

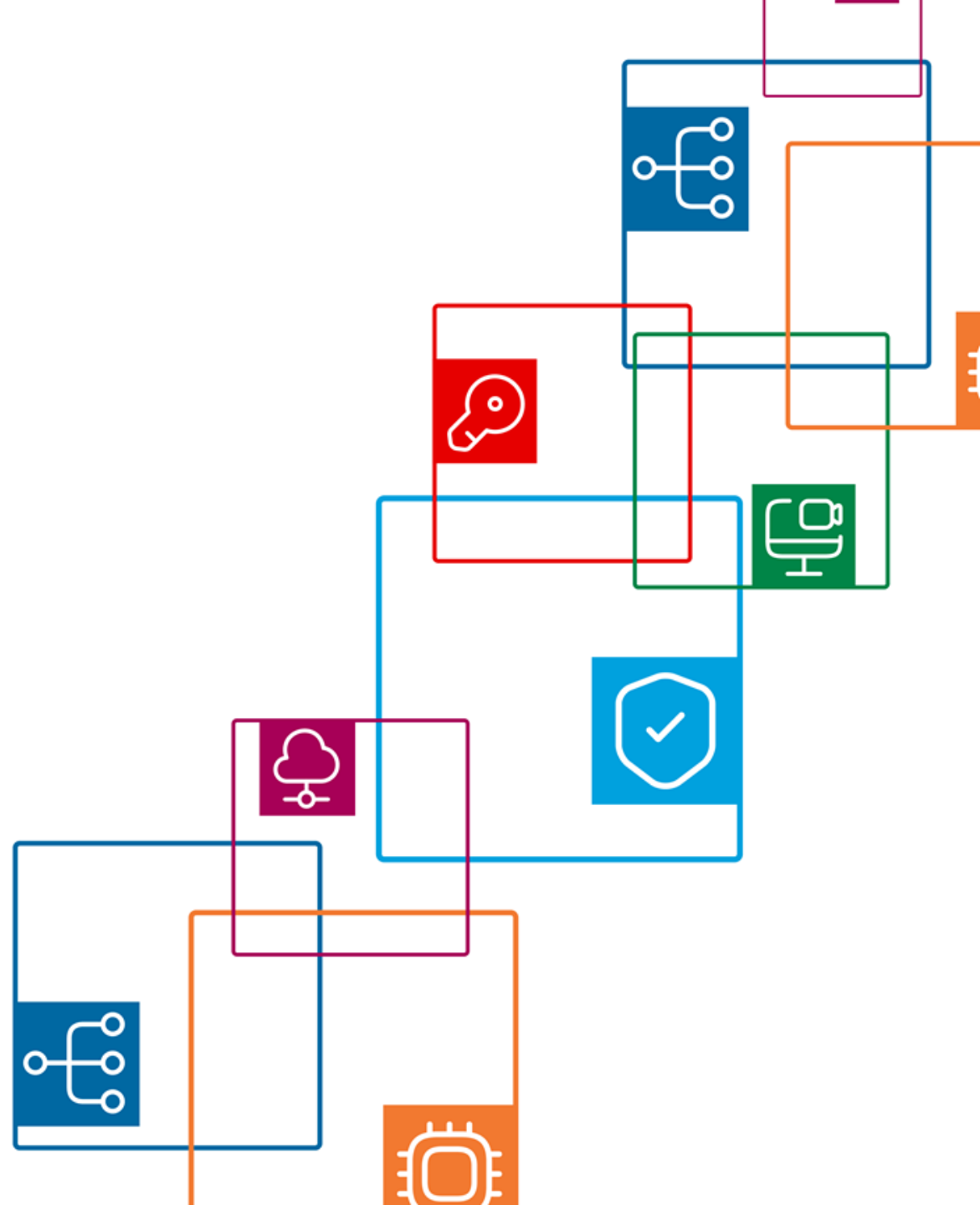


Přenos přesného času protokolem White Rabbit

Vladimír Smotlacha

LinuxDays 2026

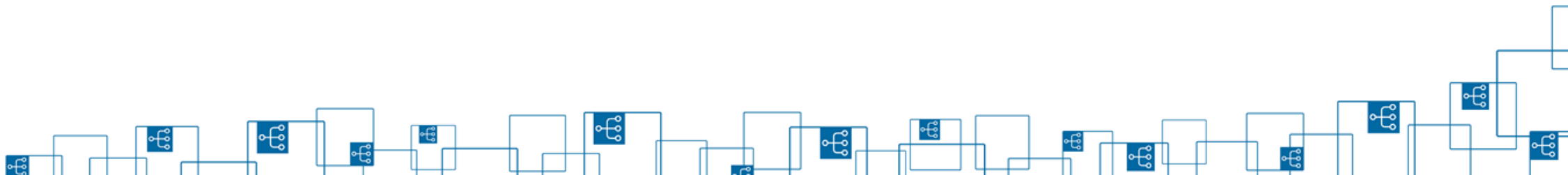
Praha 3 - 4.10.2026



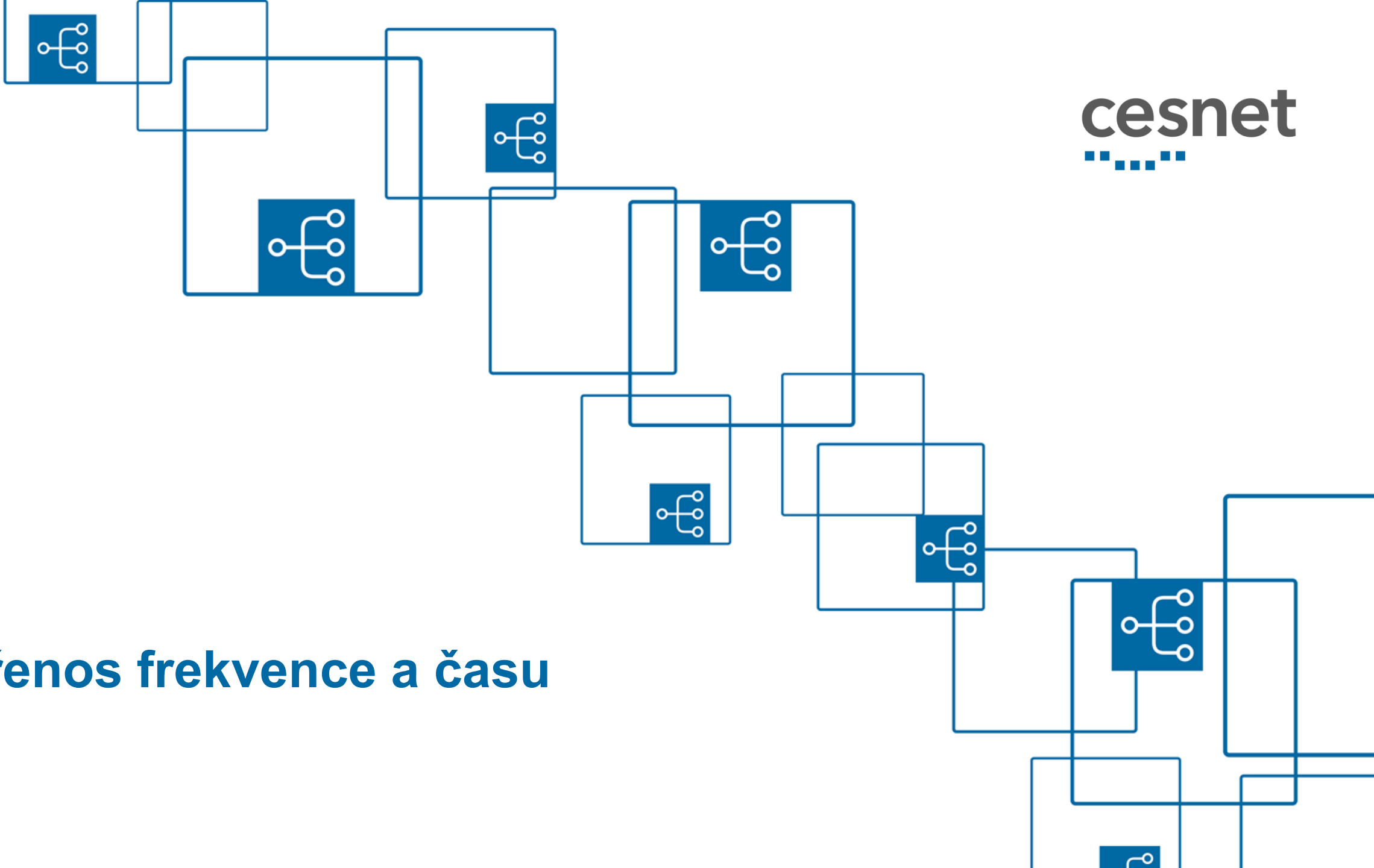
Téma hodiny: Králíky

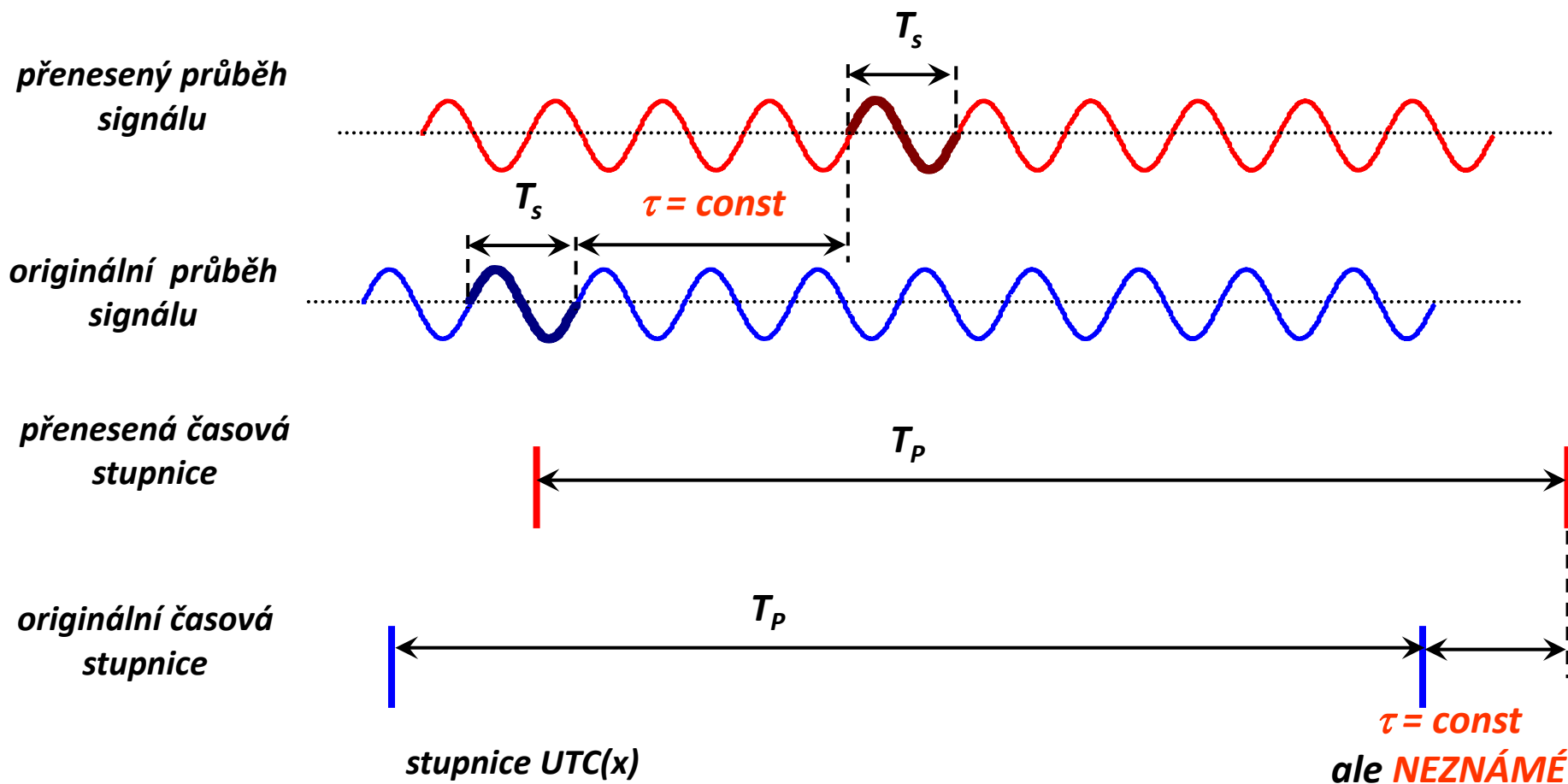
Cíl hodiny: Nakrmit je

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

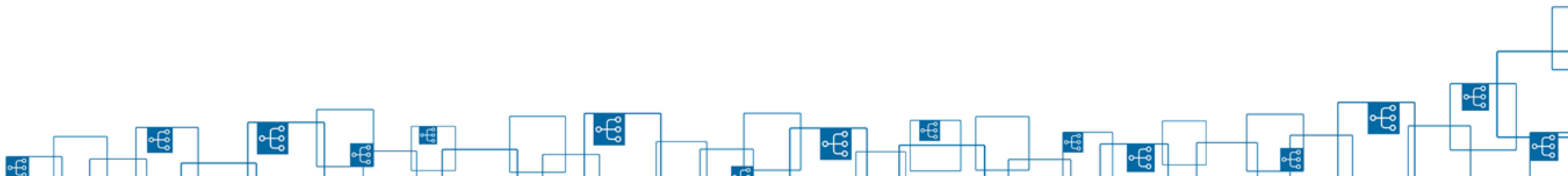


Přenos frekvence a času





