

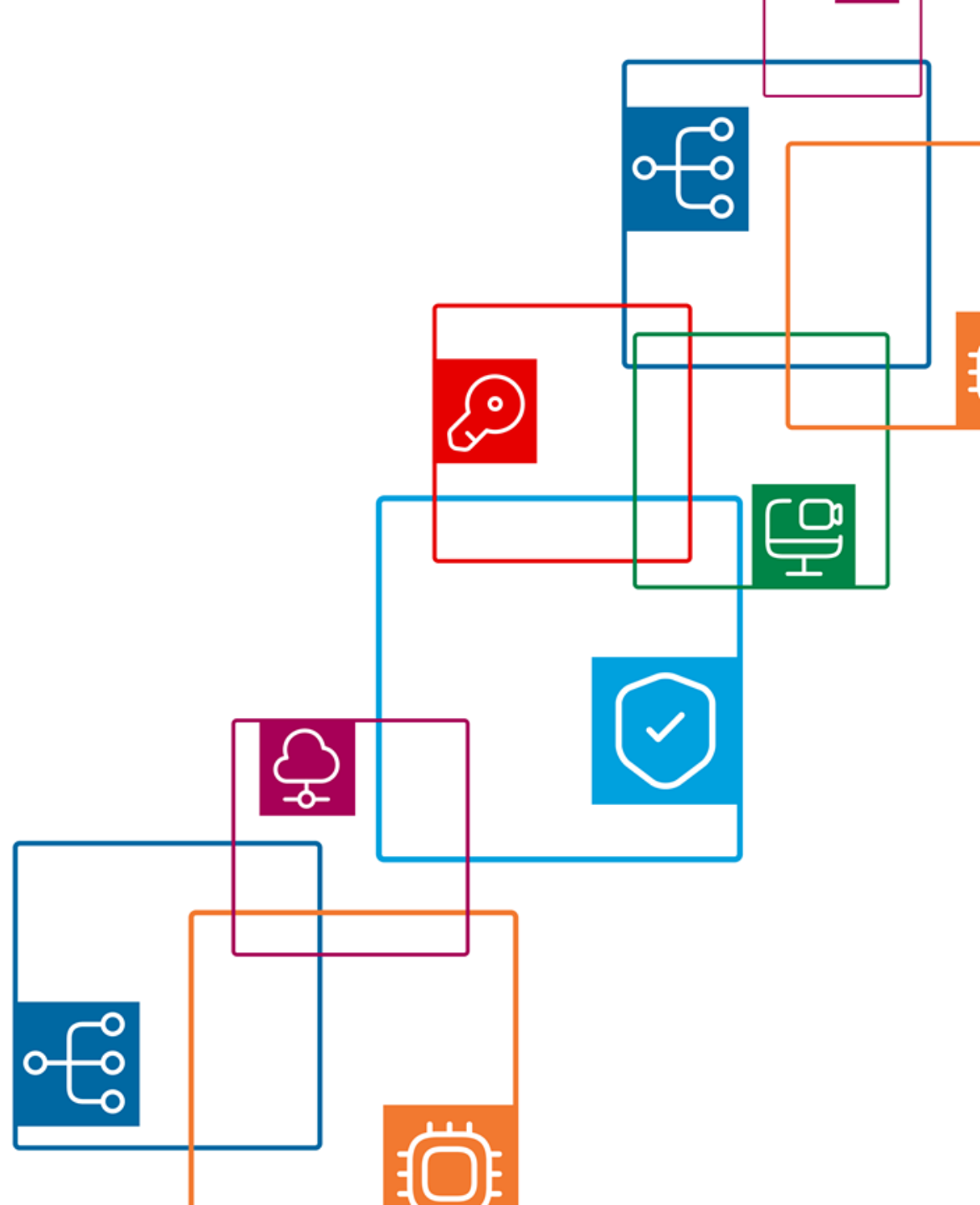


White Rabbit

Vladimír Smotlacha

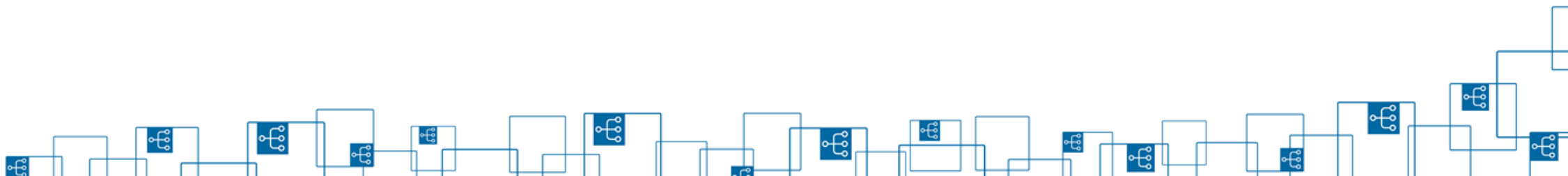
