

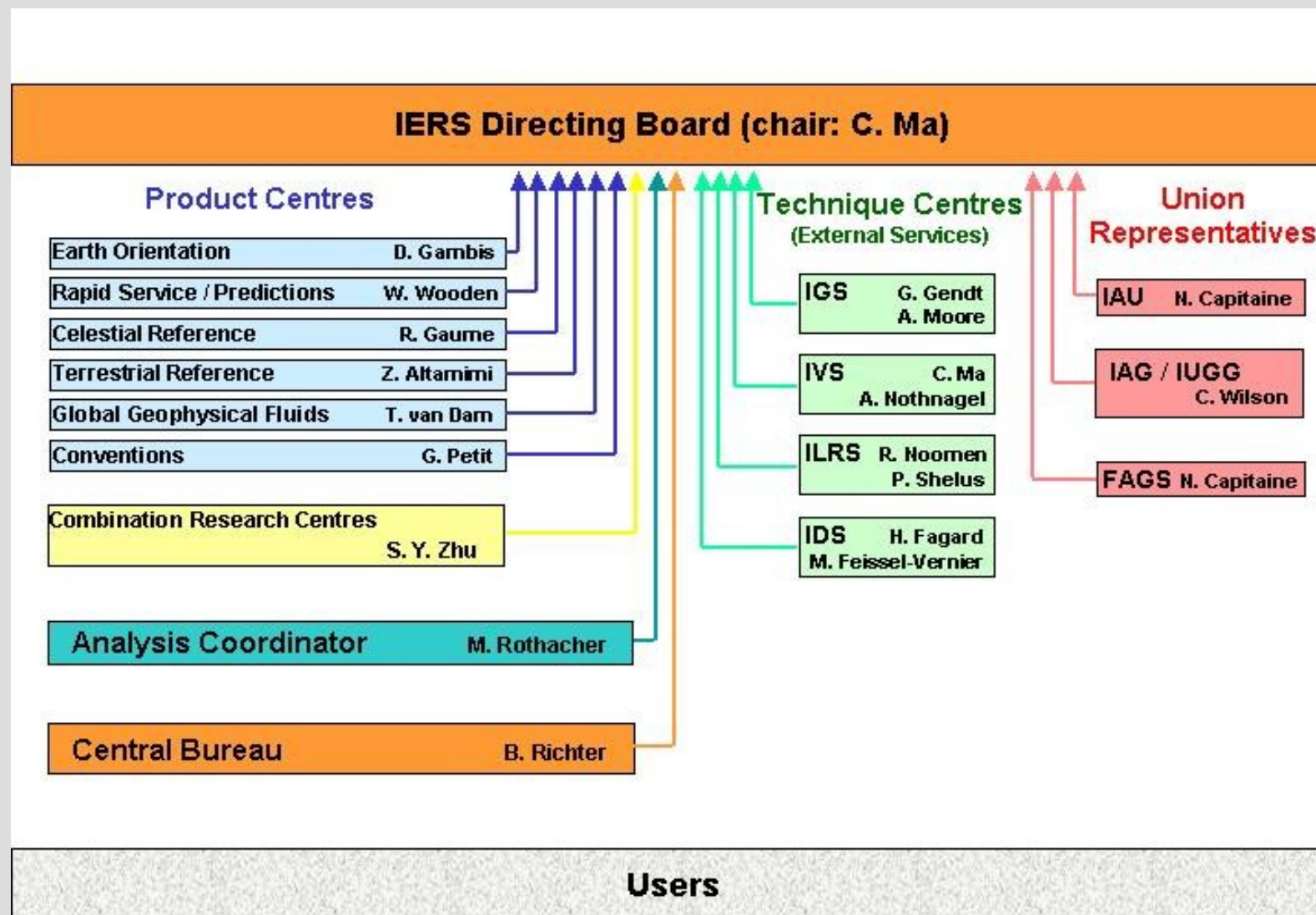
Historie sledování EOP (rotace)

- 1895 IAG -> ILS, 7 ZT na 39° s.š., stejné hvězdy, stejné přístroje.
- 1962 IPMS (Mizusawa, JPN), až 80 přístrojů. FK4, různé metody, různé přístroje, i jižní polokoule.
- 1921 BIH (Sèvres, F). Z astrometrických pozorování určován přesný čas a publikovány odchylky časových signálů od tohoto standardu.
- Od 1956 atomové hodiny -> UT1, UTC (rotační a koordinovaný čas, zaveden 1967)
- do 1972 pouze hvězdy naší Galaxie, nutace a preces bezchybná, realizace inerciální soustavy pomocí katalogů = nižší přesnost
- od 1972 nové metody pozorování: dopplerovská pozorování
- 1980 SLR, LLR = laserové dálkoměry k družicím a Měsíci, přesnost od 2m do nynějších 1cm. Z družic pouze pohyb pólu a rychlé změny v rotaci kvůli stáčení dráhy v dlouhoperiodické oblasti.

historie EOP

- od 1981 rutinní používání VLBI, tj. pozorování radiových vln z extragalaktických zdrojů (kvasarů), přesnost 0.0001",
- 1988 IERS Mezinárodní služba rotace Země (a referenčních soustav od 2003) – pouze moderní kosmické techniky
- 1992 GPS, určují se souřadnice pólu a variace v UT1 = derivace UT1 je variace v délce dne, přesnost srovnatelná s VLBI,
- 1995 DORIS vysílač na stanici, přijmač na družici => rovnoměrné rozložení po Zemi, dosud nižší přesnost, zpřesňuje se.

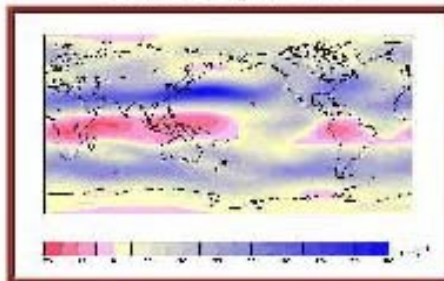
IERS -Mezinárodní služba pro rotaci Země a referenční soustavy



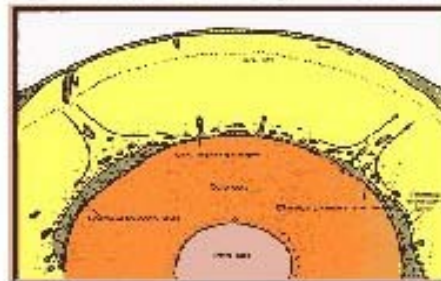
Global Geophysical Fluids Center IERS

SPECIAL BUREAUS

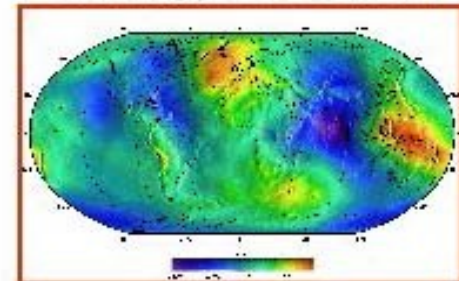
Atmosphere



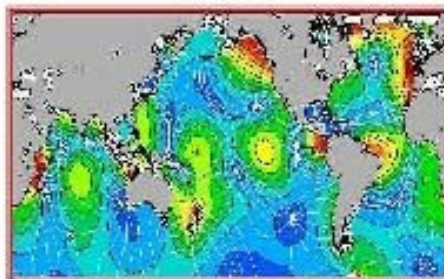
(USA Mirror) Core



Gravity/Geocenter



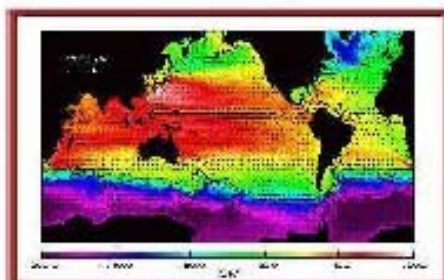
Tides



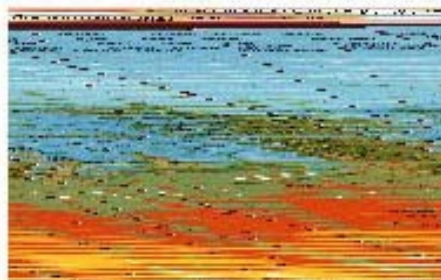
Hydrology



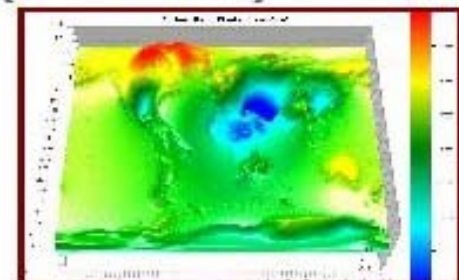
Oceans



Mantle



(USA Mirror) Loading

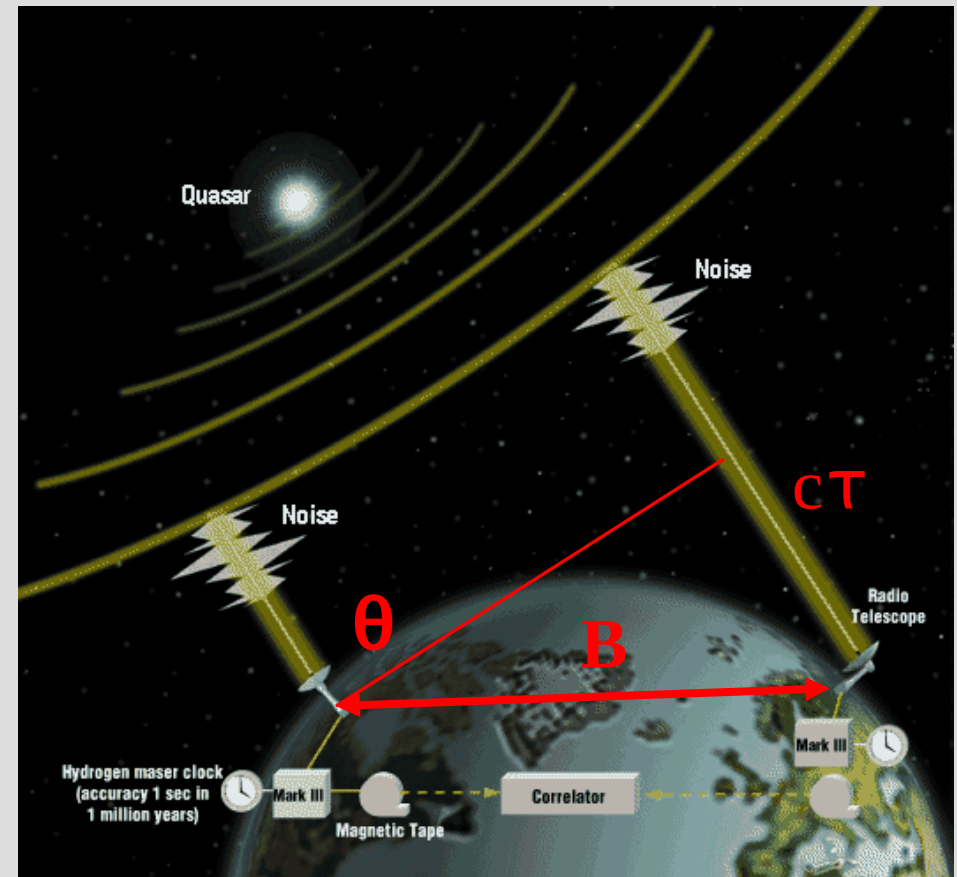


Moderní kosmické techniky pro sledování orientace Země

- Radiová interferometrie z velmi dlouhých základen (VLBI)
- Globální polohový systém (GPS)
- Laserová lokace družic (SLR) a Měsíce (LLR)
- DORIS