- 2000 - Primární NTP servery TIK a TAK řízené přijímačem GPS
- 2010 - Adaptéry TTA pro porovnání atomových hodin po optické lince
- 2011 - Porovnávání časových stupnic UTC(TP) a UTC(BEV) mezi Prahou a Vídní
- 2014 - Koherentní přenosy ultra-stabilní frekvence (spolupráce s UPT AV ČR)
- 2026 - Služba CESTime – nová infrastruktura White Rabbit



■ NTP

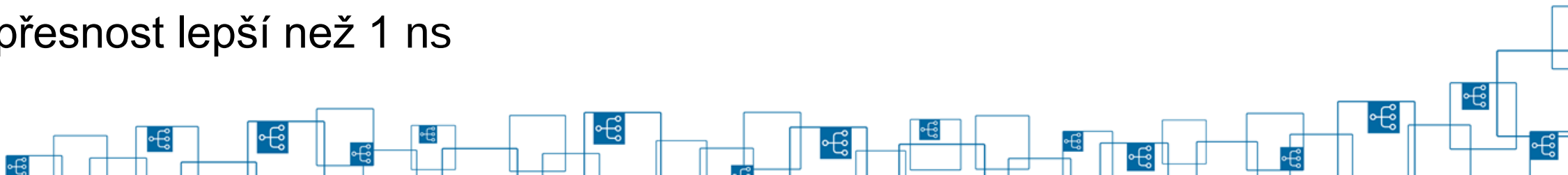
- globální Internet, UDP protokol, struktura mash