Konference e-infrastruktury CESNET

Praha 1.10.2026

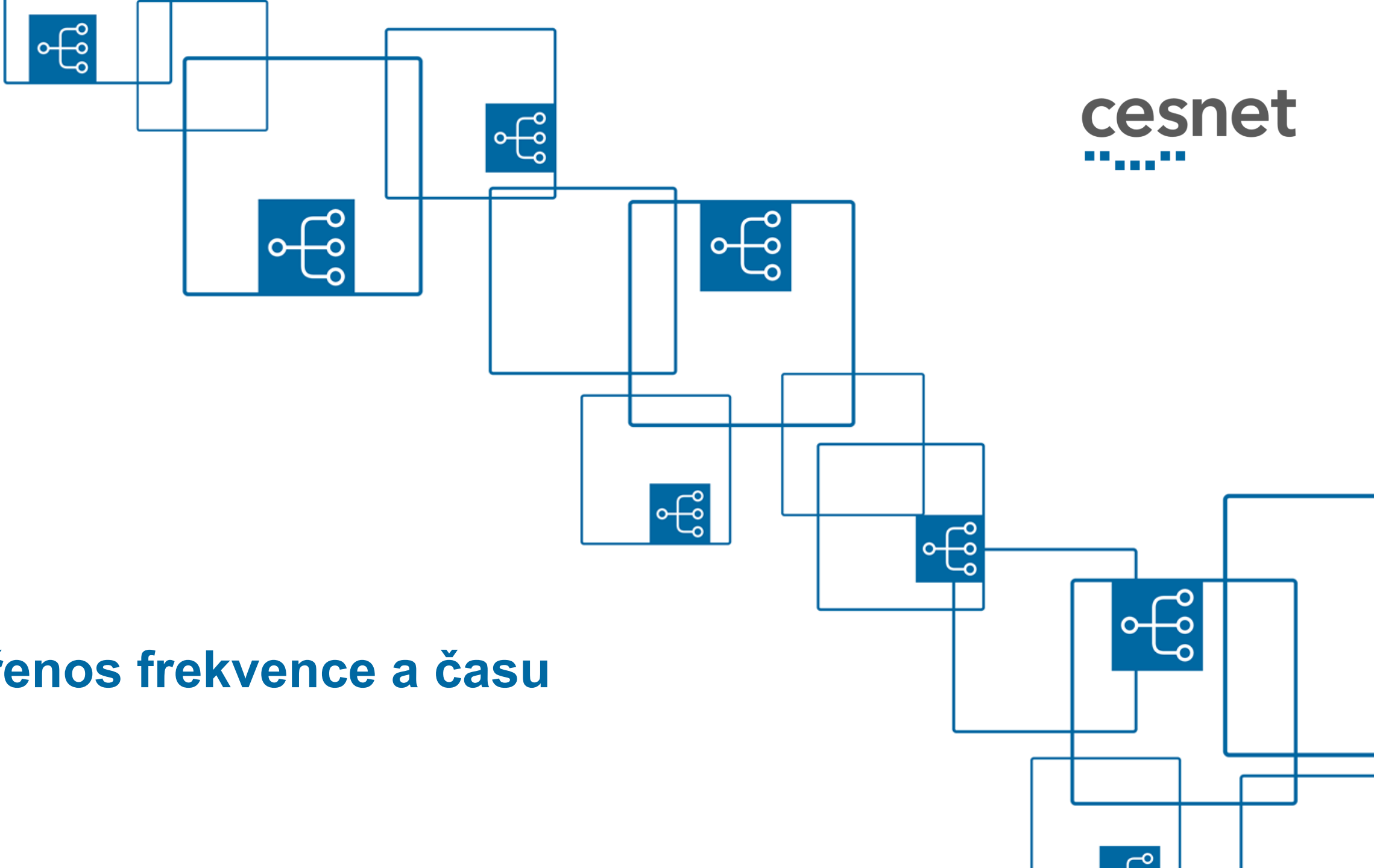


Téma hodiny: Králíky. Cíl hodiny: Nakrmit je.

