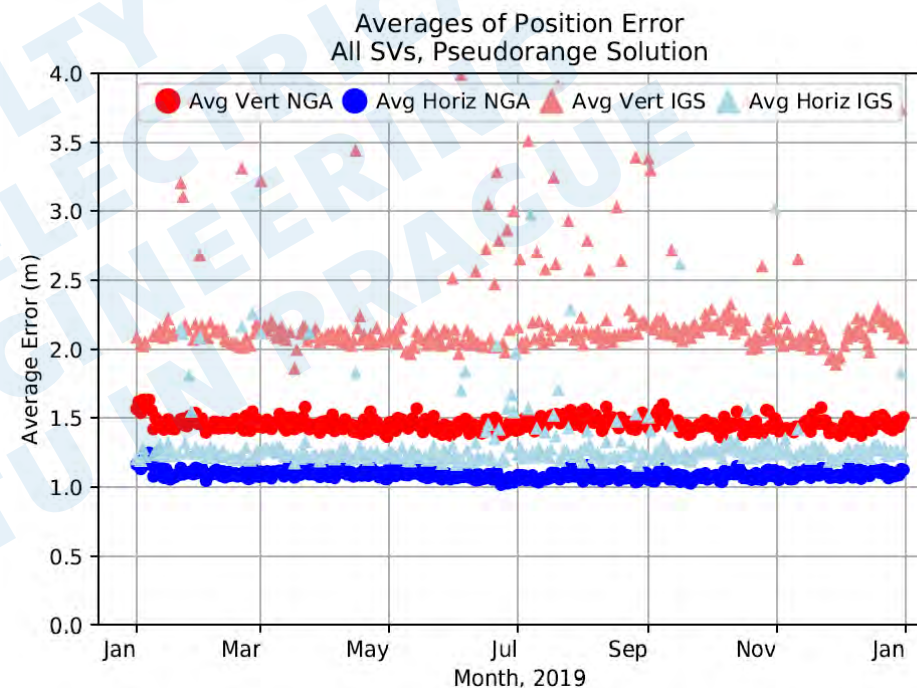
# Chyba určení polohy s GNSS

Zdroj: Parkinson (1996)

Standard error model—no SA

Error source	One-sigma error, m		
	Bias	Random	Total
Ephemeris data	2.1	0.0	2.1
Satellite clock	2.0	0.7	2.1
Ionosphere	4.0	0.5	4.0
Troposphere	0.5	0.5	0.7
Multipath	1.0	1.0	1.4
Receiver measurement	0.5	0.2	0.5
User equivalent range error (UERE), rms <sup>a</sup>	5.1	1.4	5.3
Filtered UERE, rms	5.1	0.4	5.1
<b>Vertical one-sigma errors—VDOP= 2.5</b>			<b>12.8</b>
<b>Horizontal one-sigma errors—HDOP= 2.0</b>			<b>10.2</b>

Zdroj: 2019 GPS performance report



≤ 9 m (95% Horizontal, global average)  
 ≤ 15 m (95% Vertical, global average)

[1] B. W. Parkinson and J. J. Spilker Jr., *Global Positioning System: Theory and Applications*. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996, vol. 1, isbn: 9781563471063

[2] B. A. Renfro, et al., "An Analysis of Global Positioning System (GPS) Standard Positioning Service Performance for 2019," May 2020, url: <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/2019-GPS-SPS-performance-analysis.pdf>



# Přesné GNSS určování polohy

Dvoufrekvenční GNSS, DGNSS, SBAS,  
RTK, N-RTK, PPP, PPP-RTK





# Dvoufrekvenční GNSS

- Slouží zejména k potlačení ionosférické chyby
  - 99,9% ionosférické chyby závisí na  $1/f^2$
- Vhodnou lineární kombinací měření na různých frekvencích jde tuto chybu potlačit:

$$\rho_{\text{iono-free}} = \frac{f_1^2 \rho_{f_1} - f_2^2 \rho_{f_2}}{f_1^2 - f_2^2} \quad \text{Např. } 2,546\rho_{L1} - 1,546\rho_{L2}$$