Very Long Baseline Interferometry - VLBI

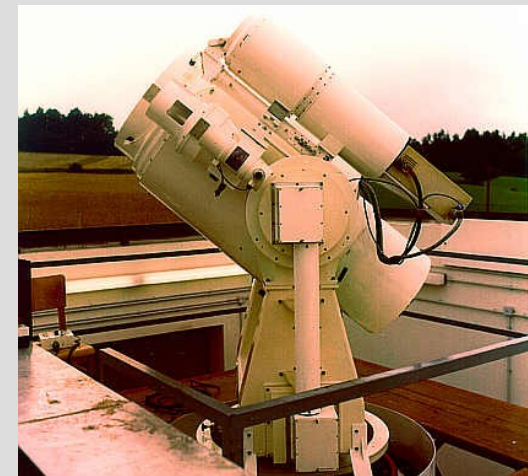
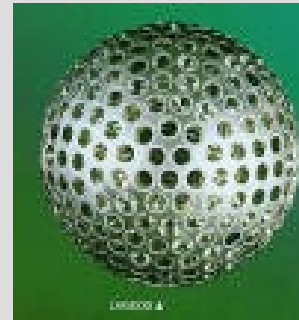
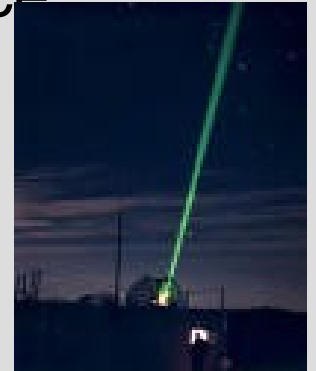
- Určování směrů mezi zdrojem kosmického radiového záření (kvazary) a vektorem spojujícím dva interferometry a určování velikosti tohoto vektoru
- Princip měření
 - Záznam záření a času na magnetickou pásku
 - Určení τ pomocí korelátoru
 - Vzhledem k rotaci Země lze určit i $d\tau/dt$ a změnu frekvence interferenčních proužků
 - Z těchto veličin lze určit θ a B



Laserová lokace družic

- Měření vzdálenosti stanice družice na základě měření transitního času, který potřebuje světelný paprsek pulsního laseru k překonání vzdálenosti stanice-družice-stanice
- Přesnost 1 až 3 cm

$$D = \frac{1}{2} c \Delta t + \Sigma \sigma$$



Laserová lokace Měsíce

LLR

L
U
N
A
R
L
A
S
E
R
R
A
N
G
I
N
G

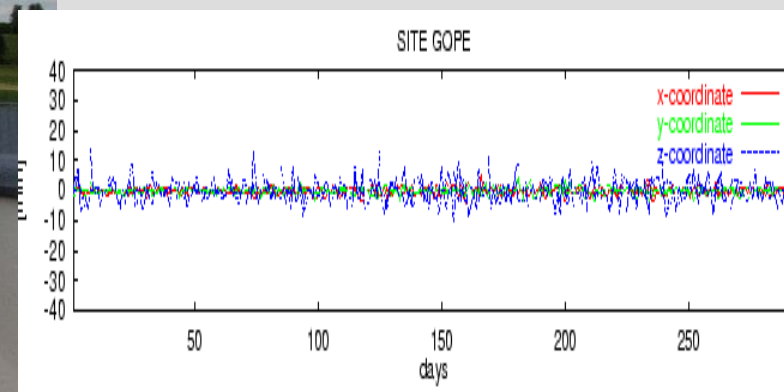
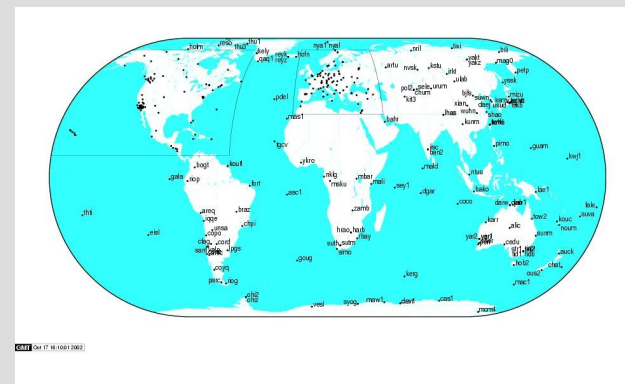
In addition to its value for lunar sciences and the theory of gravitation, LLR is a key IERS technique to determine the orientation of the dynamical frame of the Solar System in the ICRS.



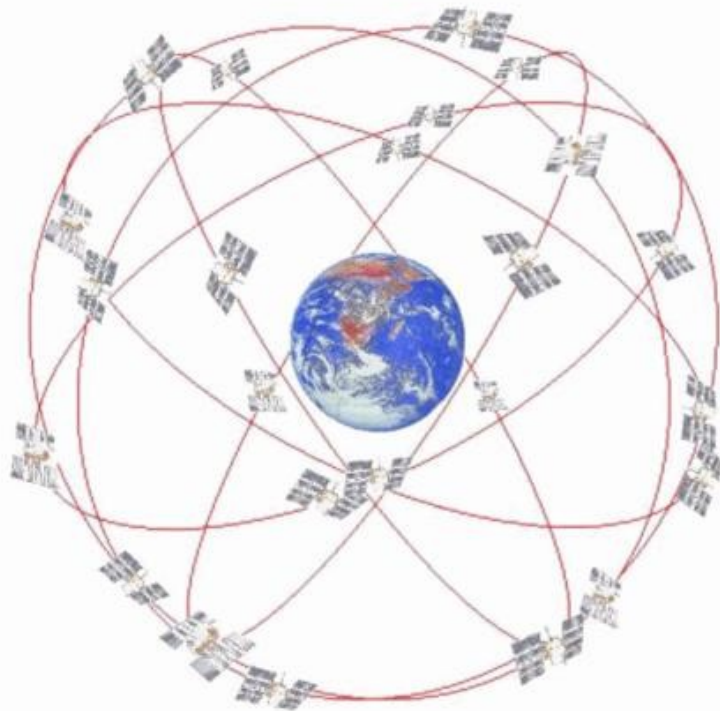
Laser reflector arrays were deposited on the Moon by the Apollo and Lunakhod missions. Their areas are about 1 m². Four of them are ranged regularly.

Technologie GPS NAVSTAR

- Radiová metoda, z kódových a fázových měření určíme relativní vektory mezi stanicemi
- Pro definici globálního souřadnicového systému se používá permanentních pozorování na stálých stanicích



GPS – globální poziční systém



- Družice o známé poloze vysílá v přesně definovaný čas pípnutí
- Toto pípnutí je přijato pozemní aparaturou s jistým zpožděním
- Zpoždění => vzdálenost
- Protínáním z délek poloha
- 24 družic v 6 drahách
- Sklon k rovníku 55°
- $h=20200\text{km}$
- Oběžná doba 12 hvězdných h.
- 2 frekvence $1575\text{MHz} = 19\text{cm}$
- $1228\text{MHz} = 24\text{cm}$
- IGS – přesné dráhy družic
25cm okamžitě, 5cm do 17h
<5cm do 13 dnů

Dopplerovská pozorování

- Určování změn vzdáleností stanice-družice (diferenciální Doppler),
- nebo rozdílu vzdáleností stanice-družice mezi dvěma časovými okamžiky (integrální Doppler)

na základě změny vysílané radiové frekvence v důsledku vzájemného pohybu stanice a družice (Dopplerův jev)

Určení časové změny radiální vzdálenosti stanice-družice

$$\dot{D} = \frac{c}{f_T} f_D + \frac{c}{f_T} (f_T - f_G)$$

f_T je frekvence generátoru na družici

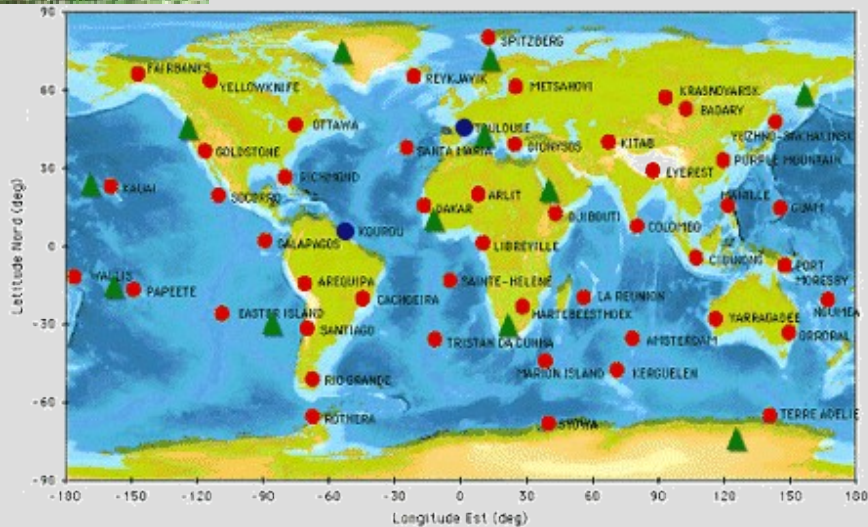
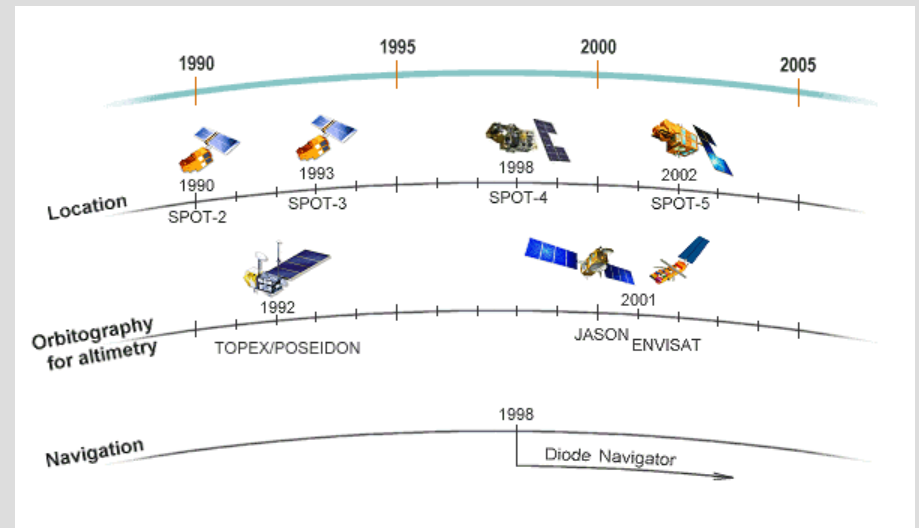
f_G je frekvence generátoru v přijímaci

f_D je měřená rozdílová frekvence

$$D_2 - D_1 = \frac{c}{f_T} N + \frac{c}{f_T} (f_T - f_G) (t_2 - t_1)$$

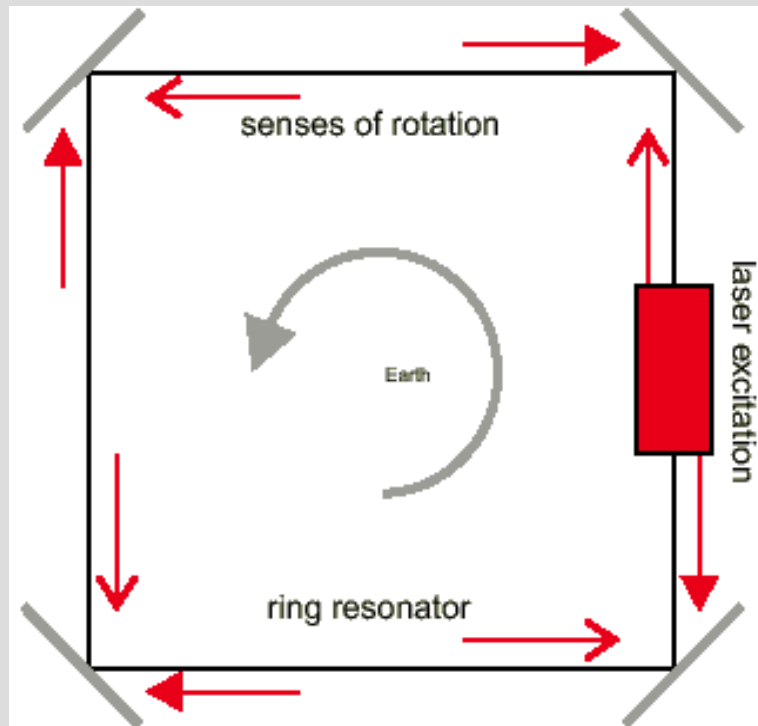
N je doppler count

Dopplerovská pozorování - systém DORIS



Ring laser

- Wettzell, Canterbury, poloostrov Banks (NZ)
- „přímé určení“ okamžité rychlosti rotace
- využití Sagnacova efektu



$$V_{Sagnac} = \frac{4 A \Omega}{\lambda P}$$

A plocha, P poloměr
 ΔV Sagnacova frekvence
 λ vlnová délka
 Ω rotace

Výsledky IERS shrnutí

- VLBI produkuje EOP 3-7 dní, vztah k inerciální soustavě, cca 0.2 mas, TRF 6mm
- Družicové metody každý den, v kampaních i častěji, v budoucnu 12-6h, terestrická soustava, kalibrace na VLBI, přesnost TRF
 - GPS 4mm
 - SLR 24mm
 - DORIS 33mm