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



Přenos frekvence a času



Frekvence – přirozená veličina

- periodicky se opakující děje v přírodě
 - mikrosvět i makrosvět

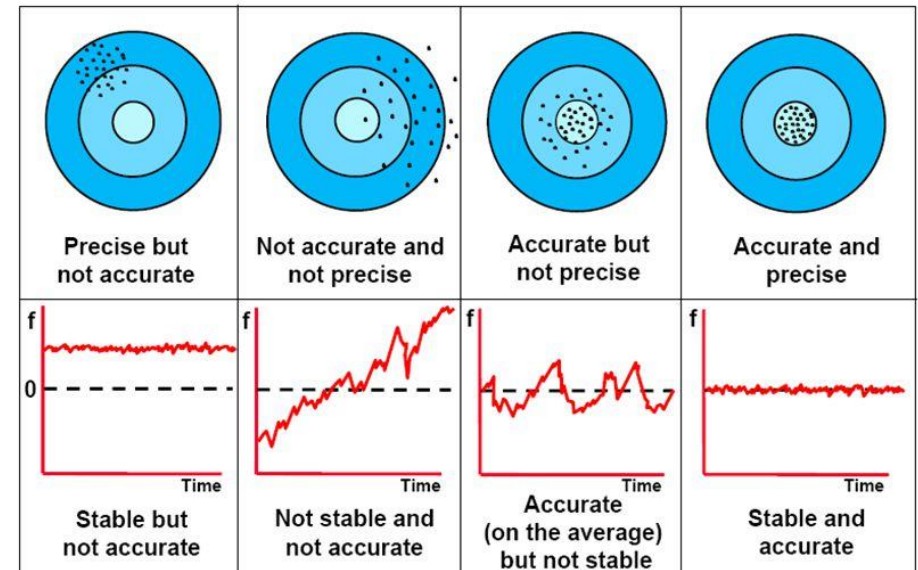
Čas – určen konvencí

- integrál frekvence
- nutnost zvolit počáteční bod – **Čas 0 (T_0)**

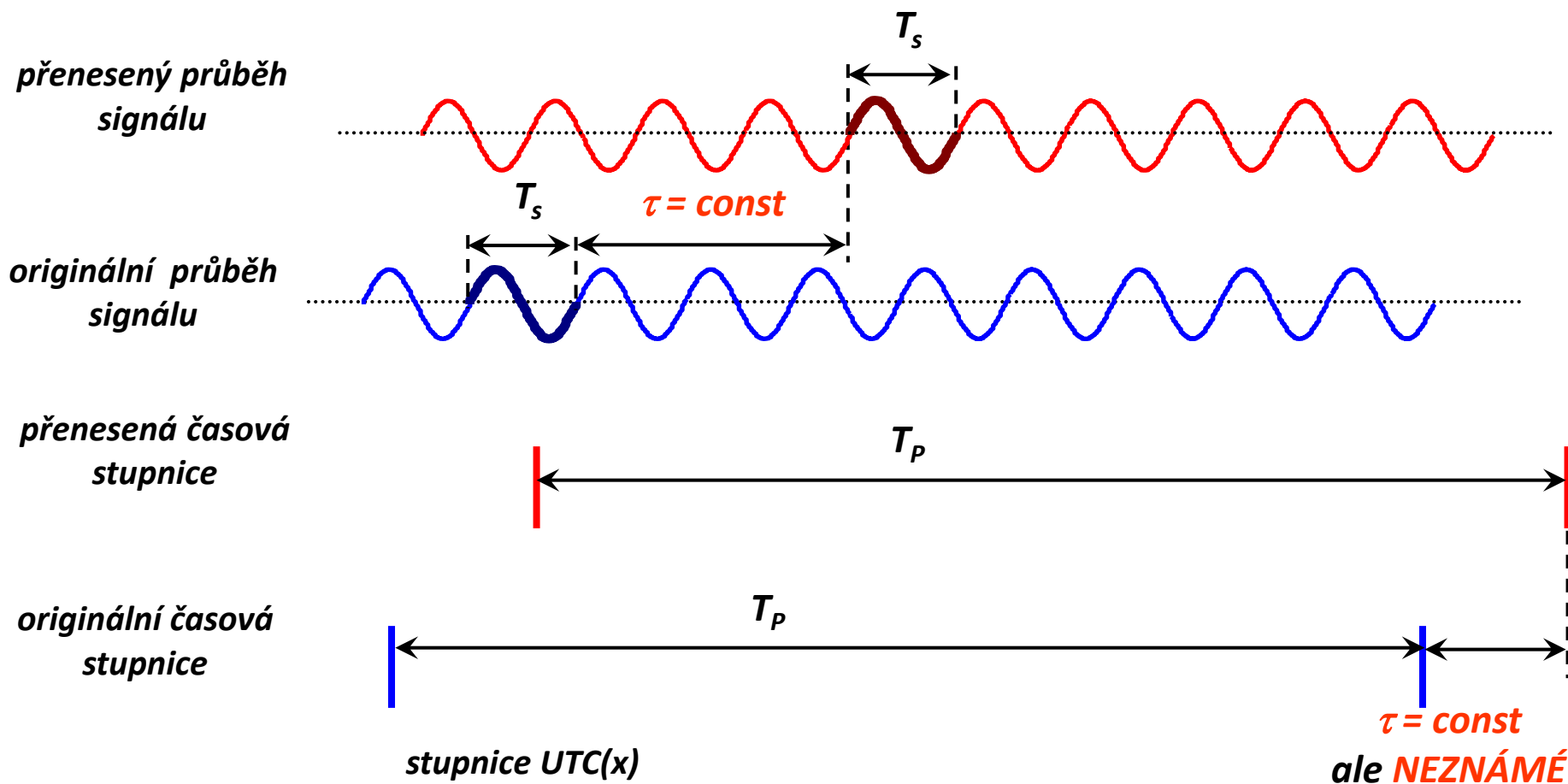
Hodiny

- zařízení, které integruje frekvenci a tak poskytuje čas

What is Frequency Stability & Accuracy



Courtesy John Vig



■ NTP

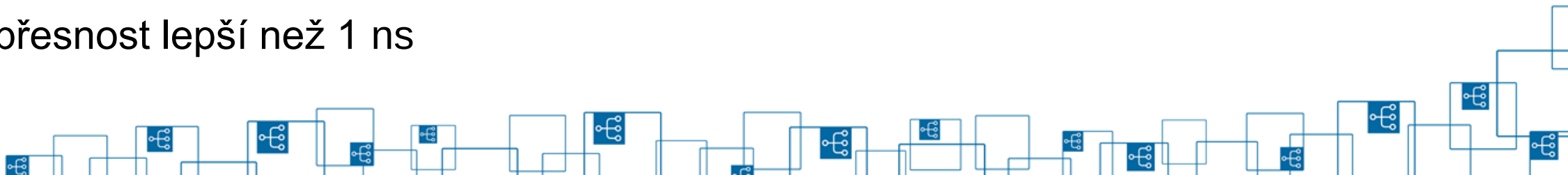
- globální Internet, UDP protokol, topologie mash
- hierarchie NTP serverů podle „vzdálenosti“ od ext. reference (Stratum)
- dosažitelná přesnost 1ms – 100 μ s