- hierarchie NTP serverů podle „vzdálenosti“ od ext. reference (Stratum)
- dosažitelná přesnost 1ms – 100 μ s

■ PTP (IEEE-1588)

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

■ WhiteRabbit

- přesnost lepší než 1 ns



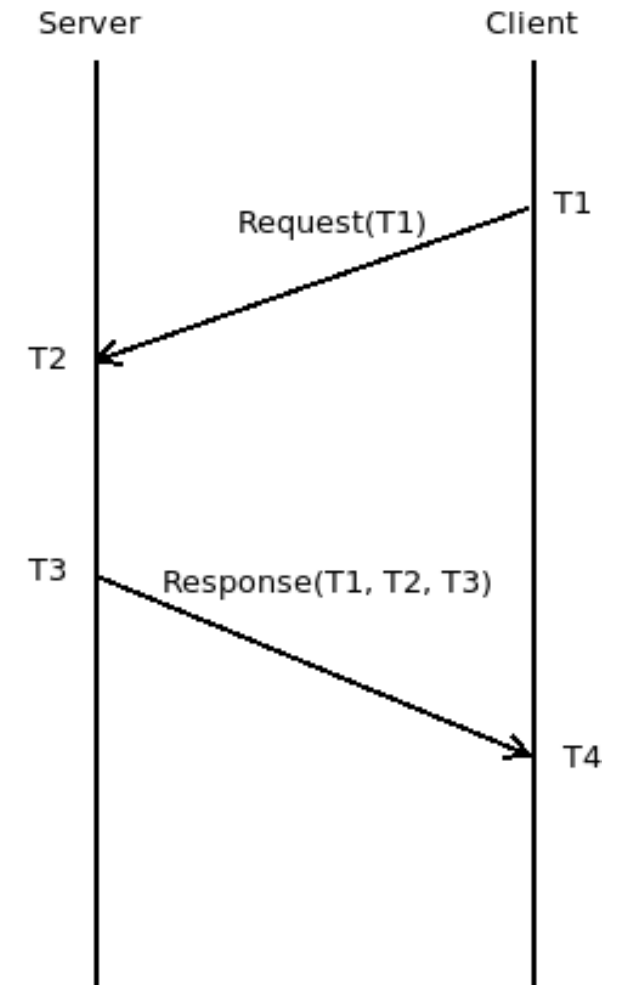
- Klient periodicky posílá požadavky Serveru a z výsledku spočítá ofset svého času.
- Nezávisle na ofsetu mezi Klientem a Serverem, celkové zpoždění δ je