Výsledky z pozorování optické astrometrie v letech 1899.7 - 1992.0

V AsÚ AV ČR nashromážděn pozorovací materiál:

- 33 observatoří, 47 přístrojů různých typů, cca 4,5 miliónu jednotlivých pozorování, ICRS - HIPPARCOS,
- Přístroje lze rozdělit do 3 skupin:
 - Měření změn zeměpisné šířky;
 - Měření světového času UT0-TAI;
 - Měření metodou stejných výšek,
- Určovali se parametry orientace Země v 5ti denních intervalech:
 - Pohyb pólu (x , y);
 - Světový čas (UT1-TAI); (od 1956)
 - Odchylny nebeského pólu ($\delta\psi$, $\delta\epsilon$ nebo δX , δY).
- Možnost zpřesnění vlastních pohybů pozorovaných hvězd v HIC (katalog EOC-2)

Rovnice oprav

$$v_{\phi} = \Delta \phi - (x \cos \lambda - y \sin \lambda) + \Delta \epsilon \sin \alpha + \Delta \psi \cos \alpha$$

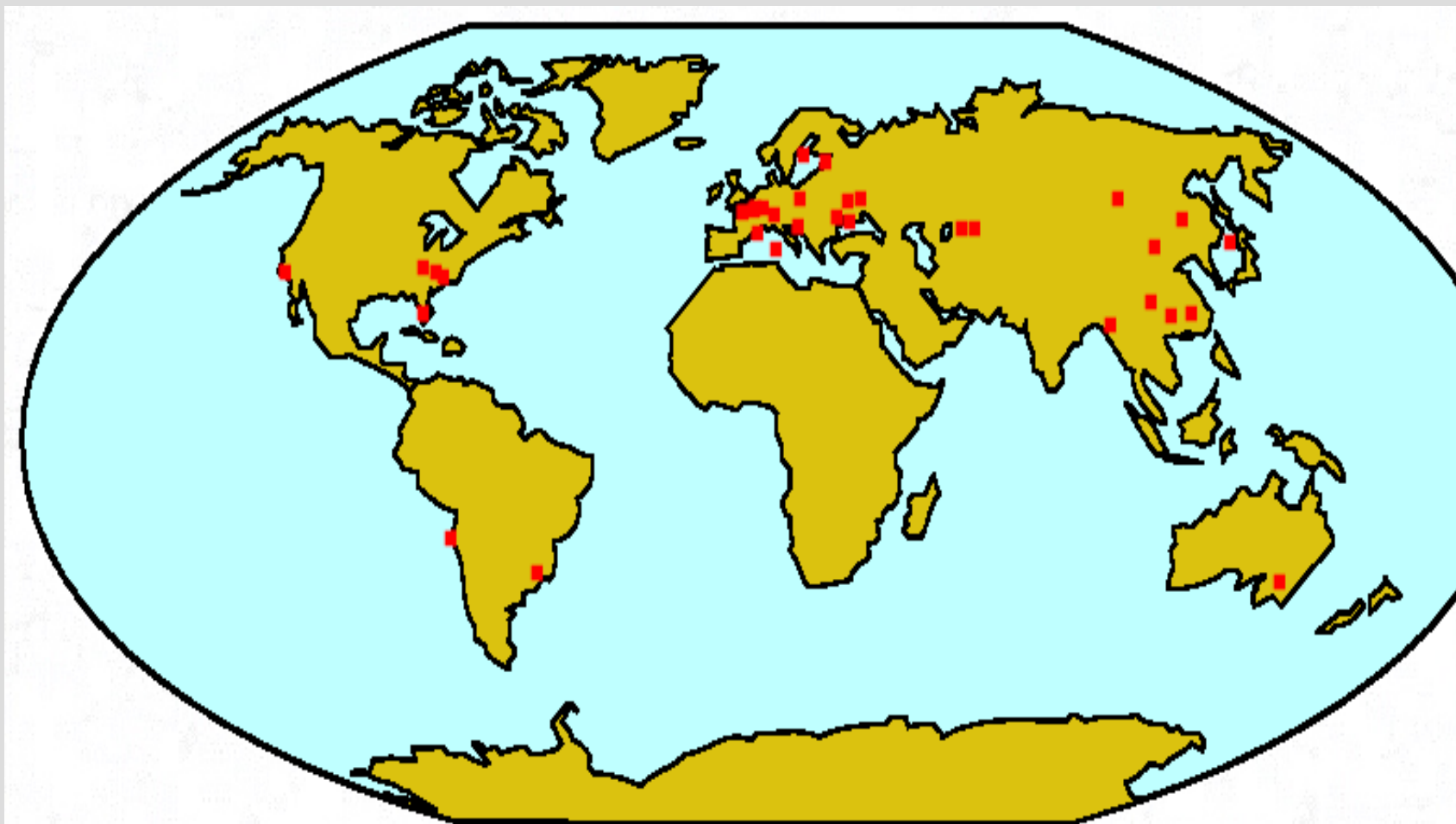
$$v_T = [(UT0 - UTC) - (UT1 - UTC)] 15 \cos \phi + (x \sin \lambda + y \cos \lambda) \sin \phi - \cos \phi \tan \delta (\Delta \epsilon \cos \alpha - \Delta \psi \sin \alpha)$$

$$v_h = -\Delta h + 15 \cos \phi \sin a (UT1 - UTC) +$$

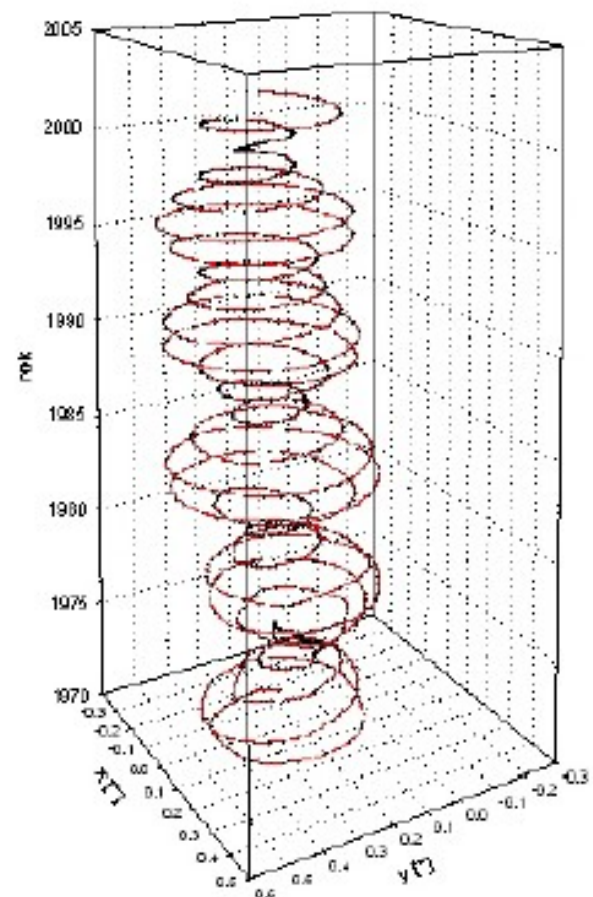
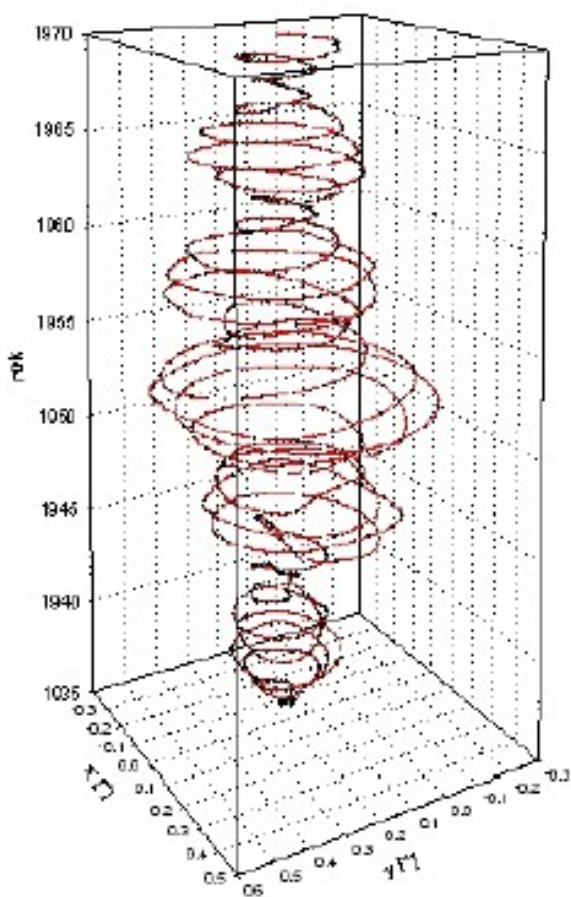
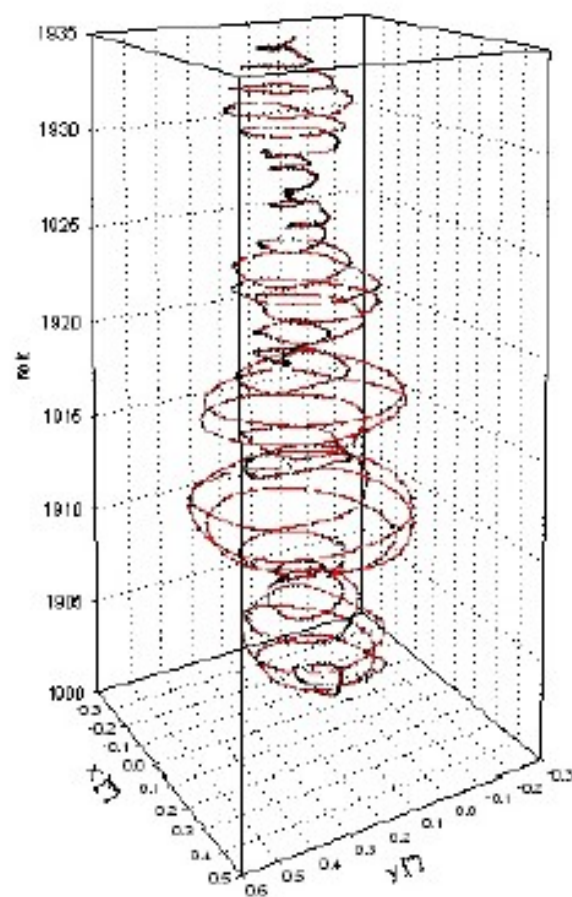
$$+ x (\cos \lambda \cos a + \sin \phi \sin \lambda \sin a) - y (\sin \lambda \cos a - \sin \phi \cos \lambda \sin a) +$$

$$+ \Delta \epsilon (\sin q \sin \delta \cos \alpha - \cos q \sin \alpha) - \Delta \psi \sin \epsilon (\sin q \sin \delta \sin \alpha + \cos q \cos \alpha)$$