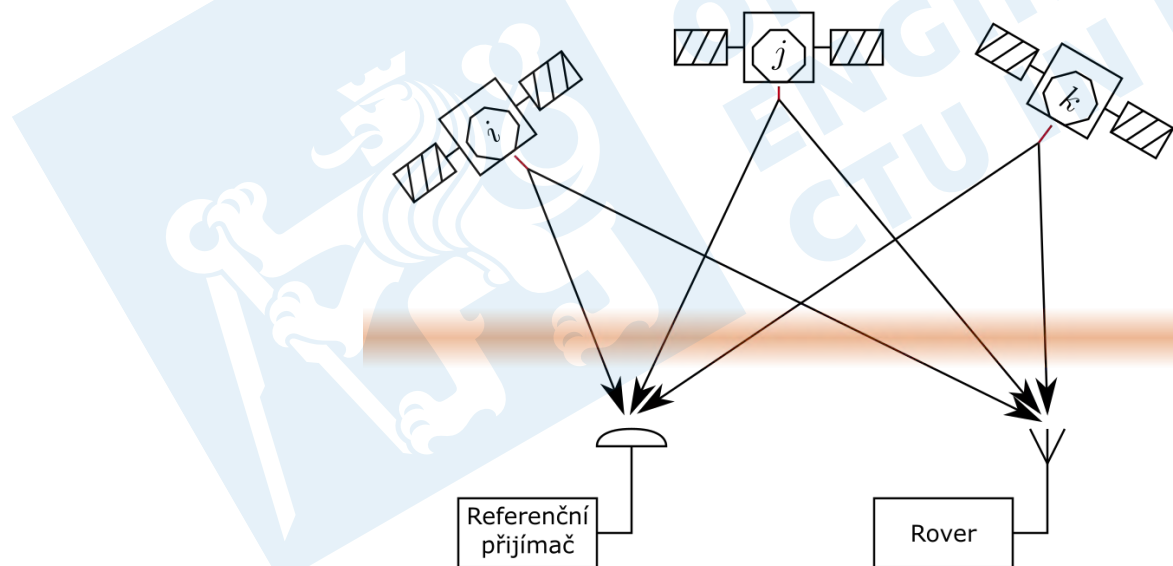
- Násobení koeficienty  $>1$  zvyšuje šum
  - (pro L1 a L2 zhruba trojnásobná směrodatná odchylka)

$$\sigma_{\rho, \text{iono-free}} = \sqrt{\left(\frac{f_1^2 \sigma_{\rho, f_1}}{f_1^2 - f_2^2}\right)^2 + \left(\frac{f_2^2 \sigma_{\rho, f_2}}{f_1^2 - f_2^2}\right)^2}$$



# Diferenciální měření - DGNSS

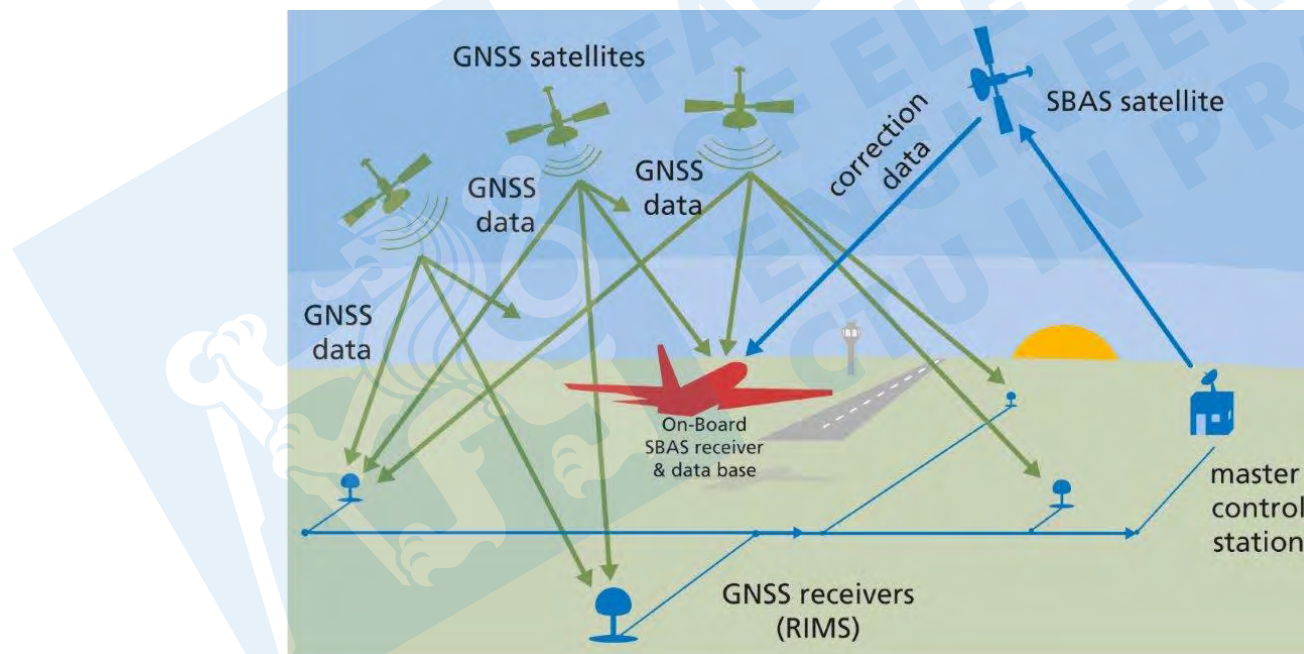
- Chyby způsobené „družicemi“ a šířením jsou v okolí přijímače podobné
- Referenční stanice poskytuje svá měření a svoji známou polohu
- Přesnost závisí na vzdálenosti uživatele a ref. stanice, lze dosáhnout přesnosti lepší než 1 m do vzdálenosti desítek kilometrů





