

Přenos přesného času a frekvence systémem White Rabbit

Vladimír Smotlacha
CESNET

CSNOG 2026

Zlín

21 - 22. ledna 2026

Téma hodiny: Králíky.

Cíl hodiny: Nakrmit je.

M. Šimek a J. Grossmann: *Exkurse do ZOO.*



cesnet
"...."

Přesný čas a stabilní frekvence



Doprava



Navigace



Finanční
sektor



Věda



Přenosová soustava



Telekomunikace



Obrana

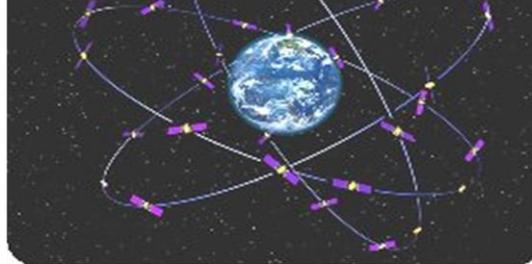


Astronomy



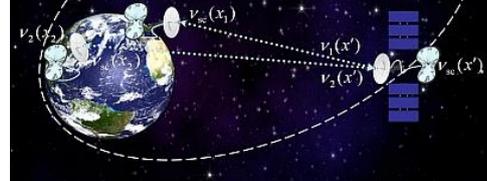
GNSS

<https://galileognss.eu/wpcontent/uploads/2013/09/Galileo-Constellation.jpg>

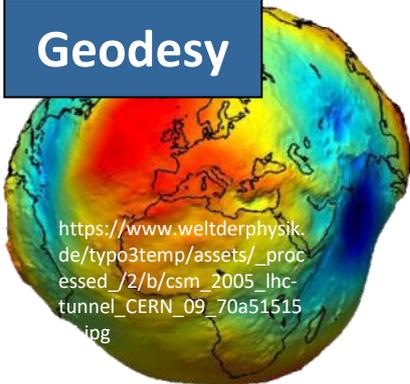


Fundamental physics

https://cdn.sci.esa.int/documents/33940/35451/1567216846854-RedShift_screen.jpg



Geodesy



Optical clocks & SI



https://qusco-itn.eu/wp-content/uploads/2019/07/share_image.jpg

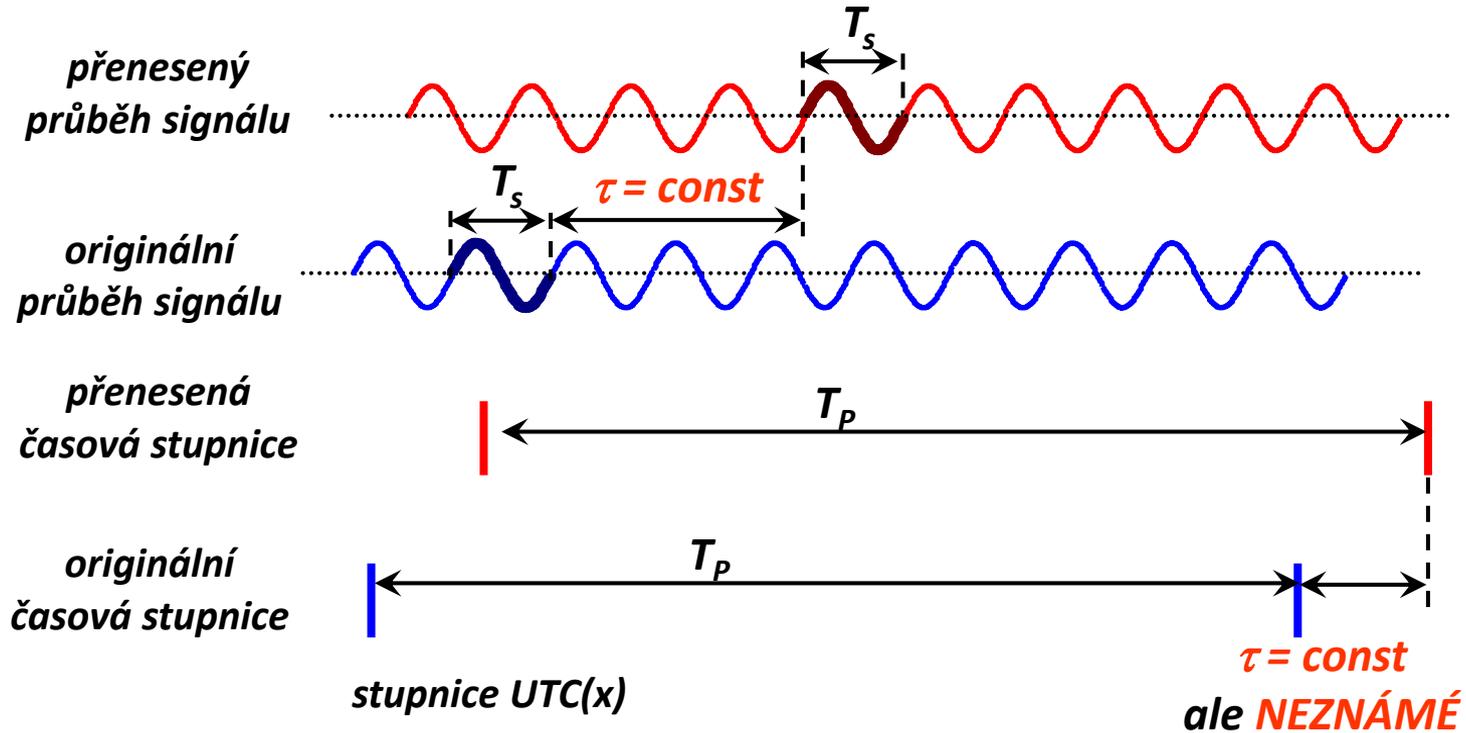


Quantum technologies

cesnet
"...."

Přenos času a frekvence





■ NTP

- globální Internet, UDP protokol, struktura mash
- hierarchie NTP serverů podle „vzdálenosti“ od ext. reference (Stratum)