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

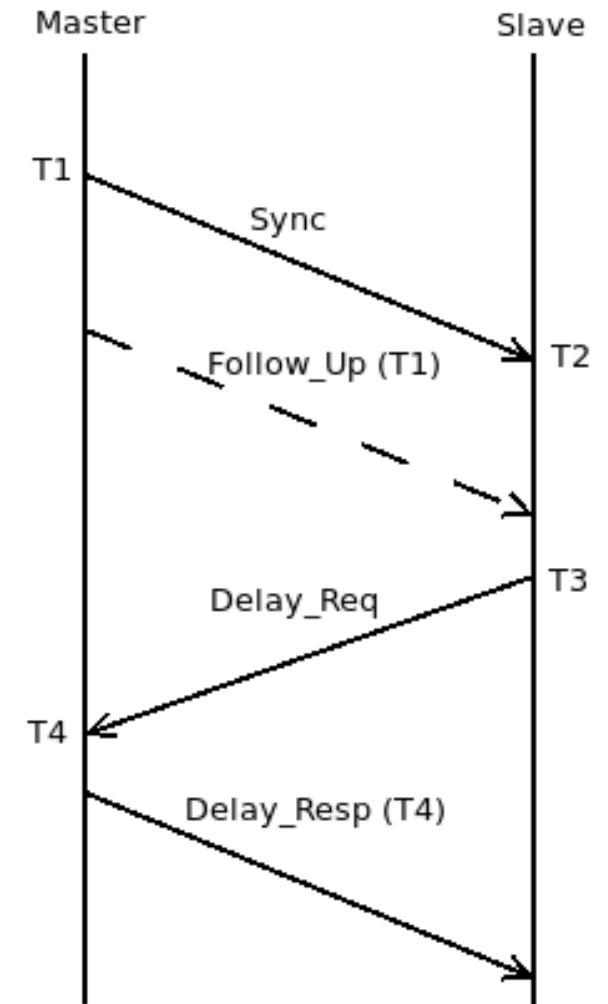
- Za předpokladu stejného jednosměrného zpoždění $\delta_{AB} = \delta_{BA}$, offset θ_0 mezi Klientem a Serverem je

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

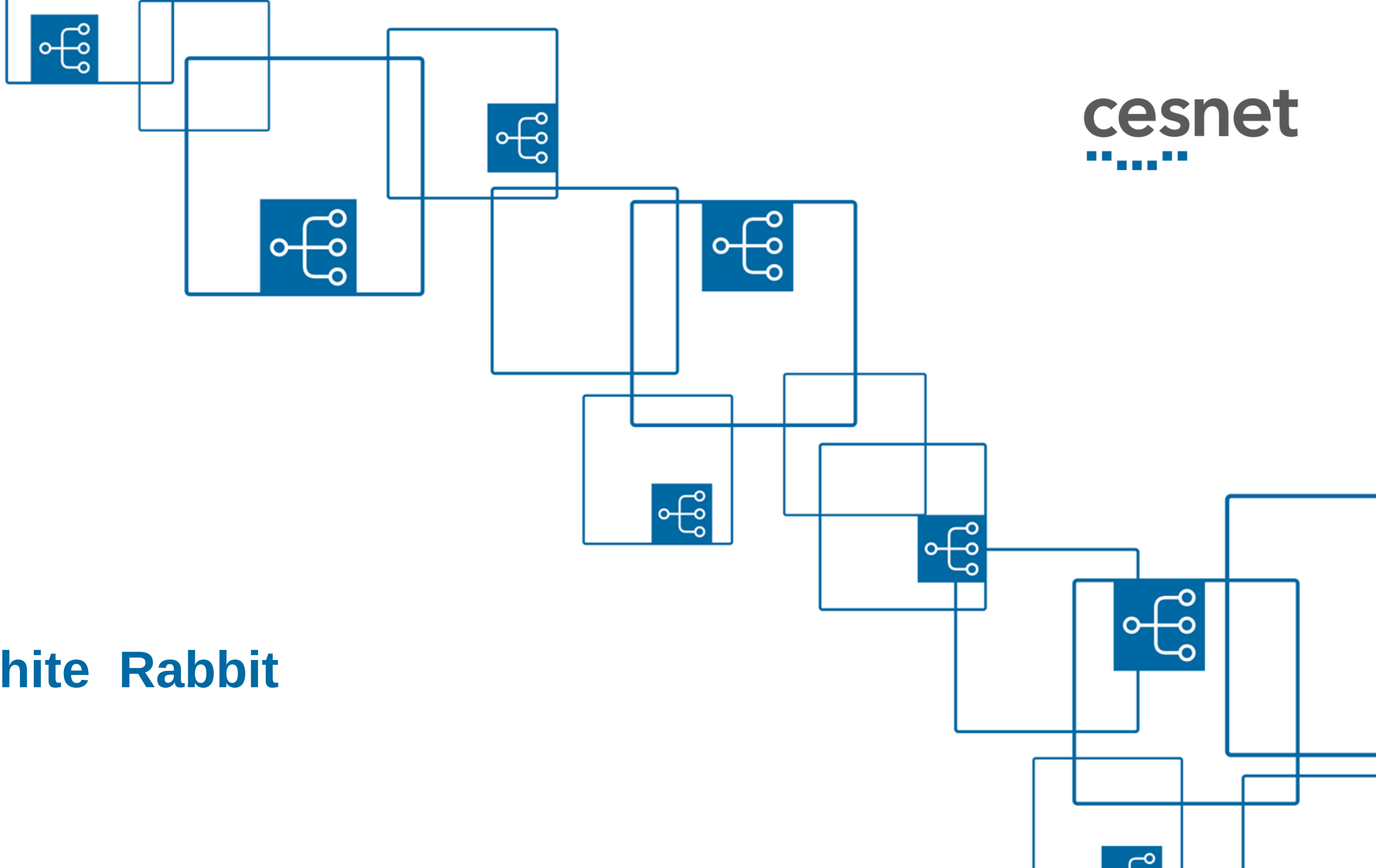
- Skutečný offset θ je vždy v intervalu $(\theta_0 - \delta/2, \theta_0 + \delta/2)$



- Master periodicky posílá zprávy **Sync** a příp. **Follow_Up**
- 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
$$\delta_{MS} = \delta / 2$$