# SBAS – Space-based Augmentation System

- Poskytování korekcí a informací o integritě GNSS prostřednictvím geostacionárních družic
- Zlepšuje přesnost, umožňuje nasazení GNSS pro některé kritické aplikace, zejména pro jednofrekvenční přijímače



[1] J. Biernatzki, „Operational Concept Development and Evaluation of Pilots Acceptance of the GLASS SBAS to GLS Converter“, diplomová práce, TU Braunschweig, 2021



# Metody GNSS měření

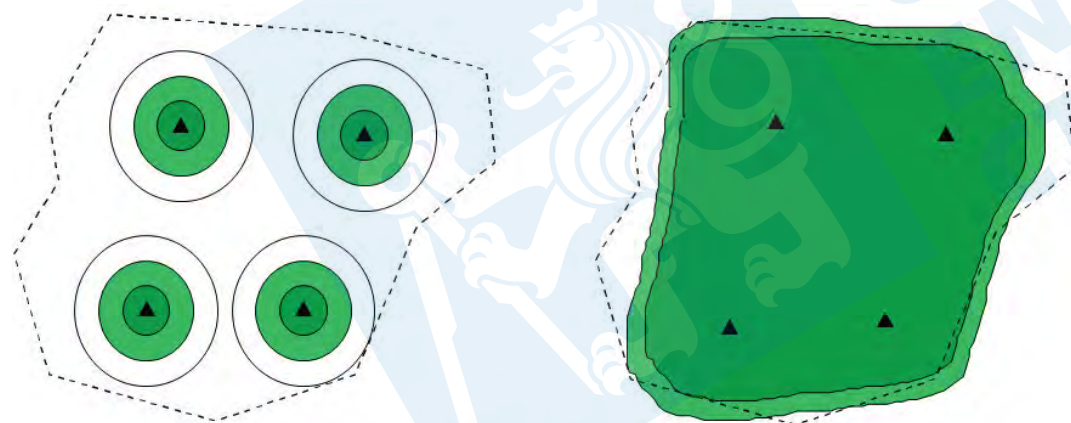


[1] Misra, Pratap, and Per Enge. *Global positioning system : signals, measurements, and performance*. Lincoln, Mass: Ganga-Jamuna Press, 2011.