- dosažitelná přesnost 1ms – 100 μ s

■ PTP

- lokální síť, Ethernet (podporuje ale i UDP), topologie strom
- předpokládá HW podporu na všech zařízeních (boundary clock, transparent clock) v trase
- dosažitelná přesnost 1 μ s (s HW podporou), jinak jen o něco lepší než NTP

■ WhiteRabbit

- přesnost lepší než 1 ns



■ Vyvinuto v CERNu

- synchronizace senzorů a dalších zařízení v rámci experimentů na urychlovačích
- přesnost přenosu času v řádu nanosekund

■ CERN Open Hardware License

- zveřejněná dokumentace
- kdokoliv může vyrábět originální nebo odvozené verze



■ několik komerčních výrobců

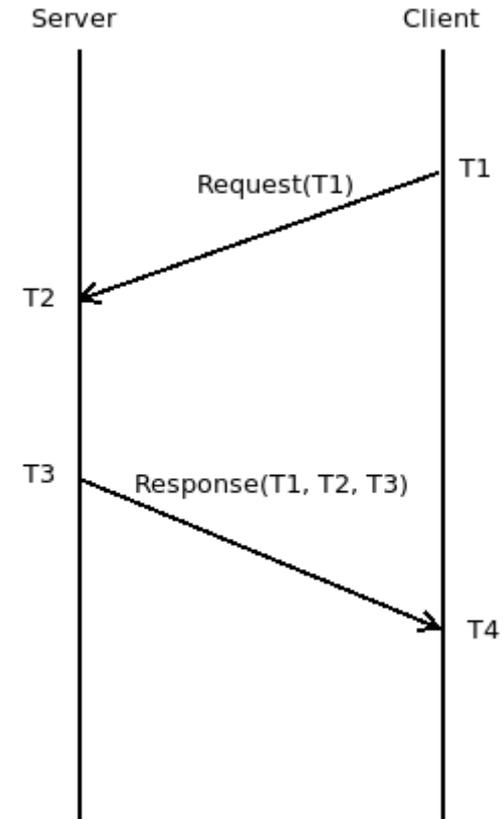
- Klient periodicky posílá požadavky Serveru a z výsledku spočítá ofset svého času.
- Nezávisle na ofsetu mezi Klientem a Serverem, celkové zpoždění δ je

$$\delta = (T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)$$

- Za předpokladu stejného jednosměrného zpoždění $\delta_{AB} = \delta_{BA}$, ofset θ_0 mezi Klientem a Serverem je