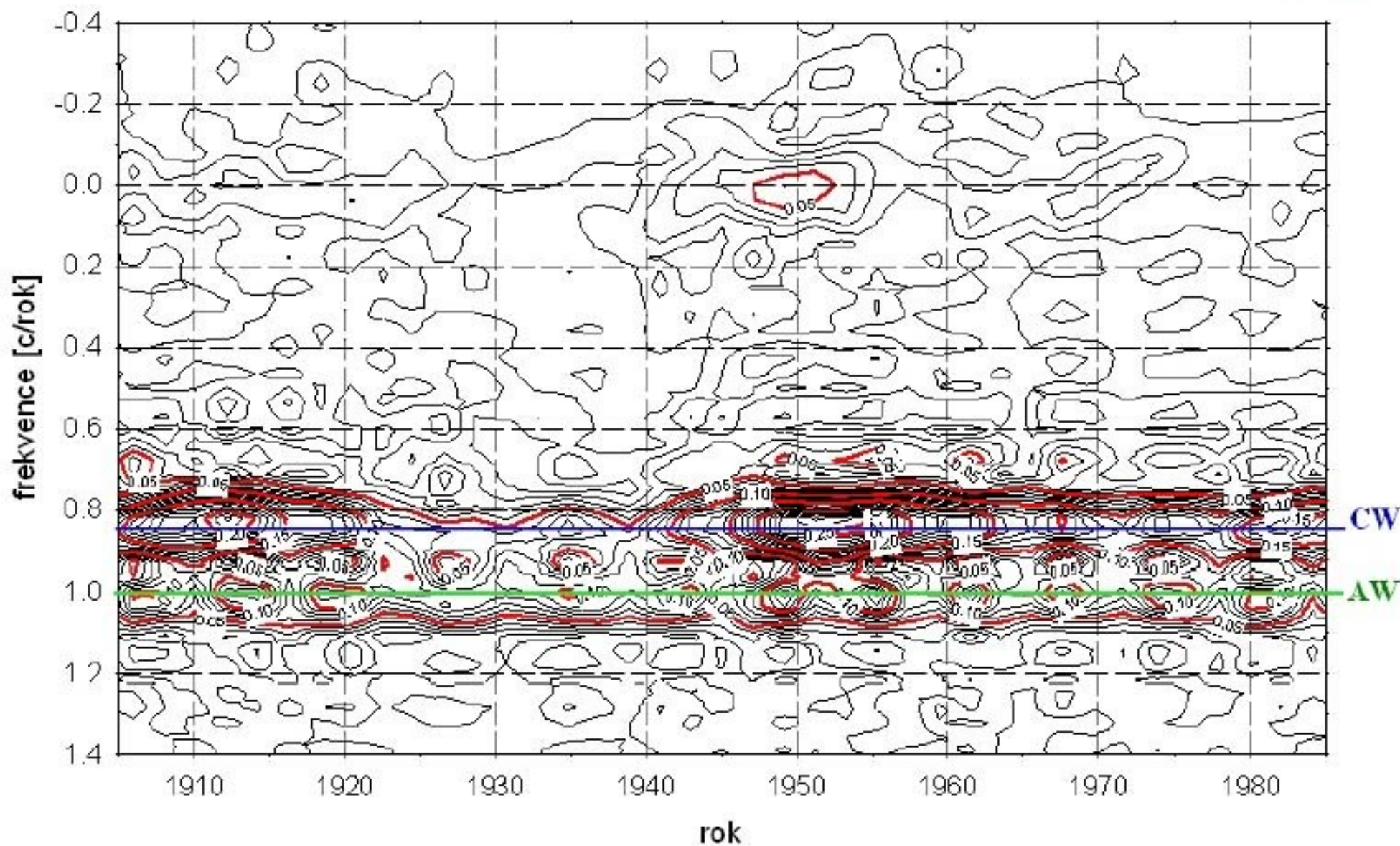
Rozložení observatoří



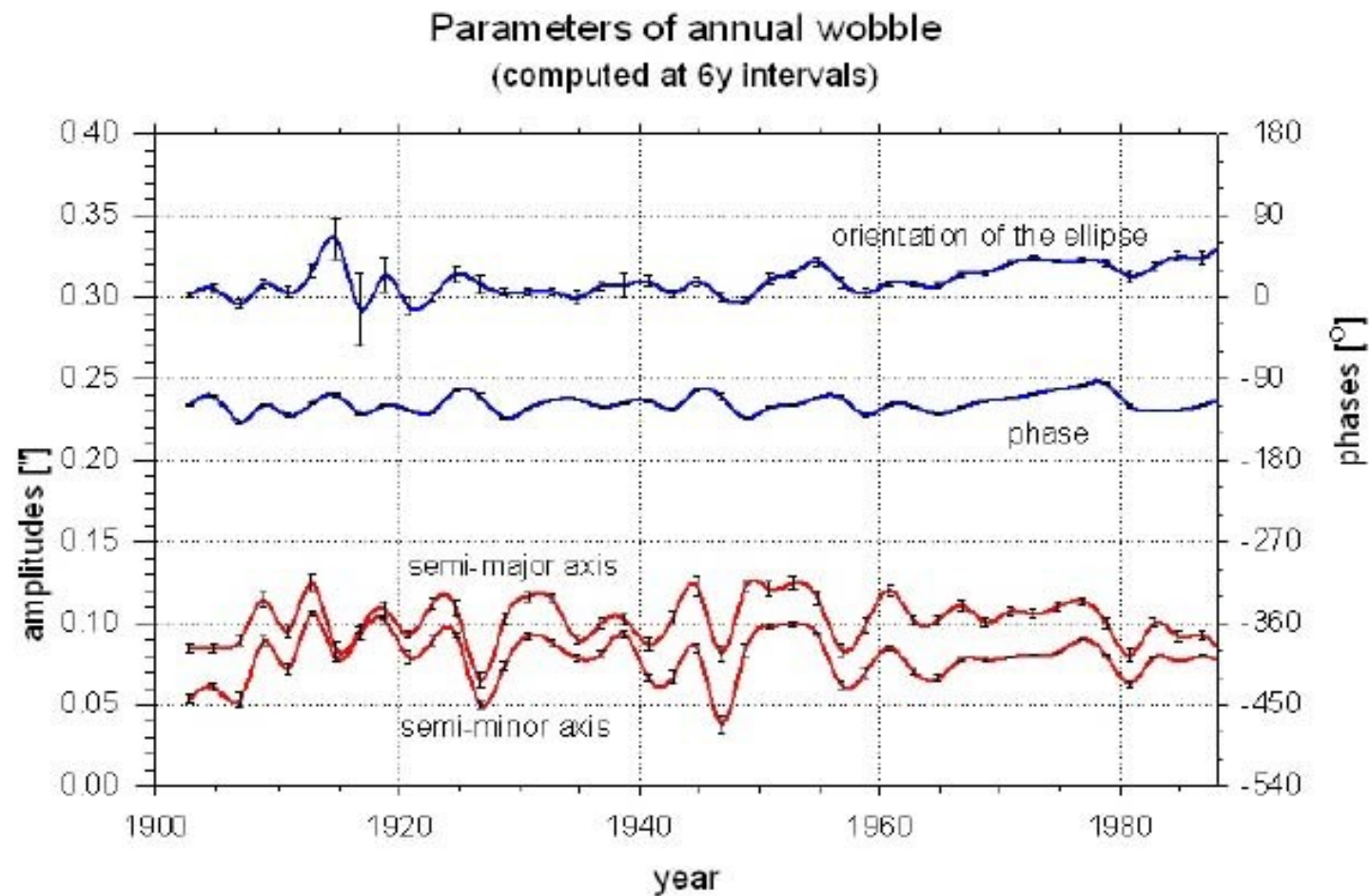
Pohyb pólu z OA



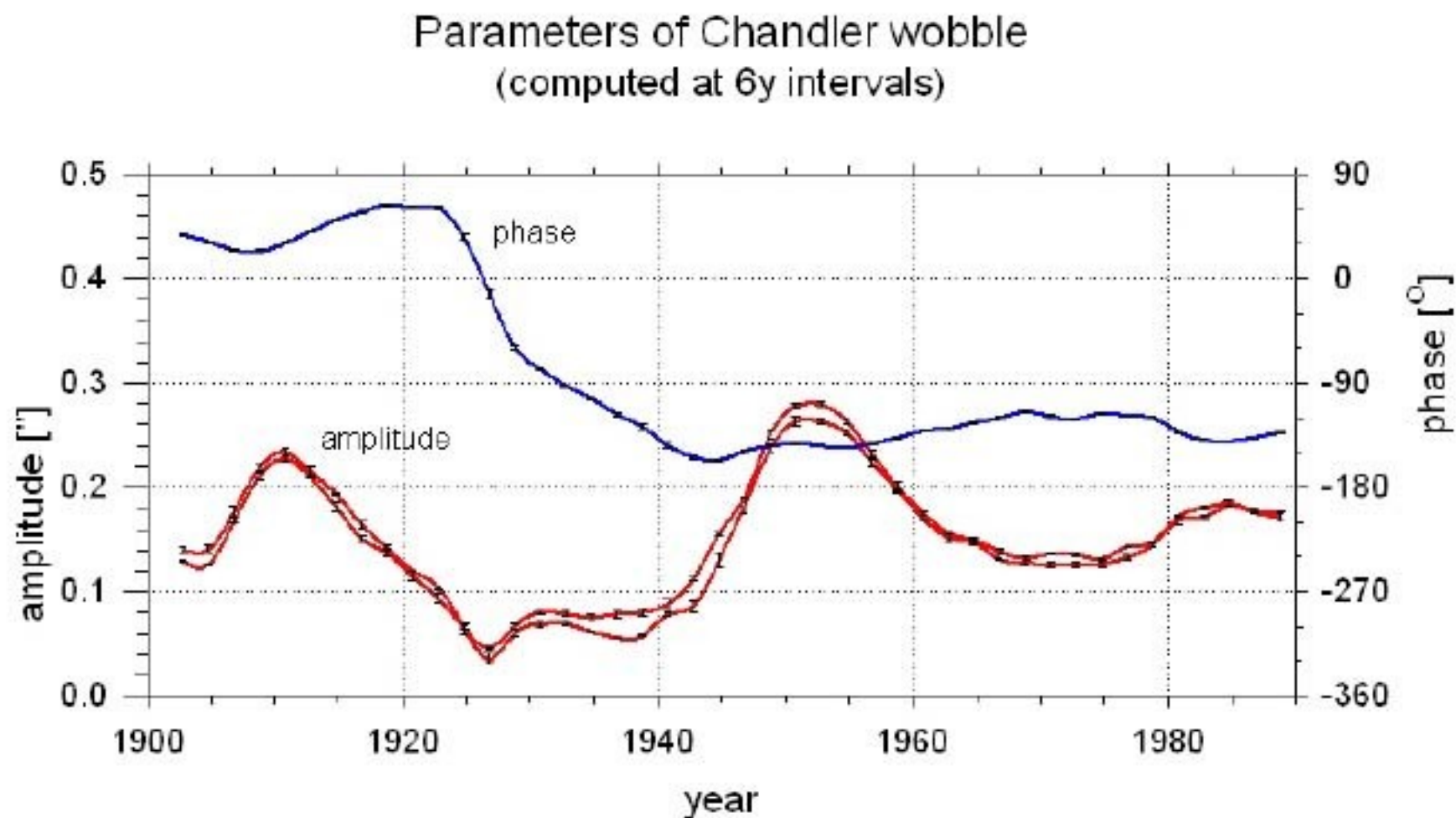
Časový vývoj spektra p.p.