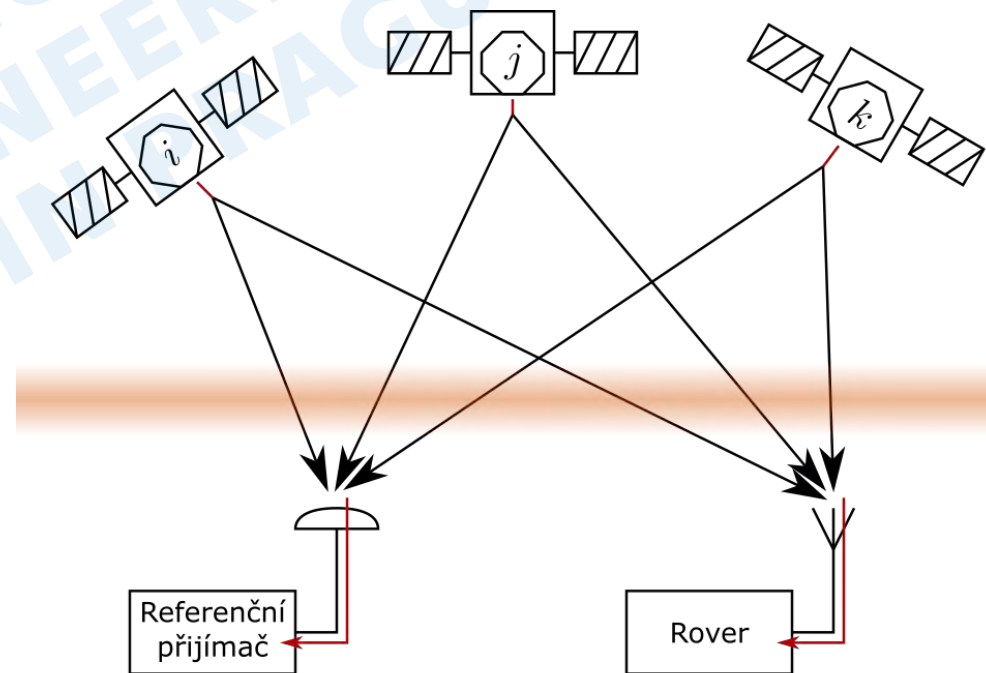


# RTK – Real-Time Kinematics

- Diferenciální metoda, využívá fázové měření
- Odstraňuje chyby přijímače diferenciací měření mezi družicemi
- Dosahuje přesnosti v řádu centimetrů
- Vyžaduje řešení nejednoznačnosti fáze
- NRTK – korekce ze sítě RTK stanic



▲ = GNSS Reference Station  
■ = Coverage Area for Highest Accuracy







# PPP – Precise Point Positioning

- Chyby jsou potlačené přesnými modely
- Vyžaduje dlouhé kontinuální záznamy – konverguje v řádu jednotek až desítek minut

Zdroj chyby	Typická velikost	Metoda potlačení	Reziduální chyba
Ionosferické zpoždění	< 100 m	Lineární kombinace	mm
Troposferické zpoždění	< 10 m	Model/odhad	mm – dm
Relativistické efekty	≈ 10 m	Model	mm
Vliv anténního systému družice	< 1m	Model	dm – mm
Vícecestné šíření, šum pseudovzdálenosti	≈ 1 m	Filtrace	mm
Slapové jevy (pevnina)	≈ 20 cm	Model	mm
Navinutí fáze	≈ 10 cm	Model	mm
Zatížení oceány (sekundární slapový jev)	≈ 5 cm	Model	mm
Orbity a hodiny družic	< 1 m	Model/filtrace	cm – mm
Vícecestné šíření (fáze)	≈ 1 cm	Filtrace	cm – mm
Vliv antény přijímače	< 5 cm	Model	mm





# Galileo High Accuracy Service (HAS)

- PPP korekce z monitorovací sítě
  - Distribuce z družic (pásmo E6)
  - Distribuce přes internet (NTRIP)

- Deklarovaná přesnost:

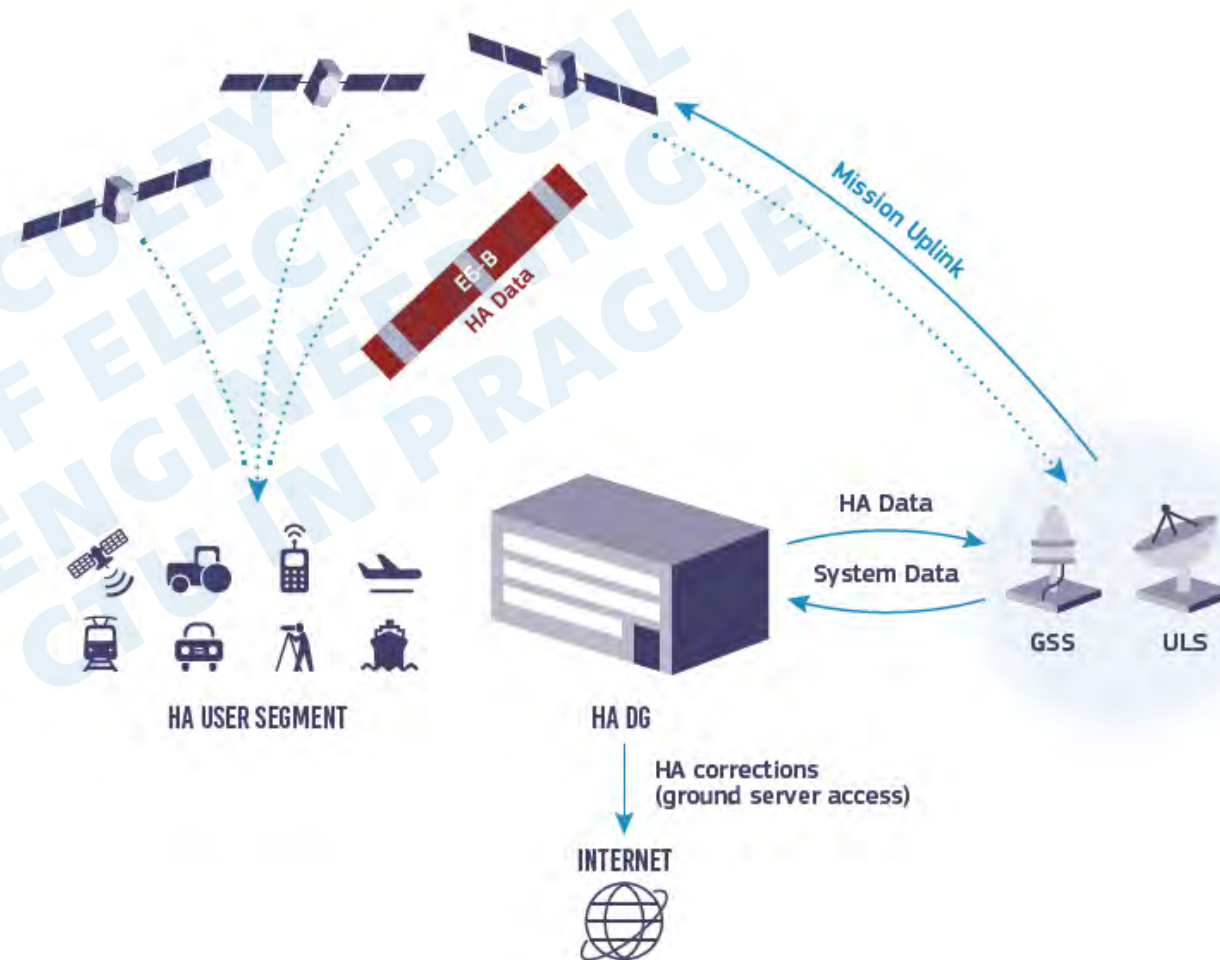
(68. percentil)	Horizontální	3D
Pouze Galileo	≤ 25 cm	≤ 30 cm
Galileo + GPS	≤ 15 cm	≤ 20 cm

- Rychlost konvergence:

- 100s v Evropě
- 300s pro zbytek světa

- Podobná technologie: QZSS LEX

- Pouze lokální pokrytí Japonska



[1] <https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has>



# Rušení GNSS

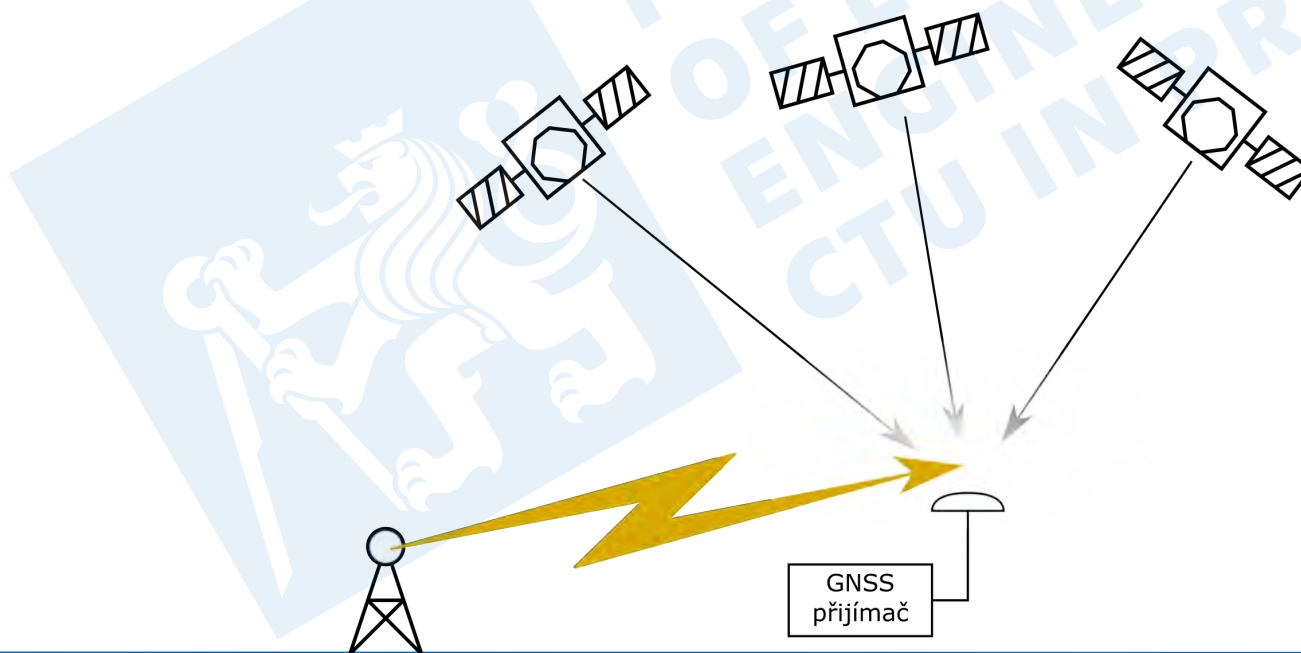
Rušení (Jamming)  
Podvržení (Spoofing)