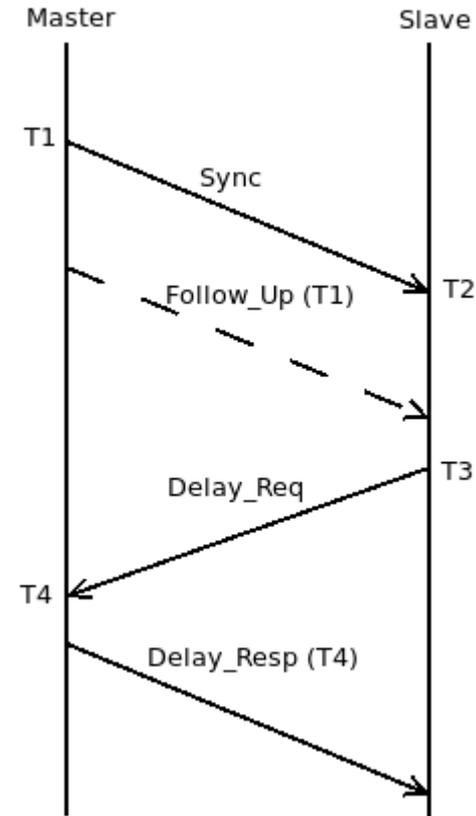
$$\theta_0 = \frac{(T_1 - T_2) + (T_4 - T_3)}{2}$$

- Skutečný ofset θ je vždy v intervalu $(\theta_0 - \delta/2, \theta_0 + \delta/2)$



- Master periodicky posílá zprávy **Sync**
- Slave občas ověří *round trip time* pomocí zpráv **Delay_Req** a **Delay_Resp**.
- Slave má offset času θ
$$\theta = T_2 - (T_1 + \delta_{MS})$$
- Slave spočítá celkové zpoždění (*round trip time*)
$$\delta = (T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)$$
- Za předpokladu stejného zpoždění v obou směrech ($\delta_{MS} = \delta_{SM}$) platí

$$\delta_{MS} = \delta / 2$$



cesnet
"...."

White Rabbit



■ Protokol PTP (IEEE-1588)

- WR je nadstavbou PTP
- nově specifikováno v IEEE-1588 jako profil HA (*High Accuracy default PTP profile*)

■ 1 GbE

- optické SFP transceivery

■ SyncE

- syntonizace všech zařízení
- distribuce frekvence z GrandMasteru v celé WR síti

■ Bidirectional single fiber

- vyhrazené vlákno nebo alespoň optické kanály

■ SFP transceivery

- BX – vyžadují vyhrazené vlákno (1310 nm, 1490/1550 nm)
- DWDM – nutno sloučit do jednoho vlákna (filtr, MUX/DEMUX, ...)

■ Lokální oscilátor – velmi přesný fázový závěs

- DDMTD

■ Linkový model

- stejná fyzická délka v obou směrech
- asymetrie zpoždění v důsledku chromatické disperze