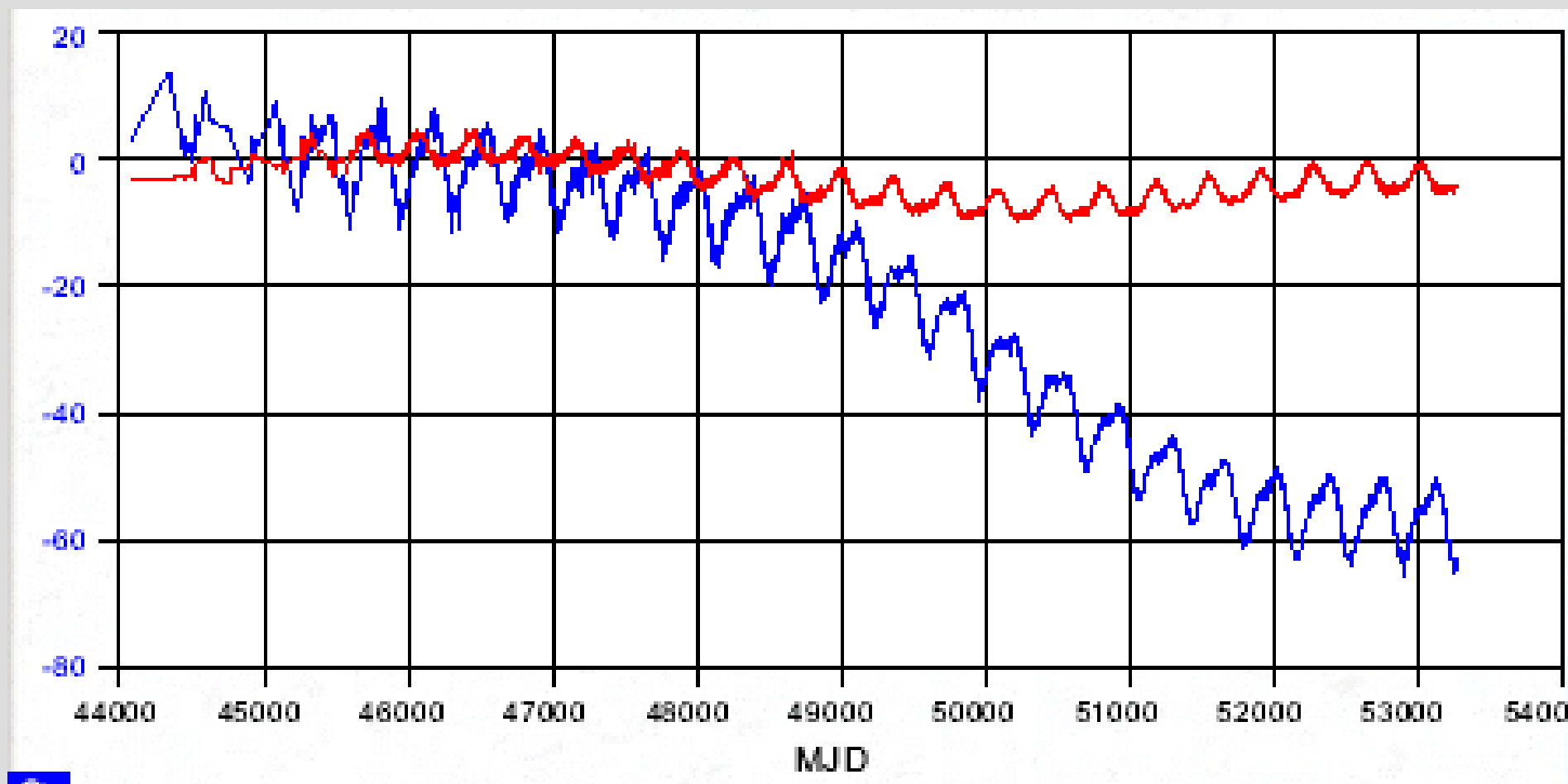
roční člen



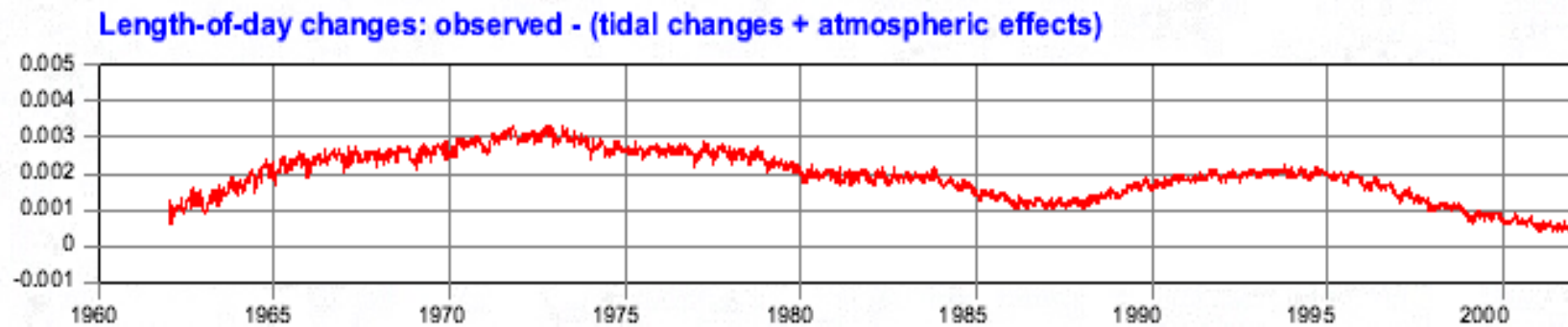
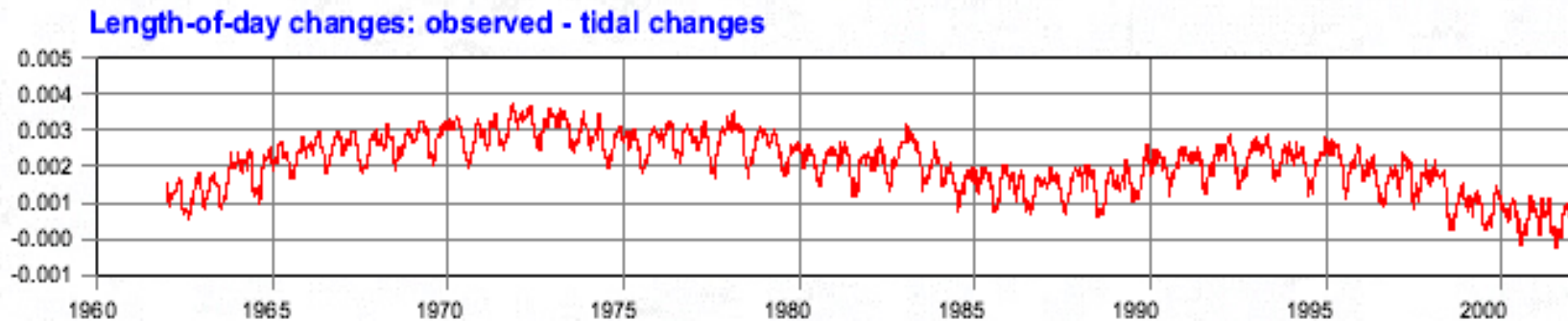
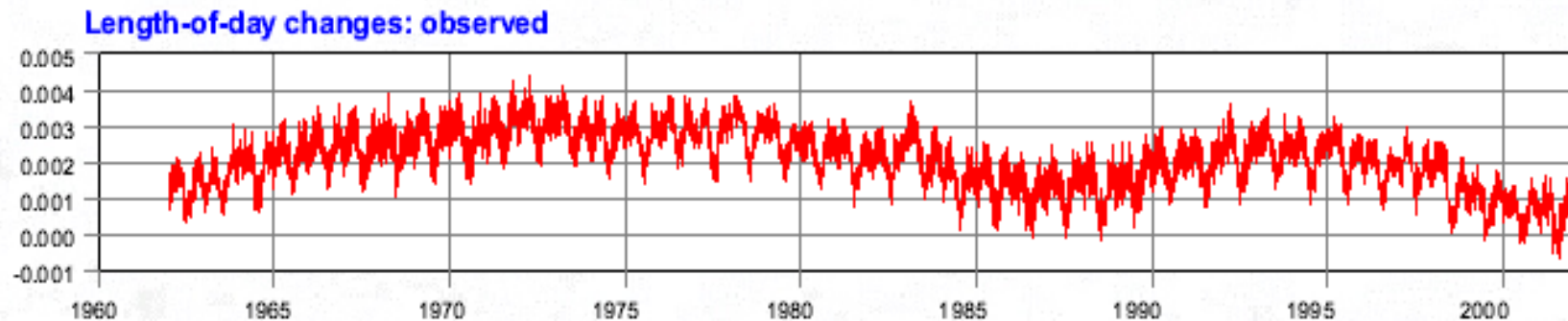
Chandlerovský pohyb