FACULTY  
OF ELECTRICAL  
ENGINEERING  
CTU IN PRAGUE



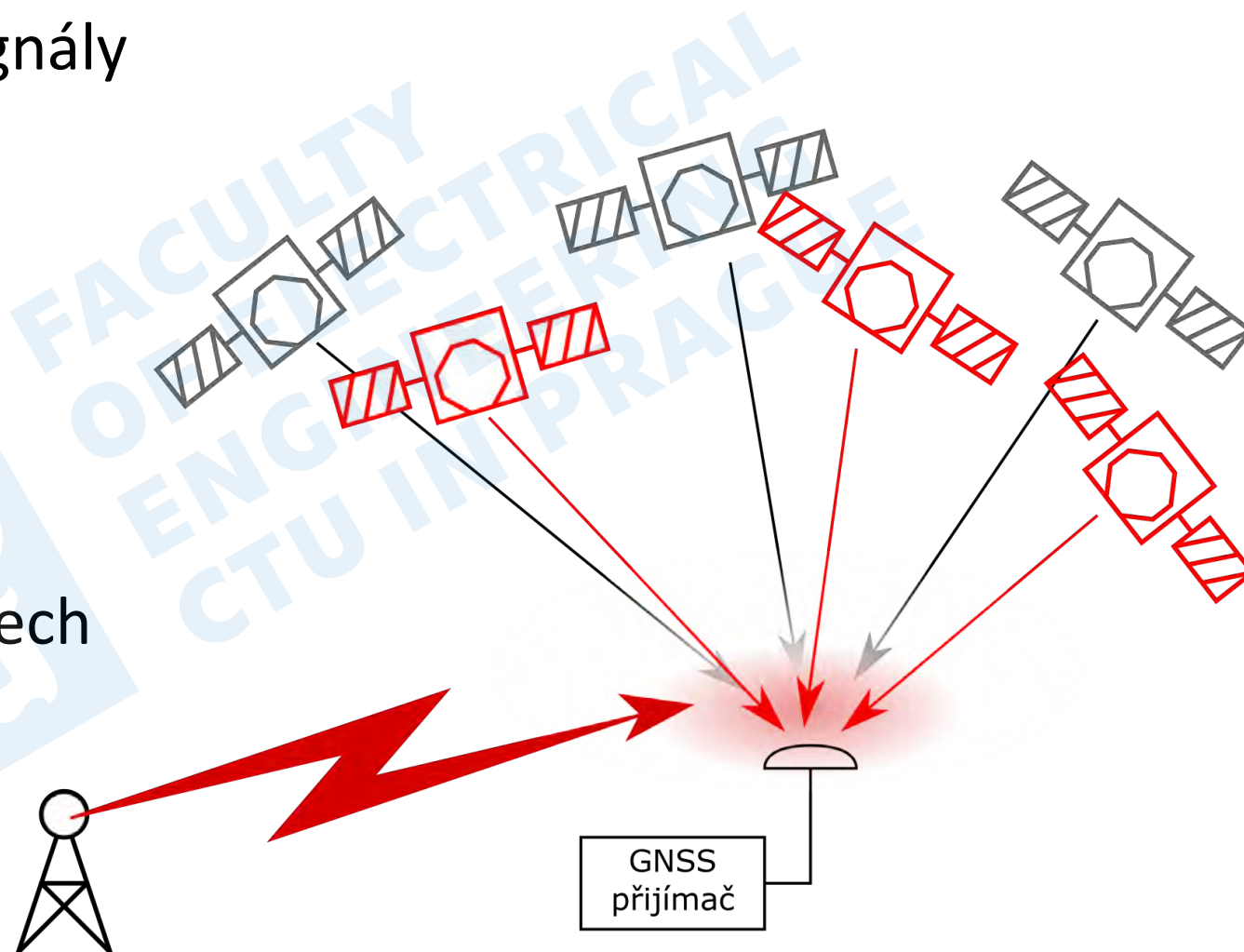
# Jamming - rušení

- GNSS je zranitelné z hlediska rušení, jelikož:
  - Výkon přijatého signálu z družice je  $>160\text{dBW}$  (GPS C/A)  
K rušení postačují nízké vyzářené výkony ( $<1\text{W}$  EIRP)
  - Vlnové délky se pohybují v rozsahu 19-26cm  
Efektivní antény jsou přenosné a skladné