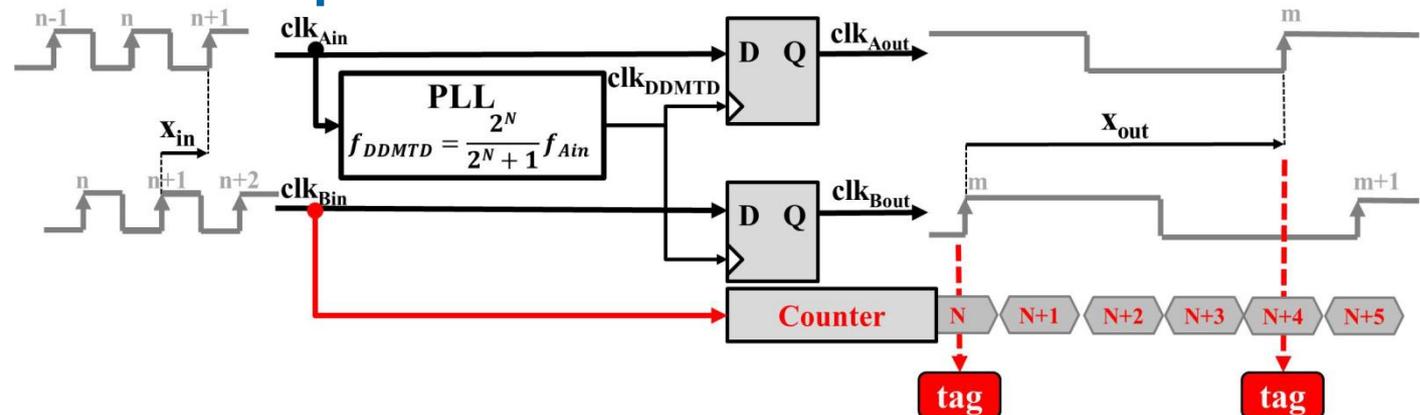
■ Přesné měření fázového rozdílu v FPGA

- Digital Dual Mixer Time Difference (DDMTD)

■ Frekvence v DDMTD:

- clk_{in}: 62.5 MHz
- clk_{DDMTD}: 62.4961 MHz (N=14)
- clk_{out}: 3.814 kHz

■ Teoretické rozlišení 0.977 ps



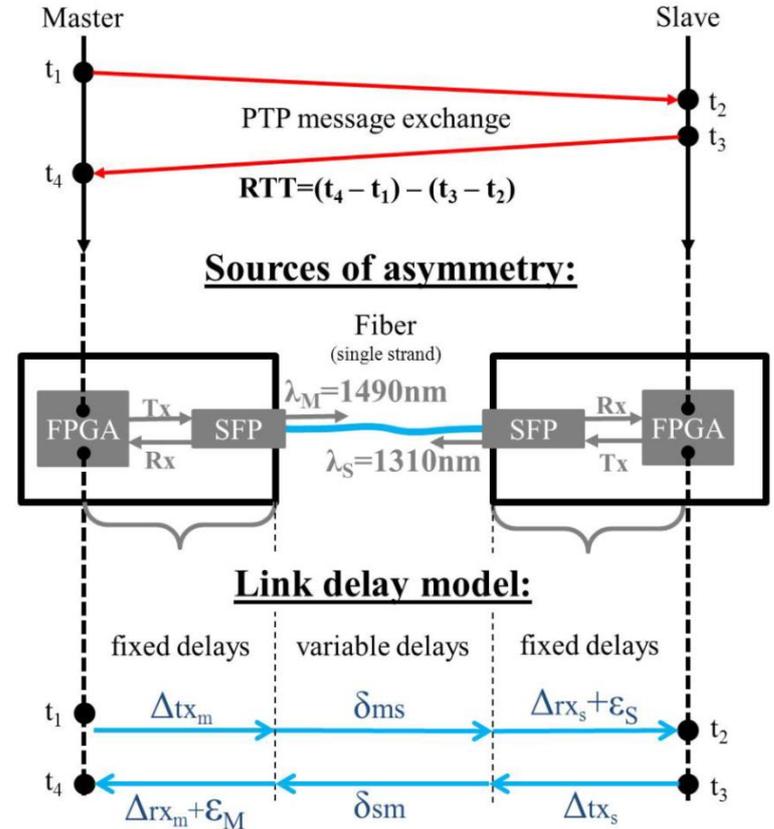
Konstantní zpoždění

- FPGA, SFP, ...

Proměnné zpoždění ve vlákne

- chromatická disperze zahrnutá v koef. α

$$\alpha = \frac{v(\lambda_s)}{v(\lambda_m)} - 1 = \frac{\delta_{ms} - \delta_{sm}}{\delta_{sm}}$$