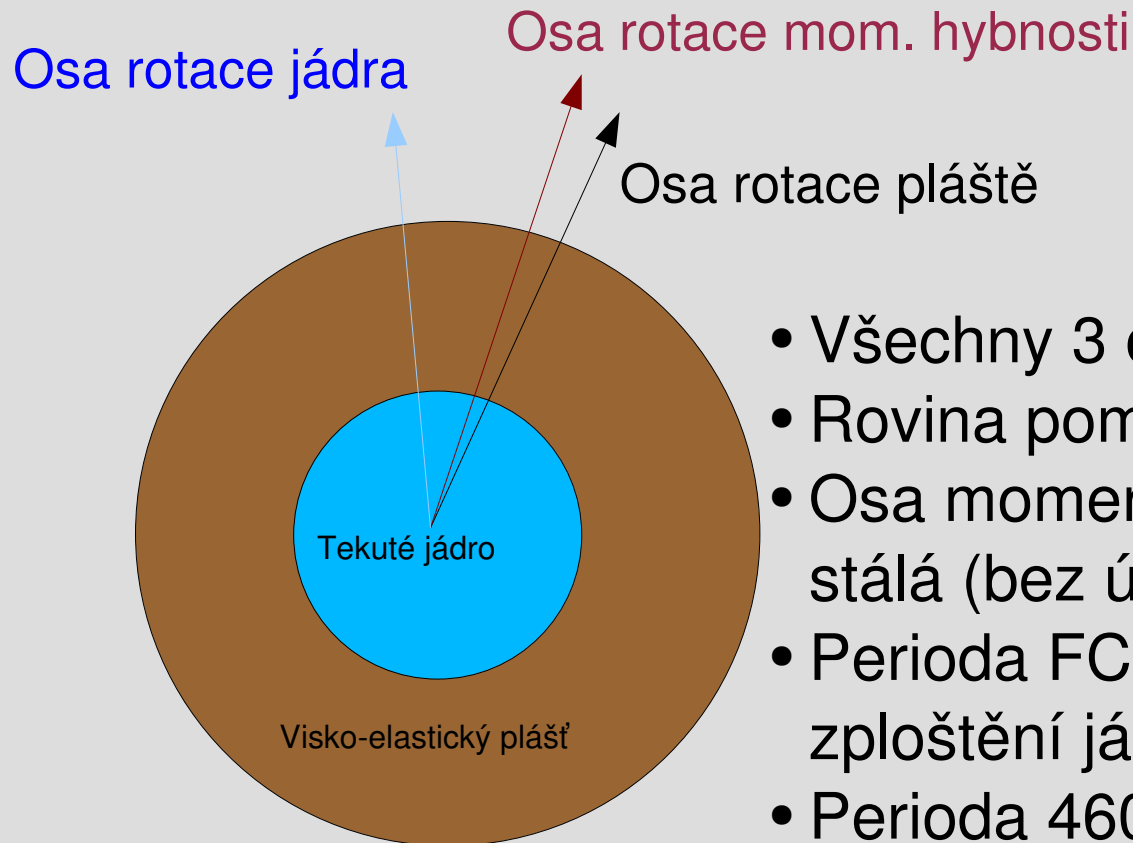
Odchylky nebeského pólu od IAU1980



Variace délky dne z astrometrických a moderních kosmických pozorování

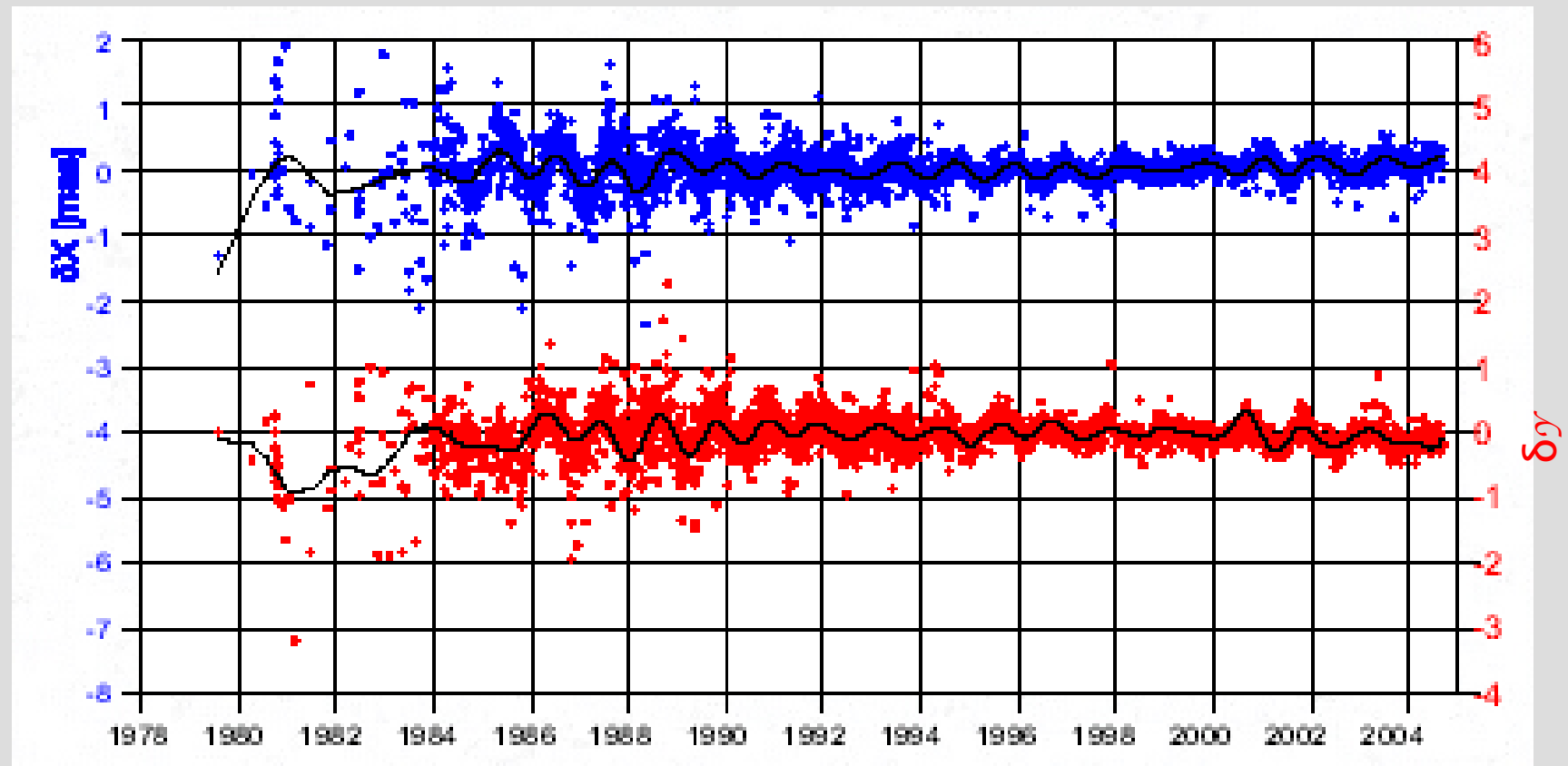


Rezonance a možná excitace FCN

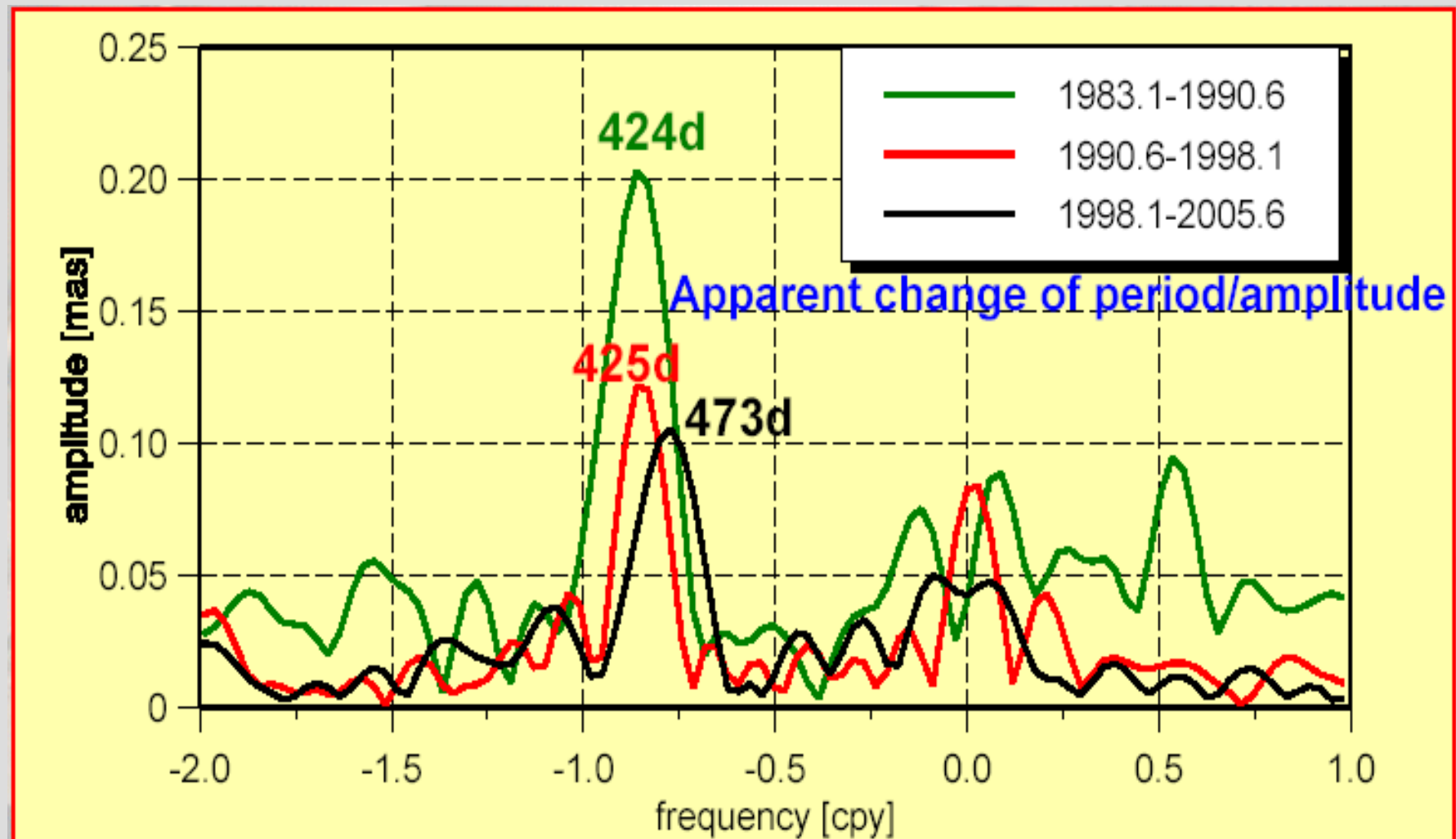


- Všechny 3 osy v jedné rovině,
- Rovina pomalu rotuje ve prostoru,
- Osa momentu hybnosti je v prostoru stálá (bez účinku vnějších síl),
- Perioda FCN je nepřímo úměrná dyn. zploštění jádra
- Perioda 460d je-li jádro v hydr. rovnováze (Wahr, 1980)
- VLBI => perioda 430 (zpl. > 4%) (