# Spoofing – Podvržení signálu

- Rušička vysílá podvržené signály
- Lze zpravidla odhalit
- Vzniká poptávka po autentifikovaných signálech





# Autentifikace signálů

Galileo OSNMA  
GPS CHIMERA

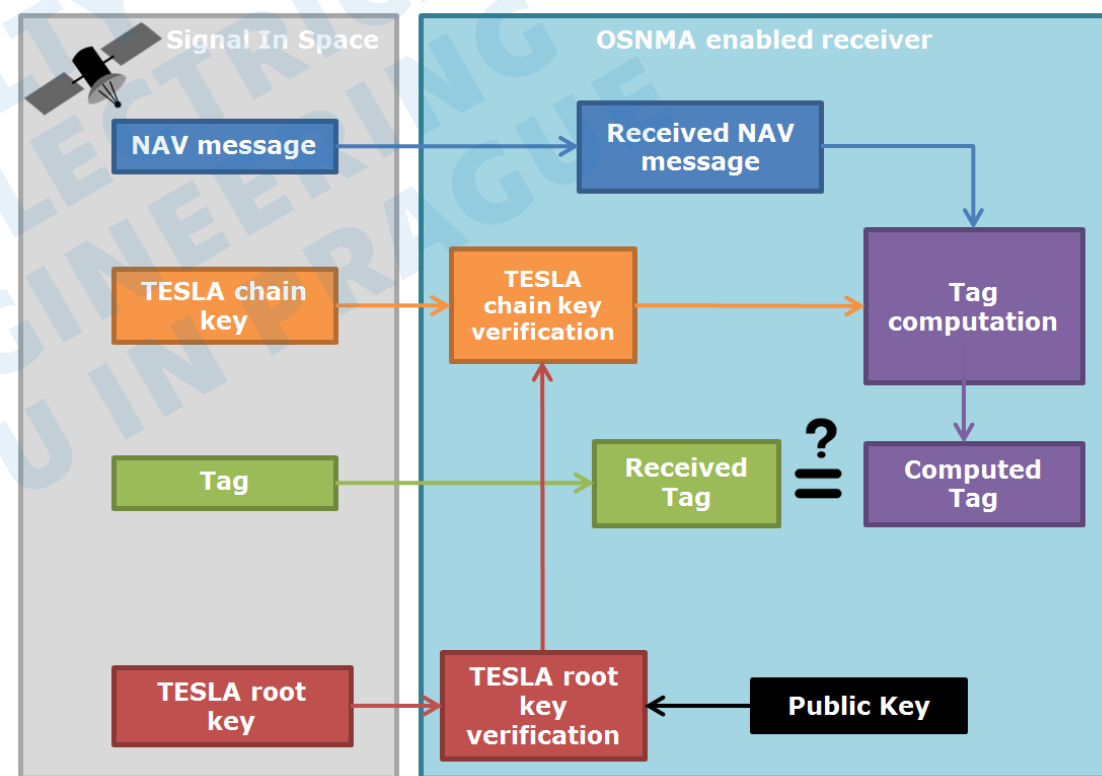
FACULTY  
OF ELECTRICAL  
ENGINEERING  
CTU IN PRAGUE



# Galileo OSNMA

## Open-Service Navigation Message Authentication

- Potvrzuje pravost navigační zprávy signálů na E1 a E5
- Nepotvrzuje správnost pseudovzdáleností
- Využívá dříve rezervované části navigační zprávy signálu E1-B
- Nepotřebuje připojení k internetu
- Vyžaduje přibližnou synchronizaci (do 300s)
- Cross-authentication
  - z jednoho signálu autentifikuje více družic
- První autentifikovaný odhad polohy:
  - Obvykle za 2-4 minuty



[1] <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/galileo-open-service-navigation-message-authentication-osnma>