White Rabbit



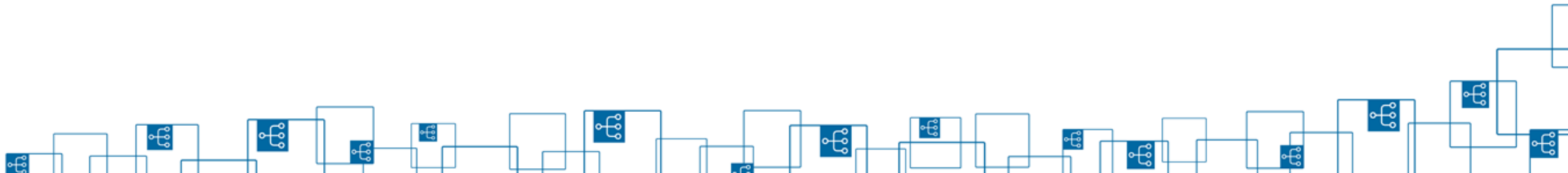
- Vyvinuto v CERNu

- potřeba synchronizace senzorů a dalších zařízení při experimentech na urychlovačích
- chyba přenosu času pod 1 nanosekundu

- CERN Open Hardware License

- zveřejněná dokumentace (schéma, FPGA kód, software, ...)
- kdokoliv může vyrábět originální nebo odvozené verze

- Několik komerčních výrobců

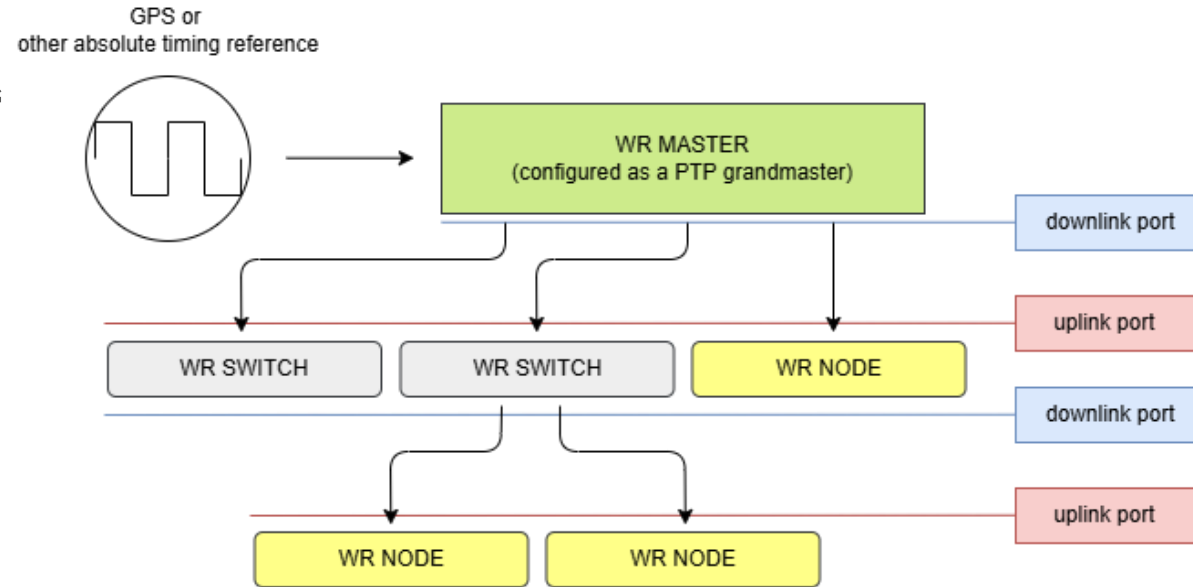


■ Stromová struktura

- pouze jeden grandmaster
 - žádný PTP „Best Master Clock Algorithm“
- ostatní zařízení v modu BC (boundary clock)

■ Grandmaster

- vstup 10 MHz
- vstup 1 PPS (Pulse per Second)
 - stačí při startu)
- NTP server – dodá label sekundy
- soubor leap-seconds.list
 - seznam přestupných sekund