■ 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 trochu lepší než NTP

■ WhiteRabbit

- přesnost lepší než 1 ns



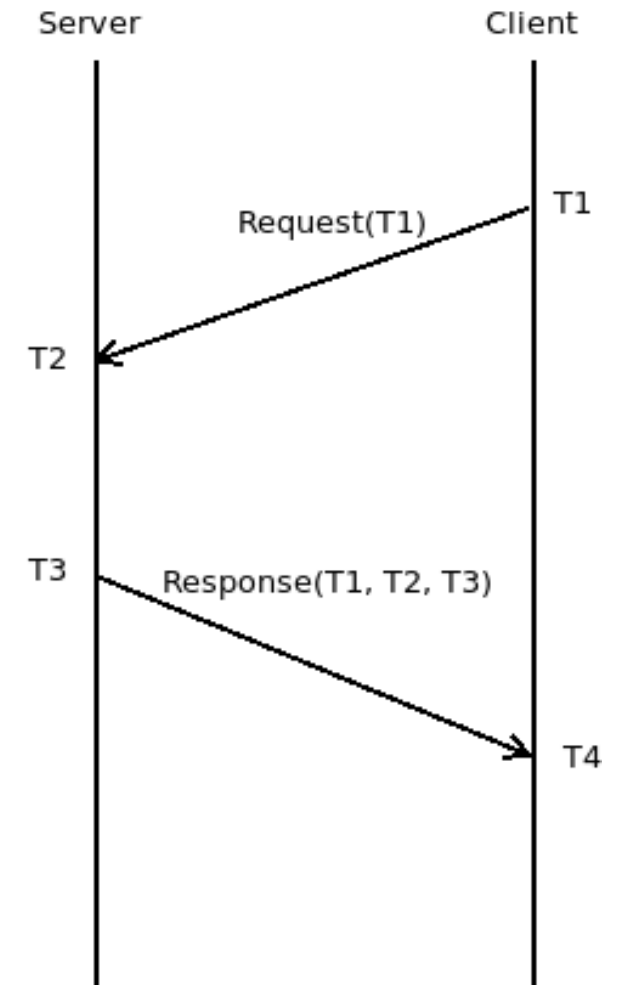
- Klient periodicky posílá požadavky Serveru a z výsledku spočítá ofset svého času.
- Nezávisle na ofsetu mezi Klientem a Serverem, celkové zpoždění δ je

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

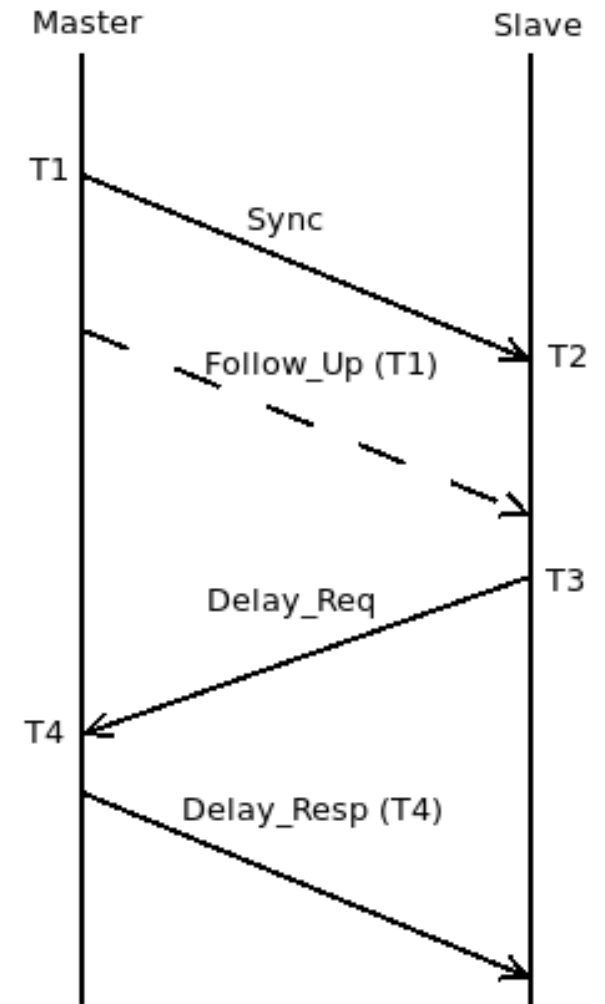
- Za předpokladu stejného jednosměrného zpoždění $\delta_{AB} = \delta_{BA}$, offset θ_0 mezi Klientem a Serverem je