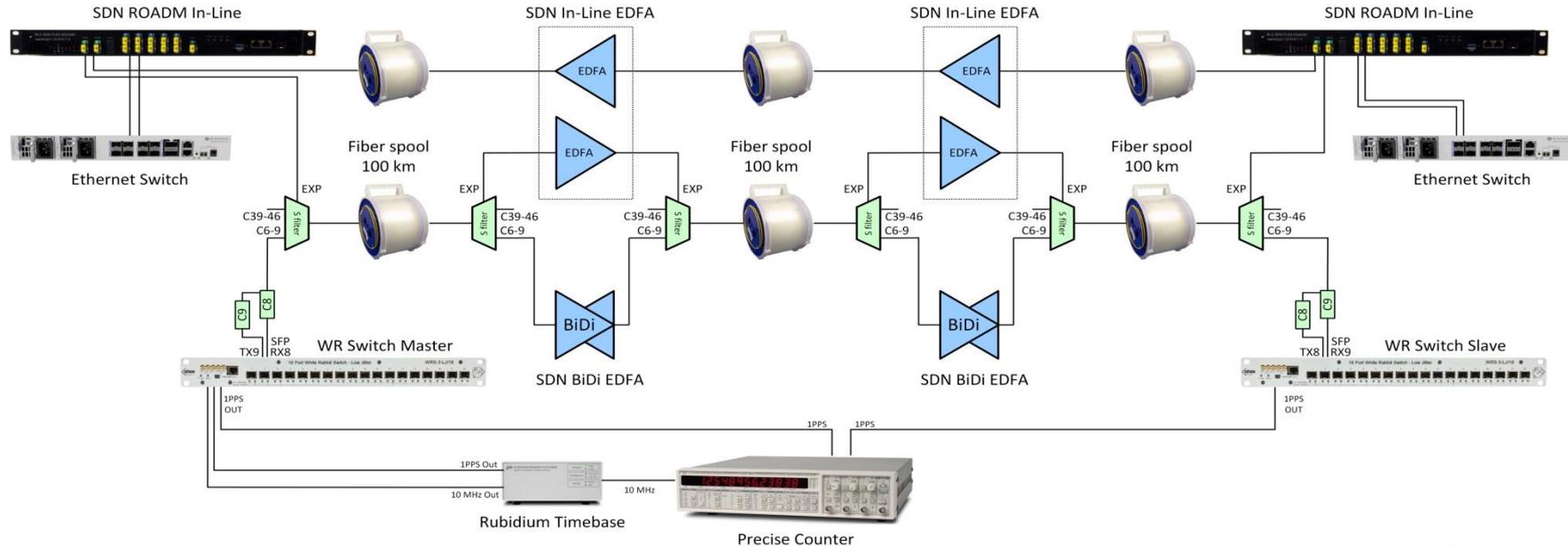


The logo for cesnet, featuring the word "cesnet" in a white, lowercase, sans-serif font. Below the text is a stylized graphic consisting of a series of white dots of varying sizes arranged in a pattern that suggests a network or data flow.

cesnet
"...."

The text "White Rabbit demo" in a white, bold, sans-serif font, positioned in the upper left quadrant of the image. The background is a dark blue, futuristic digital environment with glowing blue lines and a central bright blue circular light source.

White Rabbit demo



CESNET White Rabbit Demo - CSNOG 2026

■ 3x 100 km vlákna

- WR obousměrně
- background 1 GbE jednosměrně

■ 2x BiDi EDFA

■ 2x inline EDFA

■ 2x ROADM

■ 2x WRS

- Grandmaster
- BoundaryClock
- Rb hodiny
- čítač SR620 – offset signálů 1 pps

cesnet
"...."

DĚKUJI ZA POZORNOST

cesnet
"...."



cesnet
"...."

Overflow

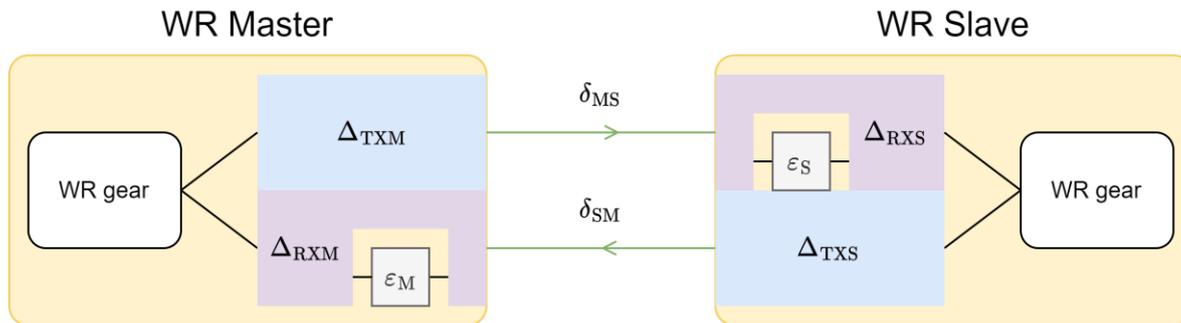


cesnet
“...”