- **Protokol PTP (IEEE-1588)**

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

- **Gigabitový Ethernet (1 GbE)**

- optické transceivery SFP

- **Synchronní Ethernet (SyncE)**

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

- **Obousměrný přenos pro jednom vlákně**

- vyhrazené vlákno nebo optické kanály v multiplexu

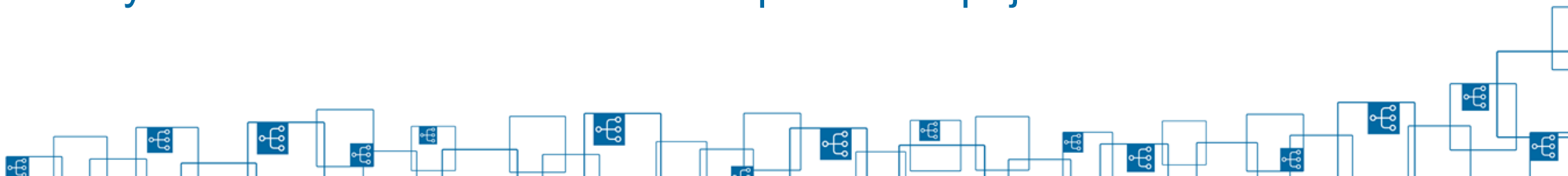


White Rabbit Switch verze 3.4

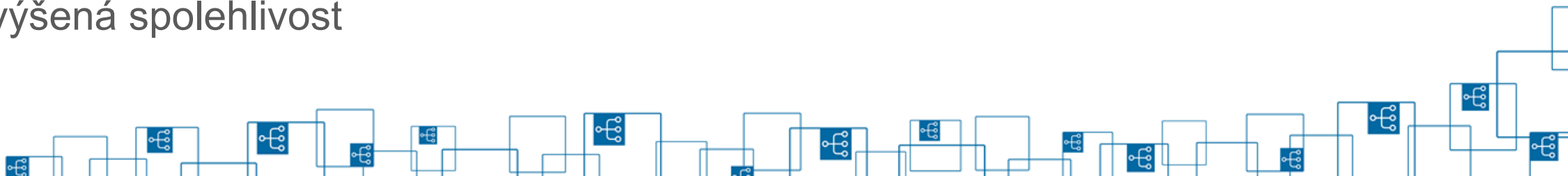
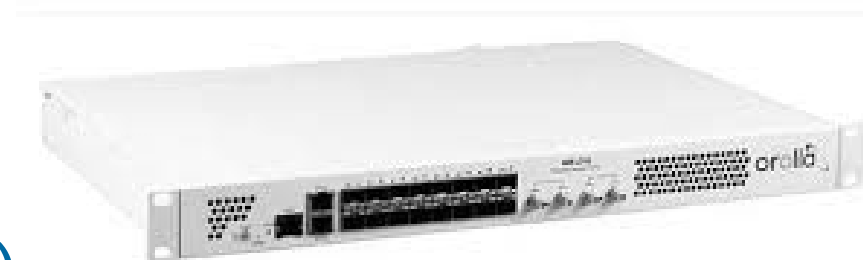
- FPGA Virtex 6
- CPU Atmel
- VCXO
- RAM + Flash
- 18x klec SFP

Aktuálním standardem je varianta Low Jitter (WRS LJ)

- kvalitní teplotně kompenzovaný oscilátor (VCTCXO)
- nová deska s PLL (AD9516)
- důsledné využívání diferenciálních cest na plošném spoji



- FPGA typu Xilinx Zynq UltraScale+ MPSoC
- SFP+ (10 GbE)
 - zpětně kompatibilní s 1 GbE
- Hold-over modul
 - udrží čas při výpadku vstupního signálu (optional)
- Přechod na industriální standard (carrier-grade)
 - duální zdroj
 - výměnné ventilátor
 - extension slot
 - zvýšená spolehlivost

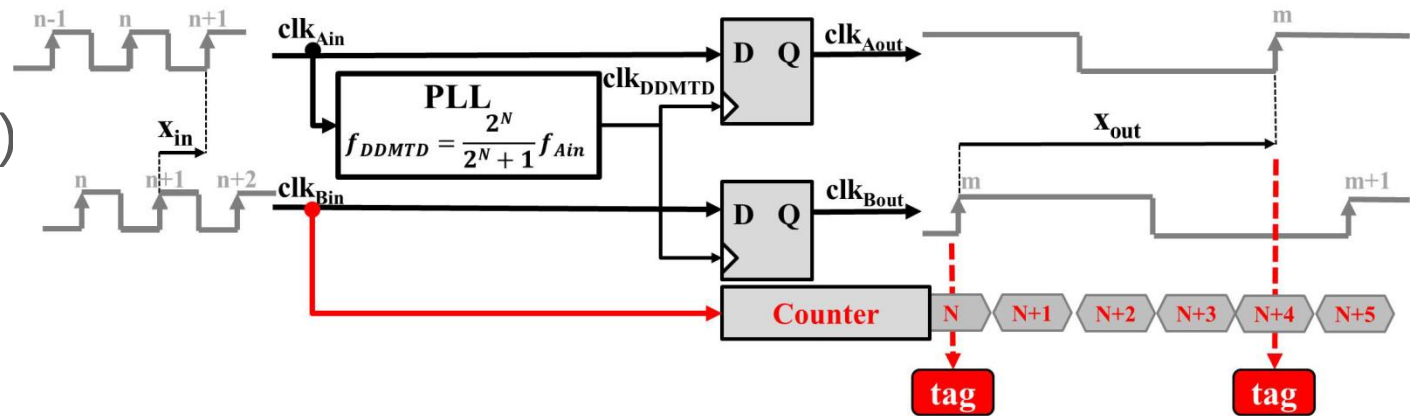


- Přesné měření fázového rozdílu v FPGA
 - Digital Dual Mixer Time Difference (DDMTD)

- 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



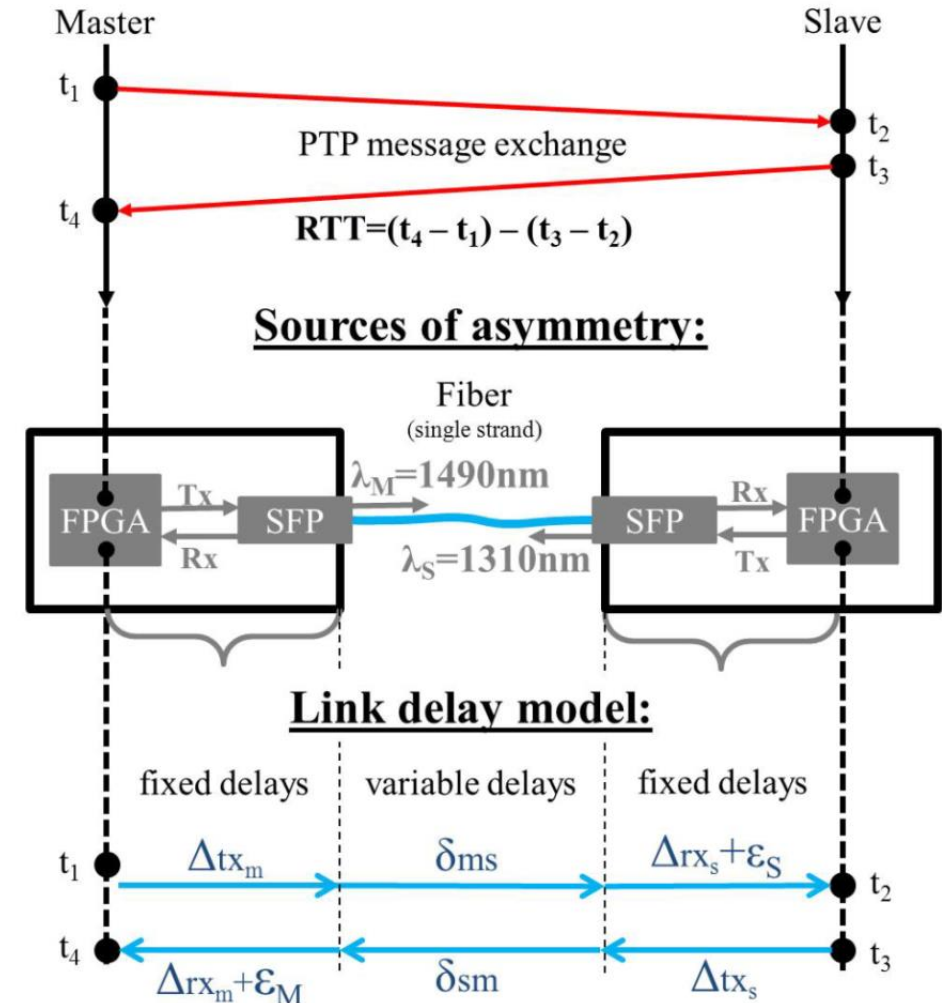
■ Konstantní zpoždění

- FPGA, SFP, ...