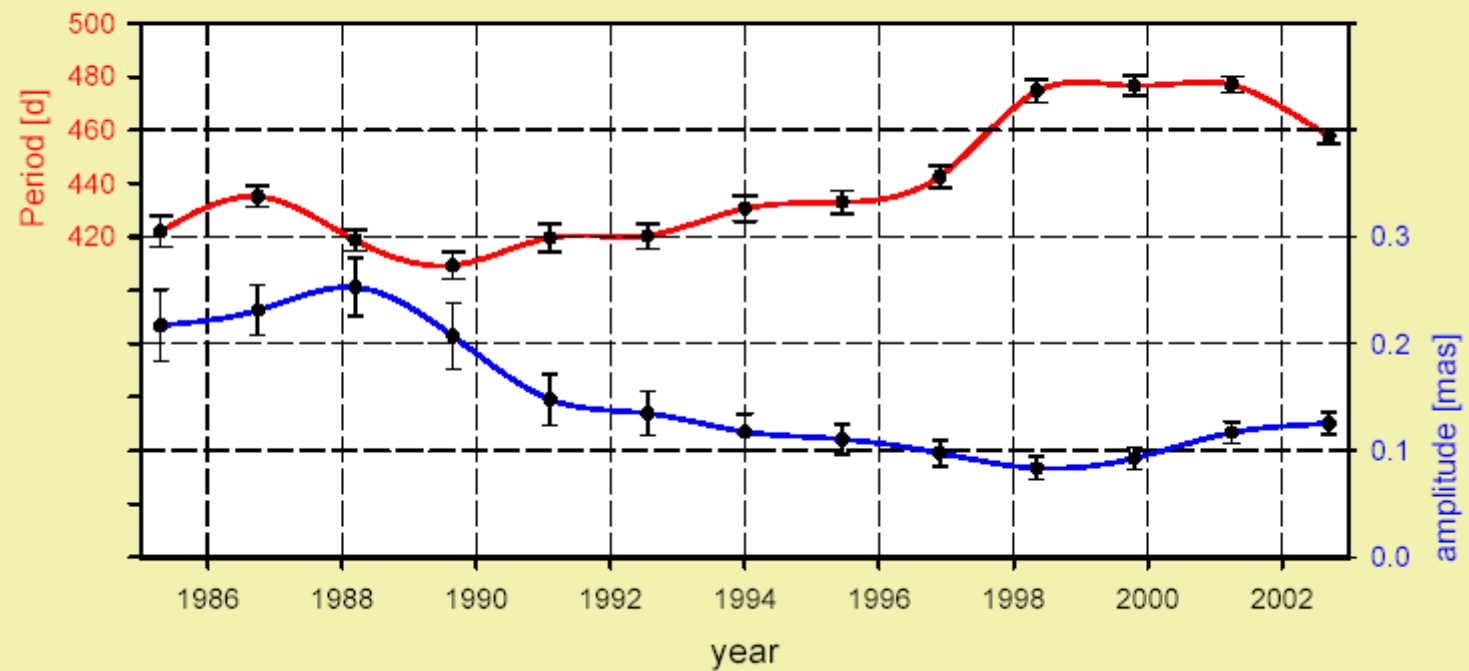
Odchylky nebeského pólu od IAU2000



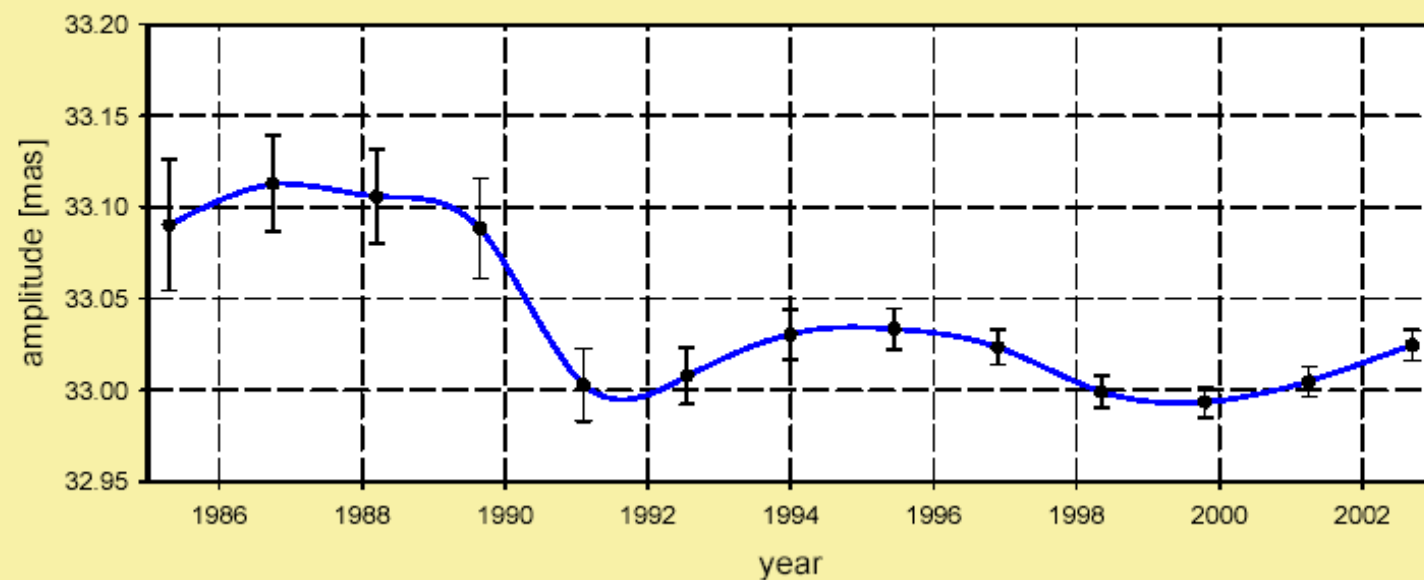
Spektrální analýza IVS ve 3 oknech



Retrograde FCN - observed period and amplitude



Retrograde annual term - observed amplitude



MHB přenosová funkce

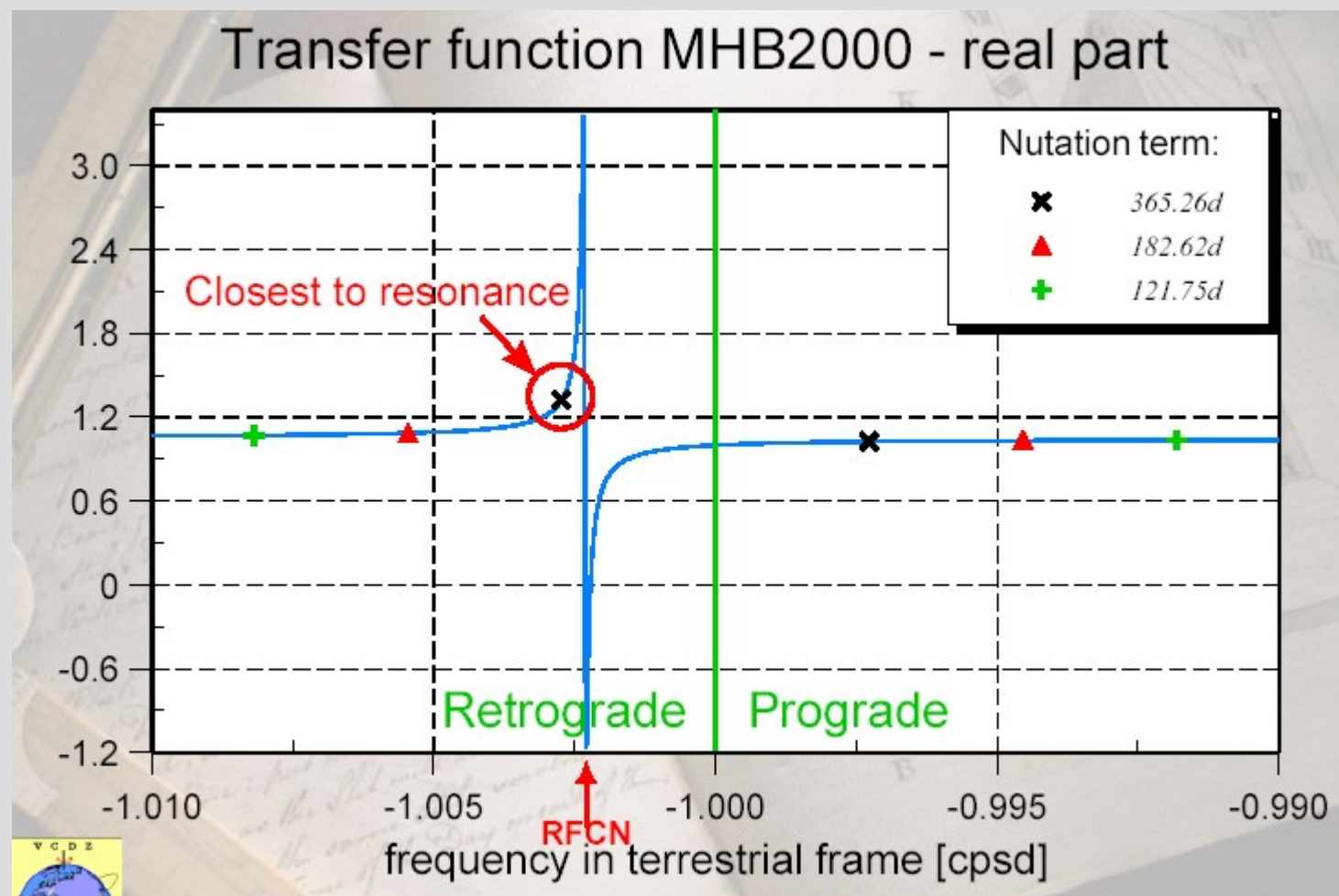
MHB přenosová funkce

$$T(\sigma) = \frac{e_R - \sigma}{e_R + 1} N_0 \left[1 + (1 + \sigma) \left(\varrho_0 + \sum_{j=1}^4 \frac{\varrho_j}{\sigma - s_j} \right) \right]$$

Rezonanční frekvence:

- | | |
|--------|-------------|
| 1. ChW | P=435d (t) |
| 2.RFCN | P=430d (c) |
| 3.PFCN | P=1020d (c) |
| 4.ICW | P=2400d (t) |

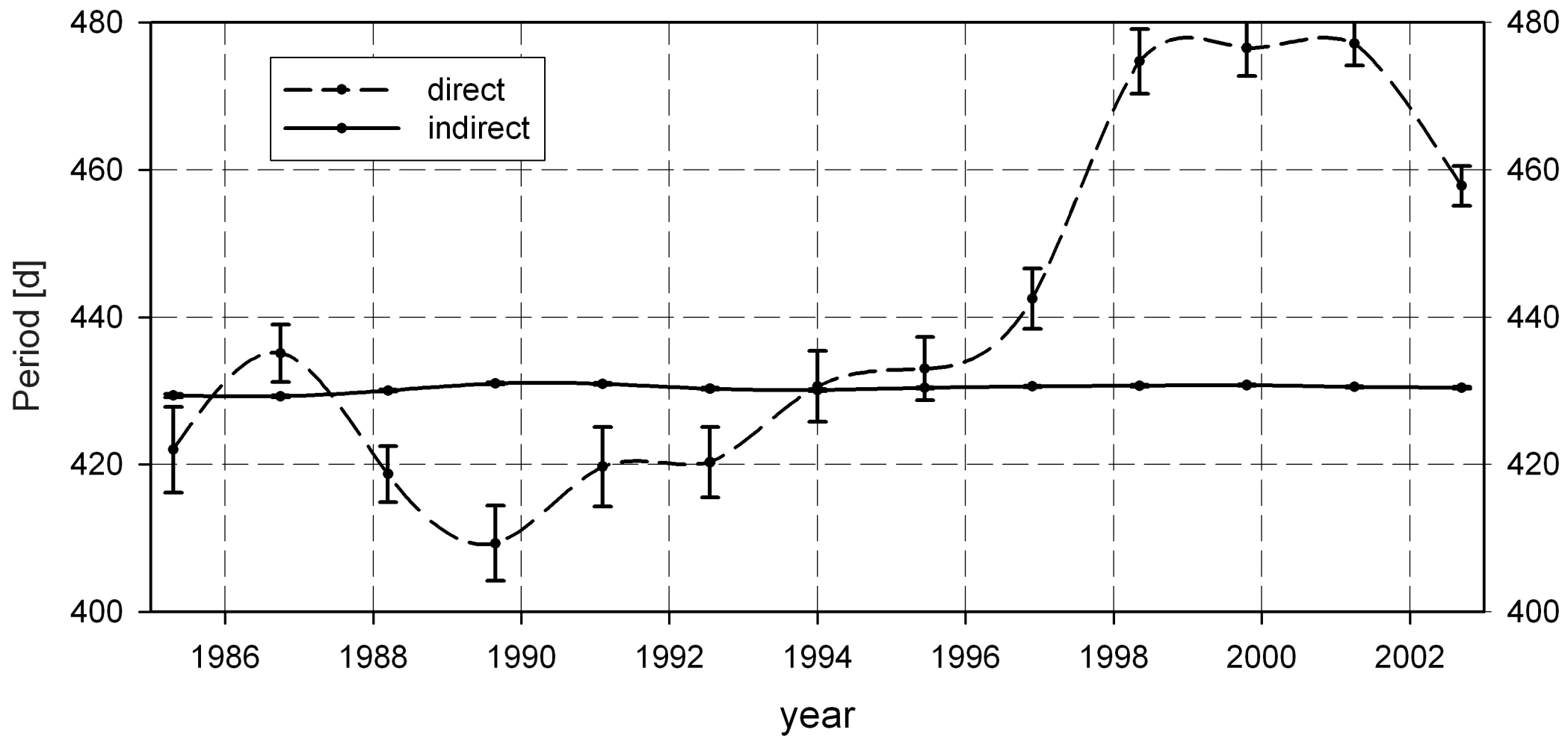
přenosová funkce



$$T(\sigma) = \frac{e_R - \sigma}{e_R + 1} N_0 \left[1 + (1 + \sigma) \left(\mathcal{Q}_0 + \sum_{j=1}^4 \frac{\mathcal{Q}_j}{\sigma - s_j} \right) \right]$$