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

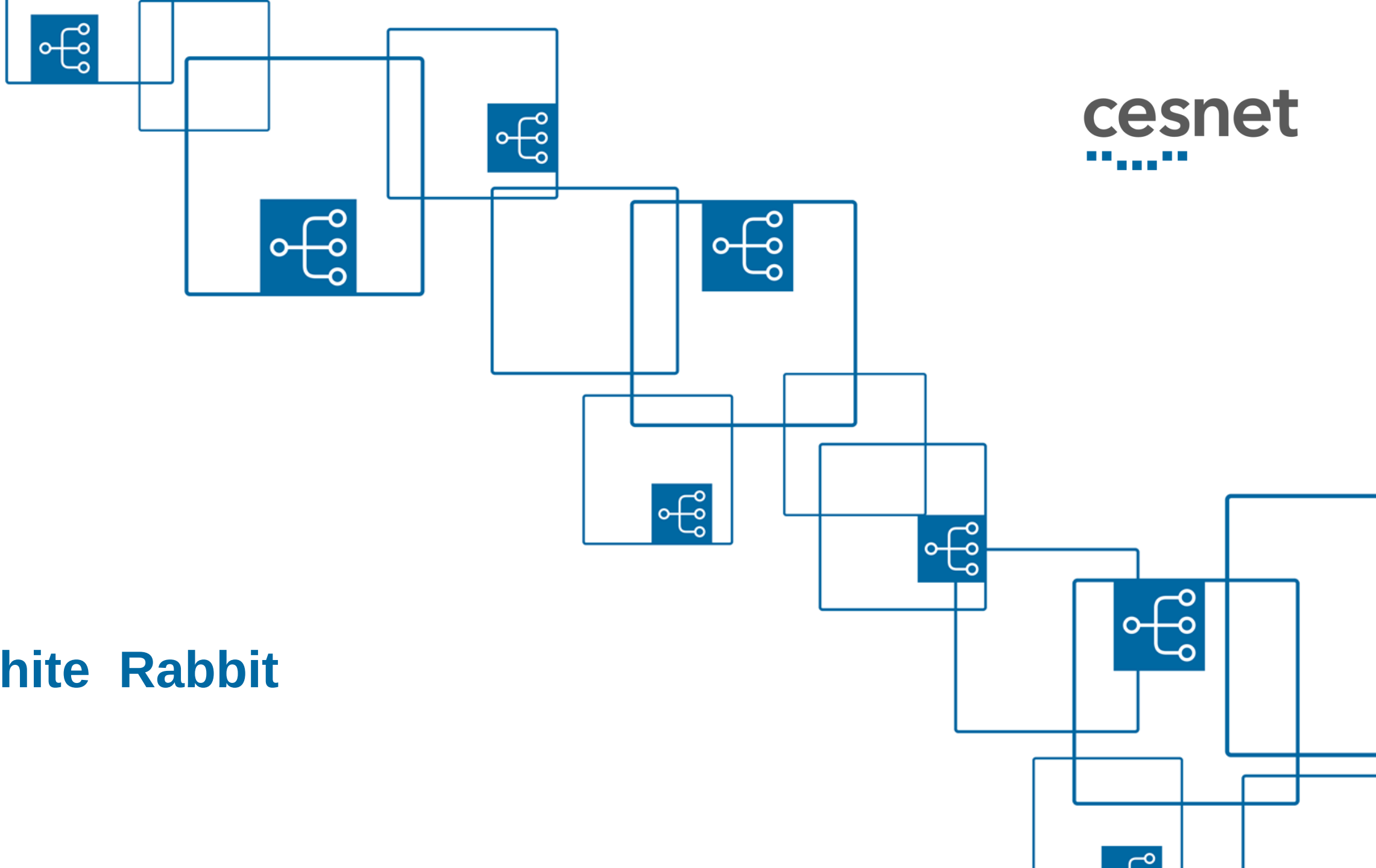
- Skutečný offset θ je vždy v intervalu $(\theta_0 - \delta/2, \theta_0 + \delta/2)$



- Master periodicky posílá zprávy **Sync**
- 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



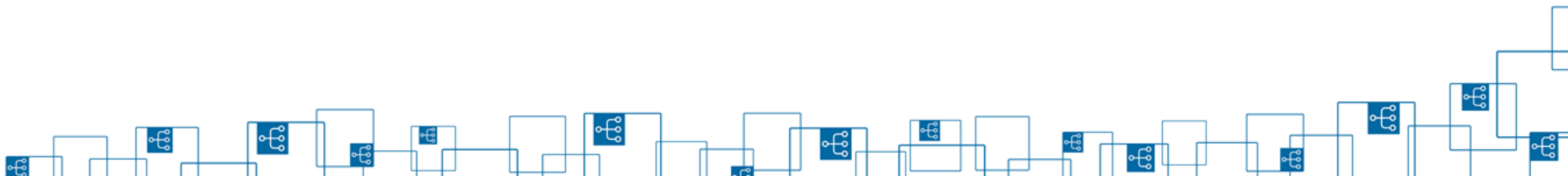
- Vyvinuto v CERNu

- 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



- **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



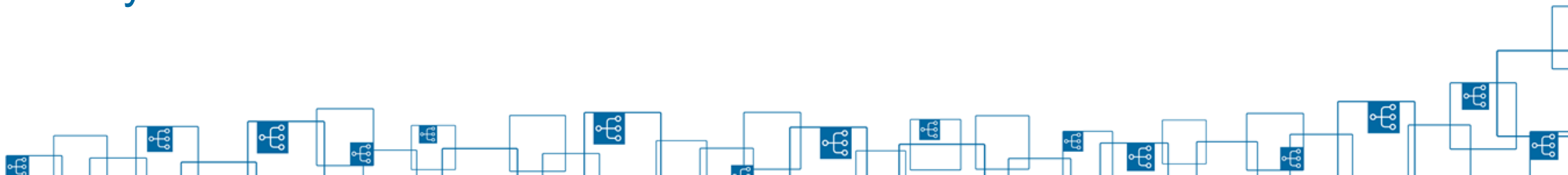
White Rabbit Switch verze 3.4

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

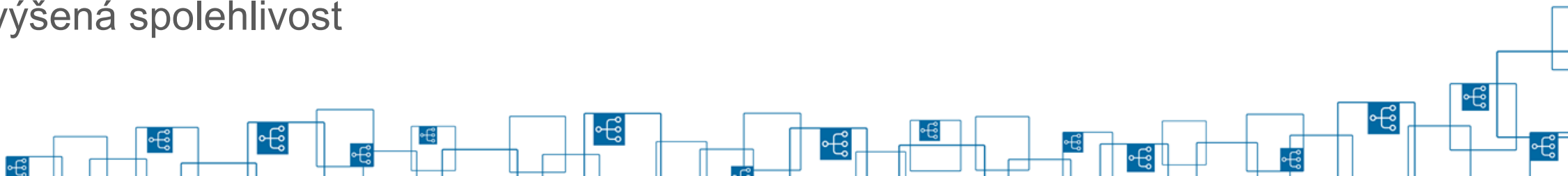


Aktuálním standardem je varianta Low Jitter (WRS LJ)