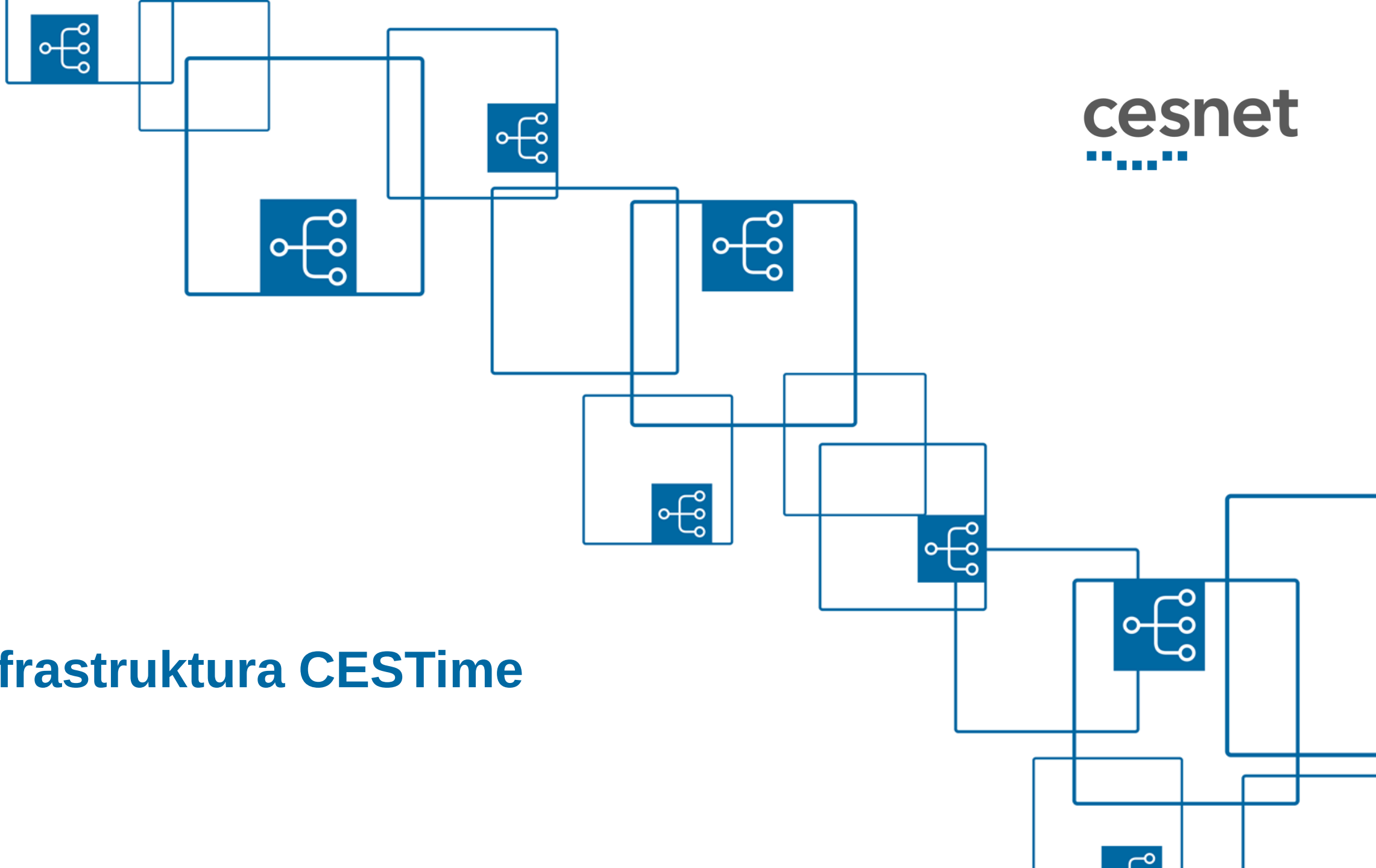
■ Proměnné zpoždění ve vlákně

- typická hodnota disperse 17 ps/nm/km
-> 1.4 ns / 100 km pro sousední kanály
- chromatická disperze vyjádřena v koef. α