Pokud se mění rezonanční perioda RFCN, musí se měnit amplituda ročního členu

Perioda RFCN



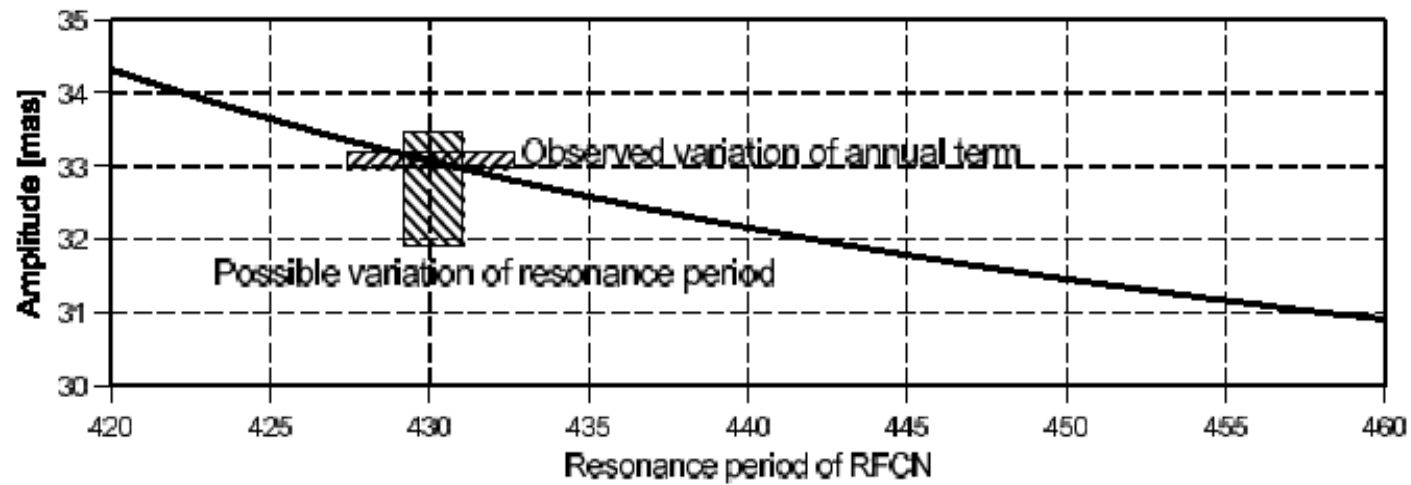


Figure 3: Amplitude of retrograde annual nutation in terms of RFCN period

$$p(\sigma) = \chi^P \left[\frac{\sigma_{CW}}{\sigma_{CW} - \sigma} + \frac{9.509 \times 10^{-2} \sigma_{CW}}{\sigma_{FCN} - \sigma} \right]$$

Spektrum AAM (tlak)

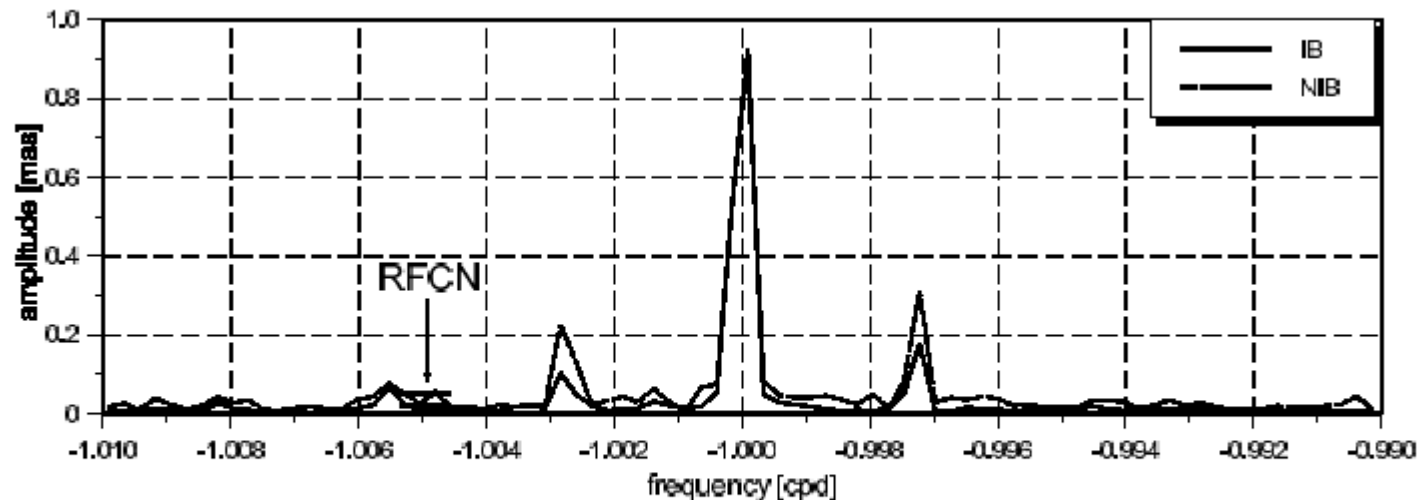
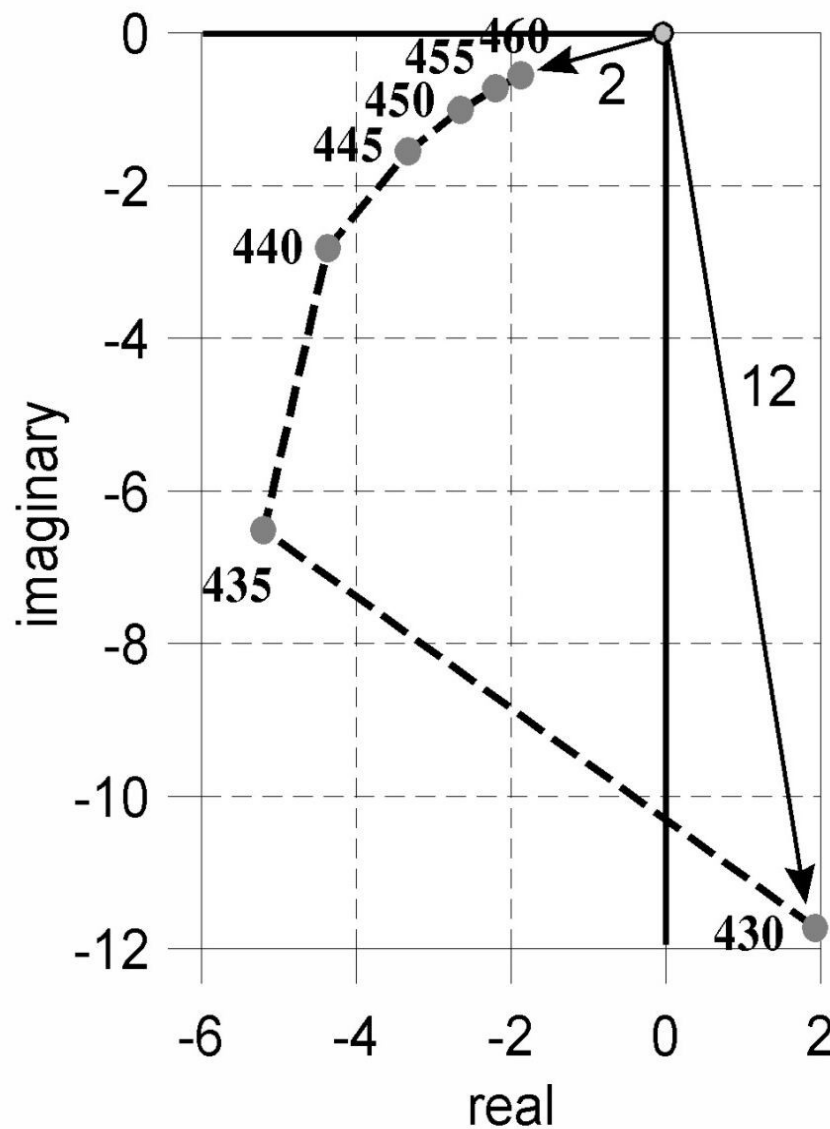


Figure 4: Spectrum of AAM pressure term (1980–2004). Required level of excitation to produce observed changes of RFCN period is marked by short horizontal lines.

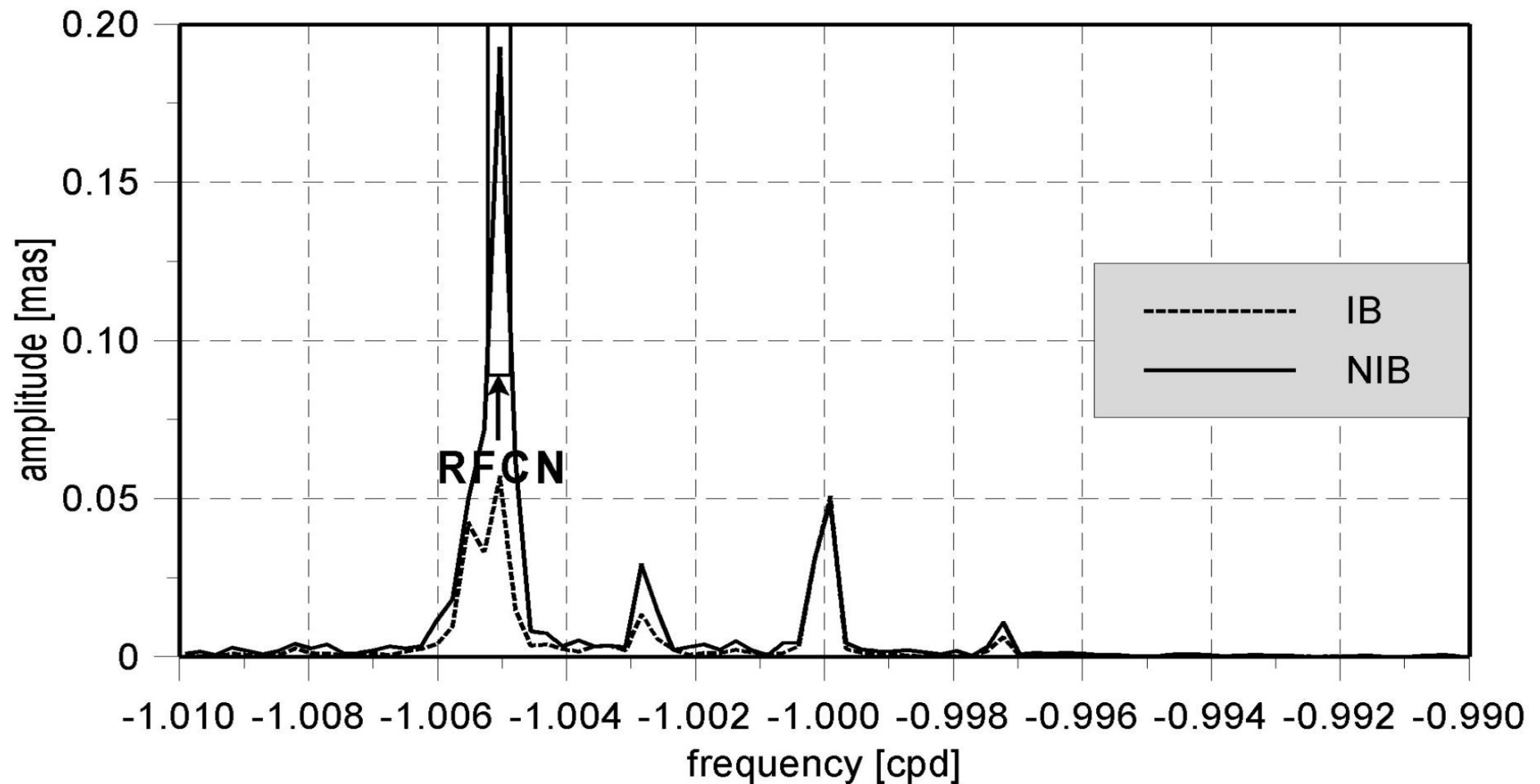
poměr amplitudy pohybu pólu a excitace atmosférického tlaku



$$p(\sigma) = \chi^P \left[\frac{\sigma_{CW}}{\sigma_{CW} - \sigma} + \frac{9.509 \times 10^{-2} \sigma_{CW}}{\sigma_{FCN} - \sigma} \right]$$

Complex ratio of the amplitude of polar motion to atmospheric pressure excitation for different celestial periods.

Spektrum AAM způsobené přenosovou funkcí



AAM má v okolí RFCN dostatečnou sílu na
vybuzení variací frekvence a amplitudy RFCN