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



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



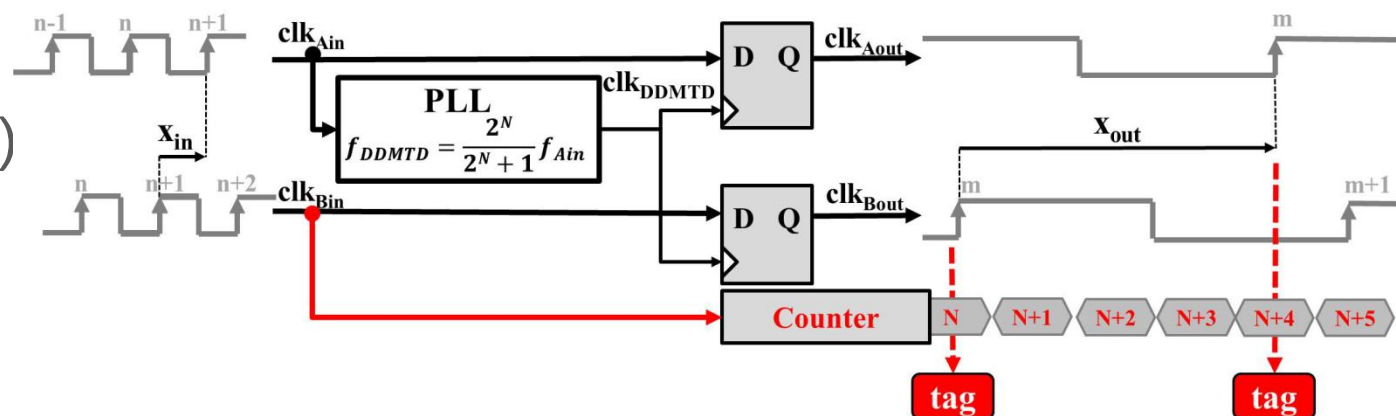
- Přesné měření fázového rozdílu v FPGA

- 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



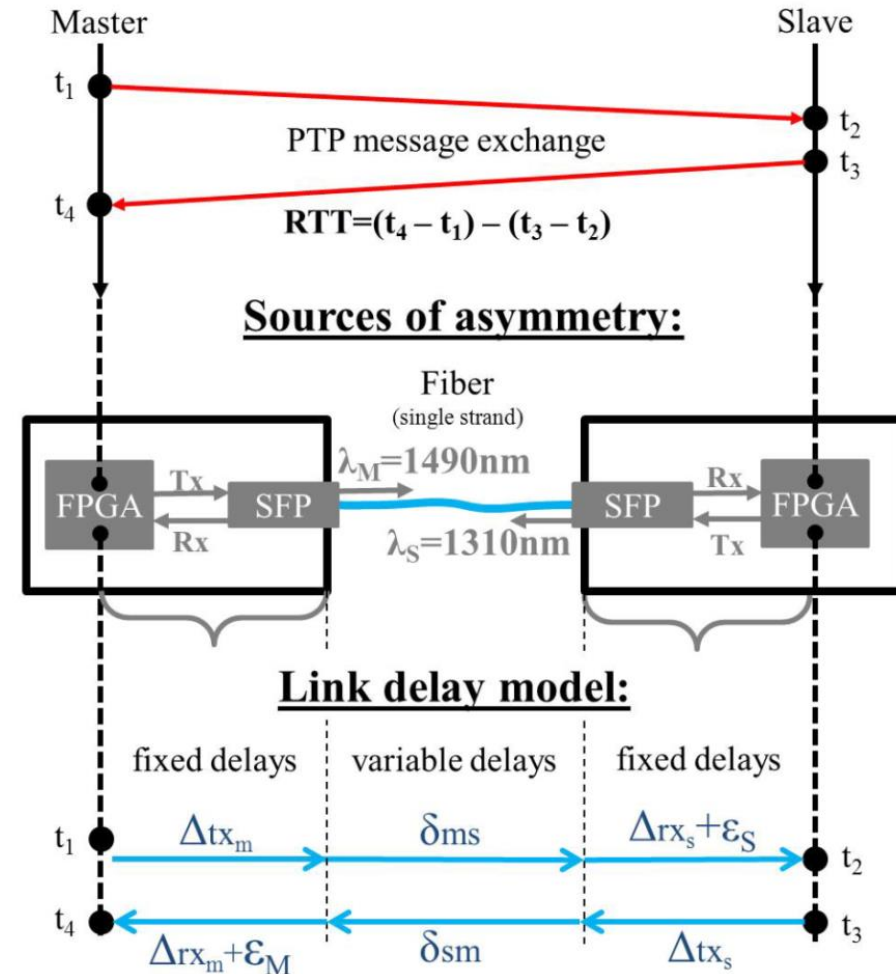
■ Konstantní zpoždění

- FPGA, SFP, ...

■ Proměnné zpoždění ve vlákně

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

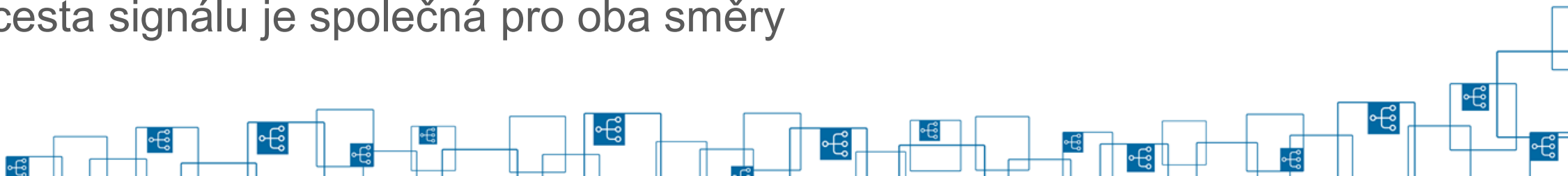
$$\alpha = \frac{v(\lambda_s)}{v(\lambda_m)} - 1 = \frac{\delta_{ms} - \delta_{sm}}{\delta_{sm}}$$