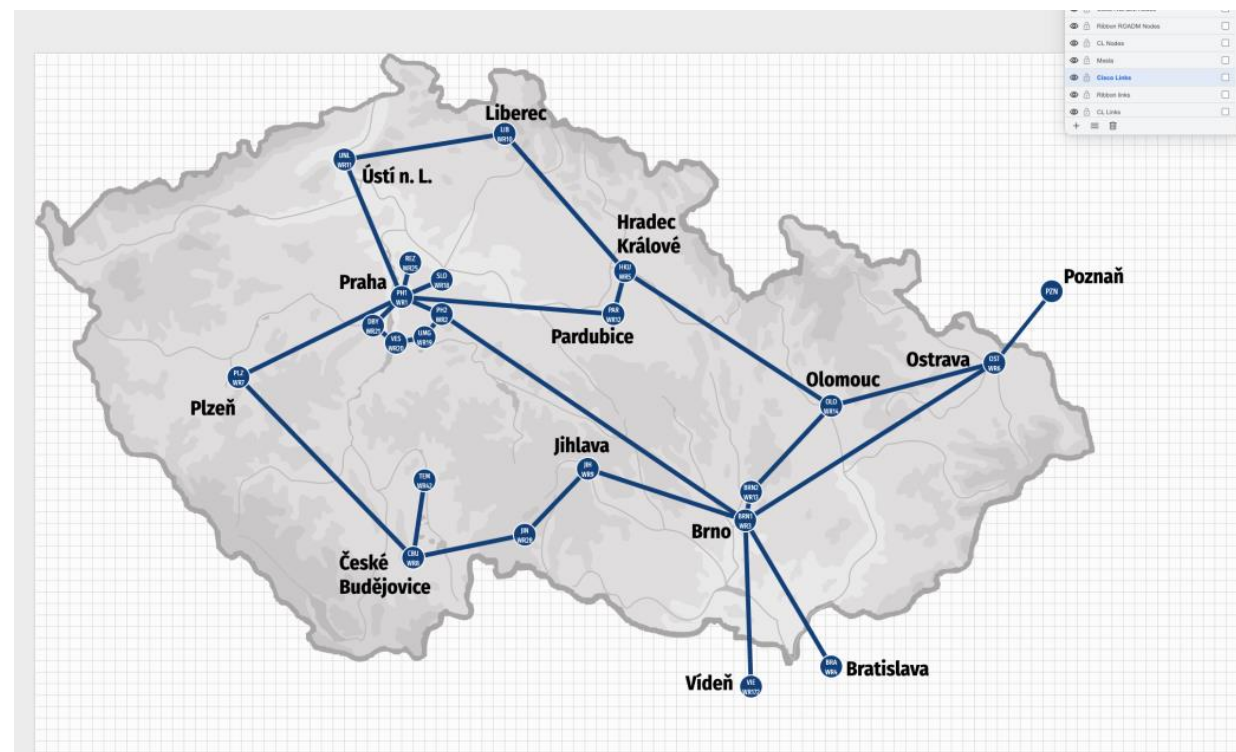
$$\alpha = \frac{v(\lambda_s)}{v(\lambda_m)} - 1 = \frac{\delta_{ms} - \delta_{sm}}{\delta_{sm}}$$



Infrastruktura CESTime



- Služba distribuce přesného času a stabilní frekvence
 - testovací provoz od 10/2026
- Technologie White Rabbit
- Vlastní atomové hodiny navázané na Státní etalon času a frekvence
- Využity optické linky sítě CESNET
 - ostatní komponenty vyhrazené pro infrastrukturu CESTime
- Integrace služby do dohledového centra



Celá infrastruktura v šesti číslech:

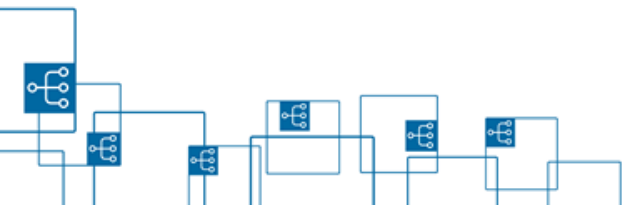
- 20+ uzlů
- 26 optických linek
- 4 okruhy pro redundanci
- 3785 km vláken
- 2 atomové hodiny
- projektovaná přesnost 5 ns



Cs clock 5071A



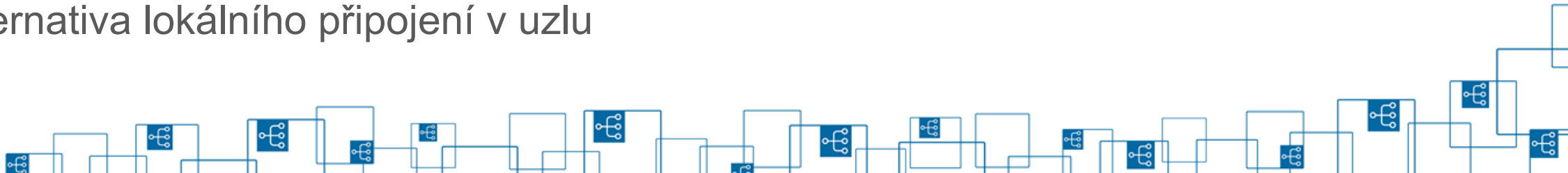
H-maser VCH-1003M



- **Optické vlákno nebo kanály v DWDM multiplexu**
 - protokoly White Rabbit a PTP (IEEE-1588)
 - pro White Rabbit nutnost vlastního zařízení
- **Standardní optické připojení (Ethernet)**
 - pouze protokol PTP
- **Metalické připojení (Ethernet)**
 - pouze PTP a jen lokálně v uzlu
- **Koaxiální kabely**
 - sekundové pulsy (1 PPS) a/nebo frekvence 10 MHz
 - alternativa lokálního připojení v uzlu



WR-Z16



CESNET se v roce 2026 stal členem White Rabbit collaboration



joins the collaboration!

CESNET delivers advanced ICT services for science, research and education in the Czech Republic. With extensive experience in White Rabbit they have deployed a WR network across part of their nationwide infrastructure and are actively involved in exploring how to best use and deploy WR. They participate, for example, in [GÉANT's Long-Haul White Rabbit Time Distribution Incubator Project](#), which explores how precise time transfer can operate over DWDM infrastructure at a continental scale. Find out more on their [website](#).

A map of the Czech Republic showing the locations of various research and educational institutions connected by a network of time transfers. The map includes labels for Prague 6, Ostrava, T FEE (FEL), Institute of Photonics and Electronics, CESNET Zlín, CMI, Praha / Prague, Geophysical Observatory, Dolní Břežany, EL, Olomouc, Jihlava, Brno, Institute of Scientific Instruments, PSNC, Cieszyn, TUO, Ostrava, Ceské Budejovice, Brno, Vienna, BEV, and SANET. The map also shows the location of Cesnet in Prague. A legend indicates that orange lines represent TTA transfers and blue lines represent WR transfers. A scale bar at the bottom right shows distances in kilometers (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100).

Image from: https://indico.cern.ch/event/1524513/contributions/6556210/attachments/3093293/5479269/LongHaul%20_WR_Vojtech_s.pdf

Děkuji za pozornost

Dotazy?

vs@cesnet.cz

vladimir@smotlacha.cz