Kalibrace systému White Rabbit

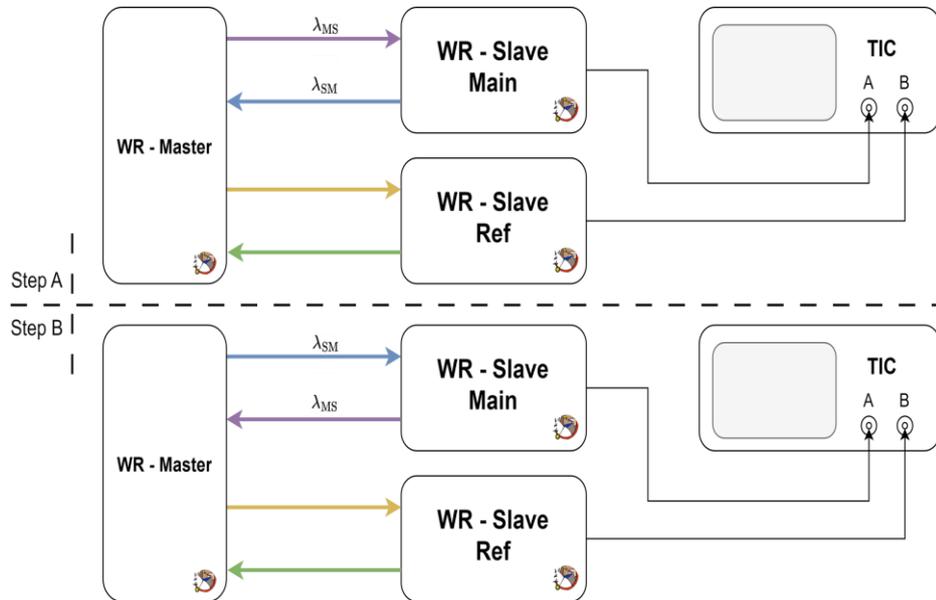


- Local asymmetry calibration is relatively simple
- Calibration of long and already deployed optical fiber can be challenging task
- There are several methods for remote asymmetry estimation



$$t_{asm} = \delta_{MS} - \delta_{SM} \quad (1)$$

$$\delta_{MS} - \delta_{SM} = 2 \cdot offset_{MS} \quad (2)$$



Source: E. Dierikx and Y. Xie, White Rabbit Good Practice Guide, May 2019.

- **Completely based on commercially available devices**
- **The method utilizes commutation of Rx and Tx communication channel**
- **Calibration system is a combination of:**
 - **White Rabbit Master node**
 - **Two White Rabbit Slave nodes**