Kalibrace systému White Rabbit

Pro dosažení optimálních parametrů musí být všechny části infrastruktury kalibrovány

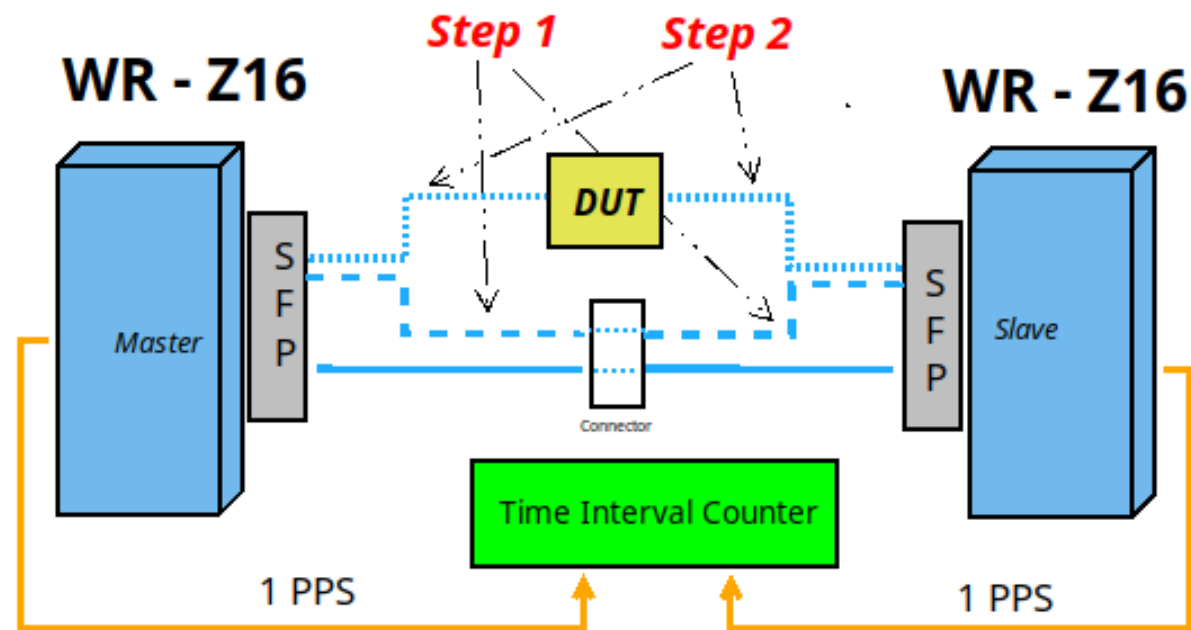
- alternativně je možné ověřit, že kalibrace není nutná
- **Porty WR switche**
 - údaje o zpoždění Tx i Rx dodává výrobce pak každou verzi FW
- **Transceivery SFP**
 - nutno zvolit referenční kus a ostatní s ním porovnat a změřené rozdíly zaznamenat jako kalibrační hodnotu
- **Optické zesilovače**
 - cesta signálu je společná pro oba směry



Změření zpoždění a porovnání s referenčním vzorkem

- rozdíl hodnoty čítače udává dvojnásobek rozdílu mezi DUT a referenčním vzorkem
- využito pro filtry