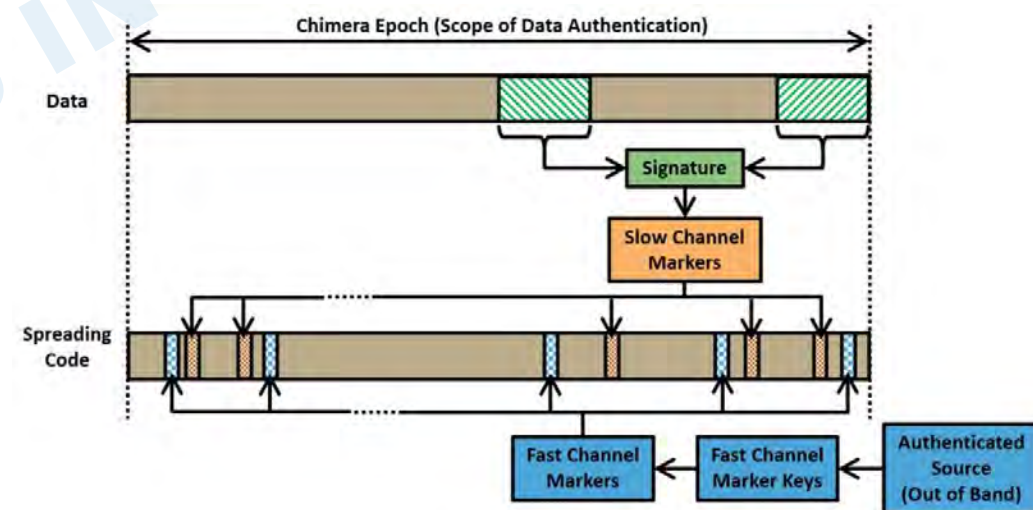
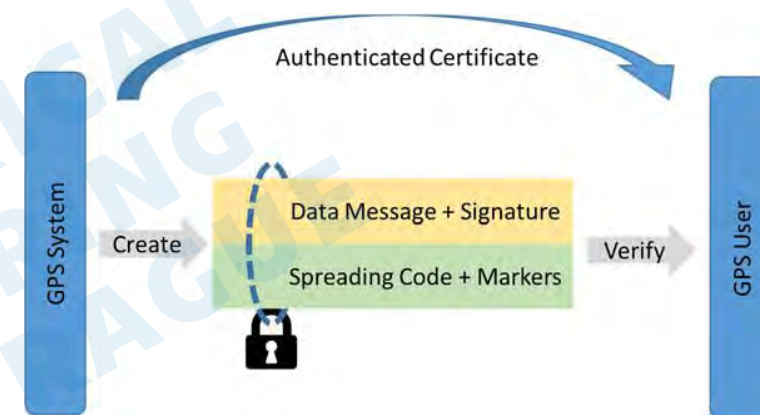




# GPS CHIMERA

## Chips Message Robust Authentication

- Potvrzuje navigační zprávu i pseudovzdálenost ze signálu L1C
- Využívá markery přímo v dálkoměrném kódu
- Zpožděné poskytování klíče
- Změna klíče po 6 sekundách nebo 3 minutách
- Zpětně kompatibilní
- Vyžaduje záznam vzorků signálu



[1] Logan Scott, „CHIMERA specification“, <https://www.gpsxpert.net/chimera-specification>



# 23.10. – Mezinárodní den GPS/GNSS

## 10.23 – Je významné číslo pro GPS i ostatní GNSS

- Referenční frekvence GPS družic je **10.23 MHz**
- Dálkoměrný kód GPS C/A má **1023** chipů, L5 a L1C **10230** chipů
- Rychlost **1.023** Mchip/s využívají: GPS L1 C/A, L1C, L2C; Galileo E1
- Rychlost **10.23** Mchip/s využívají: GPS L1 P, L2 P, L5; Galileo E5
- Nosné frekvence jsou odvozené od **10.23 MHz**

Pásmo	Frekvence	Násobek 10.23 MHz
L1/E1	1575,42 MHz	154 × 10.23 MHz
E6	1278,75 MHz	125 × 10.23 MHz
L2	1227,60 MHz	120 × 10.23 MHz
L5/E5	1176,45 MHz	115 × 10.23 MHz



# Shrnutí

- Existuje několik systémů družicové navigace, základní principy jsou totožné
- Družice vysílají několik signálů v různých pásmech
- Jsou potřeba alespoň 4 družice pro určení polohy a času
- Zpřesnění odhadu polohy
  - Vícefrekvenční GNSS
  - SBAS, DGNSS
  - RTK, NRTK, PPP
- Nové technologie v GNSS
  - Autentifikace
  - Galileo High-Accuracy Service



Děkuji za pozornost

Kontakt:  
[vaclav.navratil@fel.cvut.cz](mailto:vaclav.navratil@fel.cvut.cz)