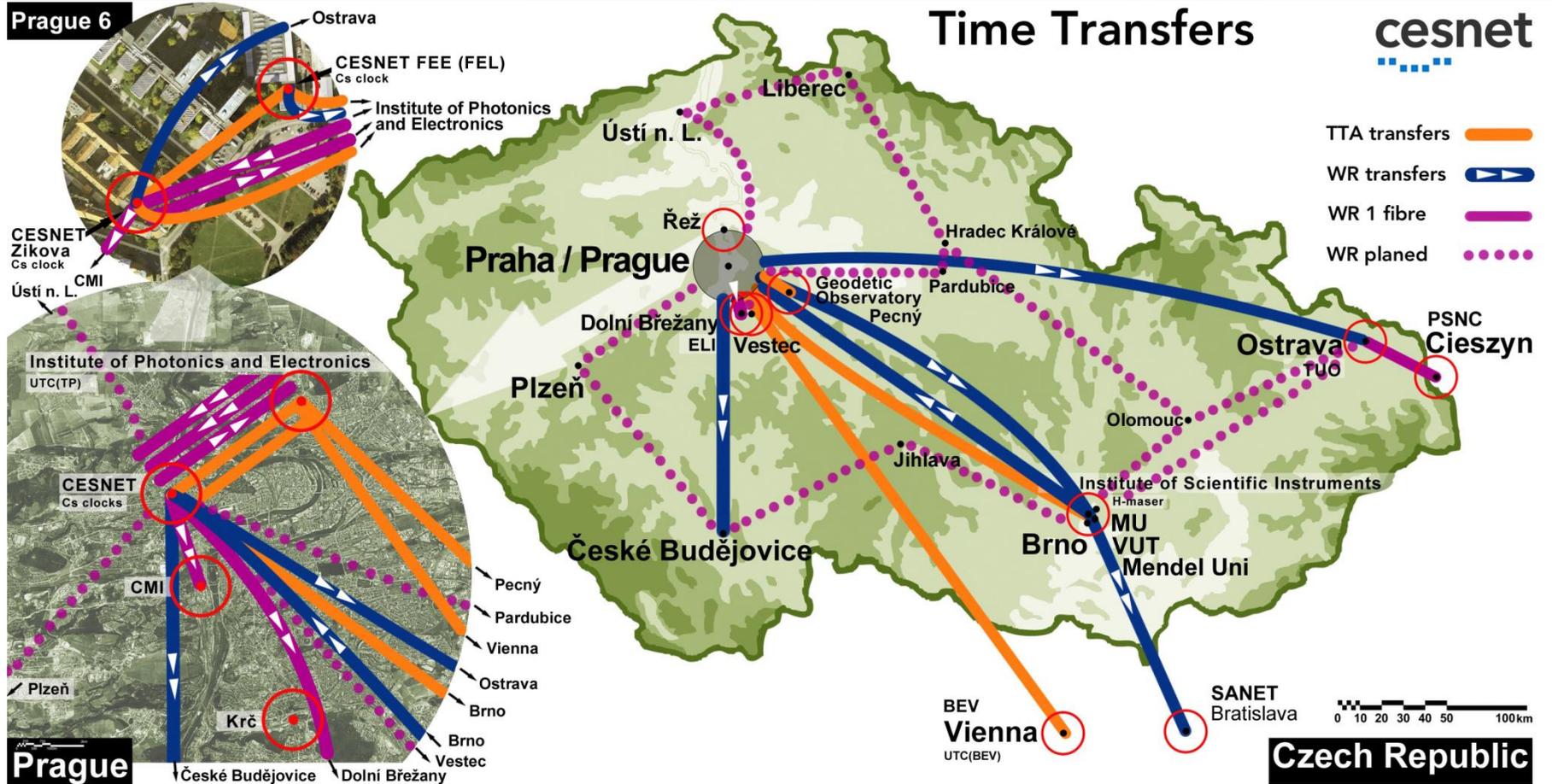
cesnet
"...."

WHITE RABBIT NETWORK



In 2024 started a large national project aimed at modernization of CESNET optical network

- **Sub-goal: Infrastructure for accurate time distribution**



■ 20 Points-of-Presence with WR switch

- including two PoPs in neighboring countries: Austria (Vienna) and Poland (Cieszyn or Wroclaw)

■ Advanced WR boxes

- multiple switchable references
- redundant power supply

■ Accurate time source traceable to UTC(TP)

- H-masers in Cesnet (Prague) and UPT (Brno)

Several issues of standard WRS that complicate use for 24/7 service or in large heterogeneous and multidomain setup:

- Only one port port might be configured as a slave
- No possibility to switch from GM to BC in case of RF signal fail
 - Box requires reconfiguration in case of lost reference
- Identification of network failure requires active monitoring
- SFP calibration parameters tied with #PN
 - Impossible to calibrate more SFP of the same type



WR boxes with several reference inputs

- Specified priority of inputs (SFP ports and RF)
- Holdover mode with defined duration
- Automatic switching to another input in case of signal failure
- Recovery once higher priority signal is available again
- Switching as fast as possible
 - No box with immediate switching yet available ??



WR-Z16

Example: WR-Z16 from Safran/ SevenSolutions

- two reference SFP ports
- 1PPS / 10 MHz inputs
- input switching takes tens of seconds

cesnet
"...."

THANK YOU