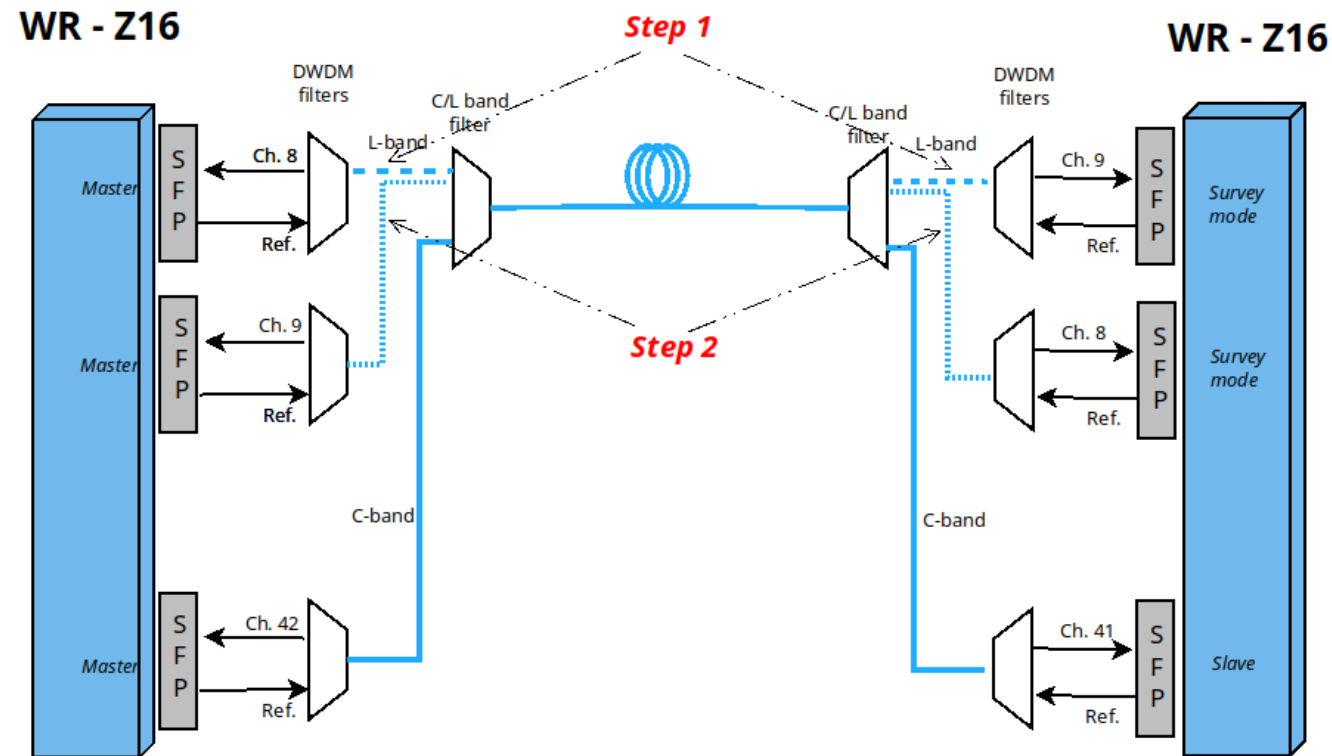
$$offset = 2 * (\Delta - \Delta_0)$$



Metoda kalibrace bez čítače:

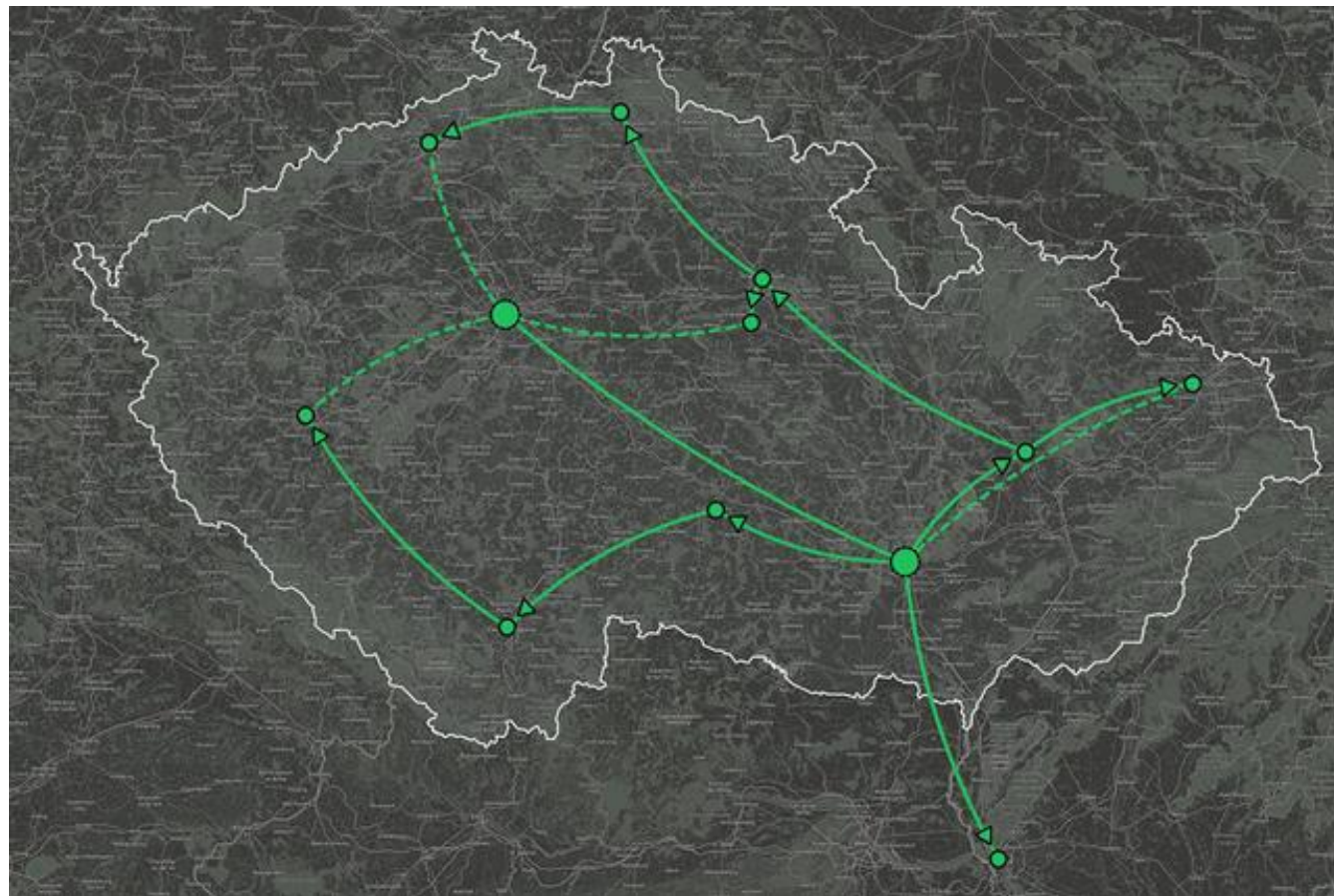
- slave WR použije pomocný kanál
- krok 1: přenos na kanále 9
 - změření Δ_1 pomocí módu Survey
- krok 2: přenos na kanále 8
 - změření Δ_2 pomocí módu Survey

$$\alpha = \frac{2 * (\Delta_2 - \Delta_1)}{(RTT + \Delta_2 - \Delta_1)}$$



Redundantní linky uzavírají okruh

- lze porovnat s grandmasterem
- využití módu Survey
- průběžné měření offsetu
- hodnoty v rozmezí 300 – 900 ps



Děkuji za pozornost

