



ALTERNATIVA KE GNSS ČASOVÁNÍ V SÍTI CESNET V DOHLEDU

Josef Vojtěch, Ondřej Havliš
Oddělení Optických sítí, CESNET

Sítě FTTx v roce 2025, 14. 3. 2025

Brno

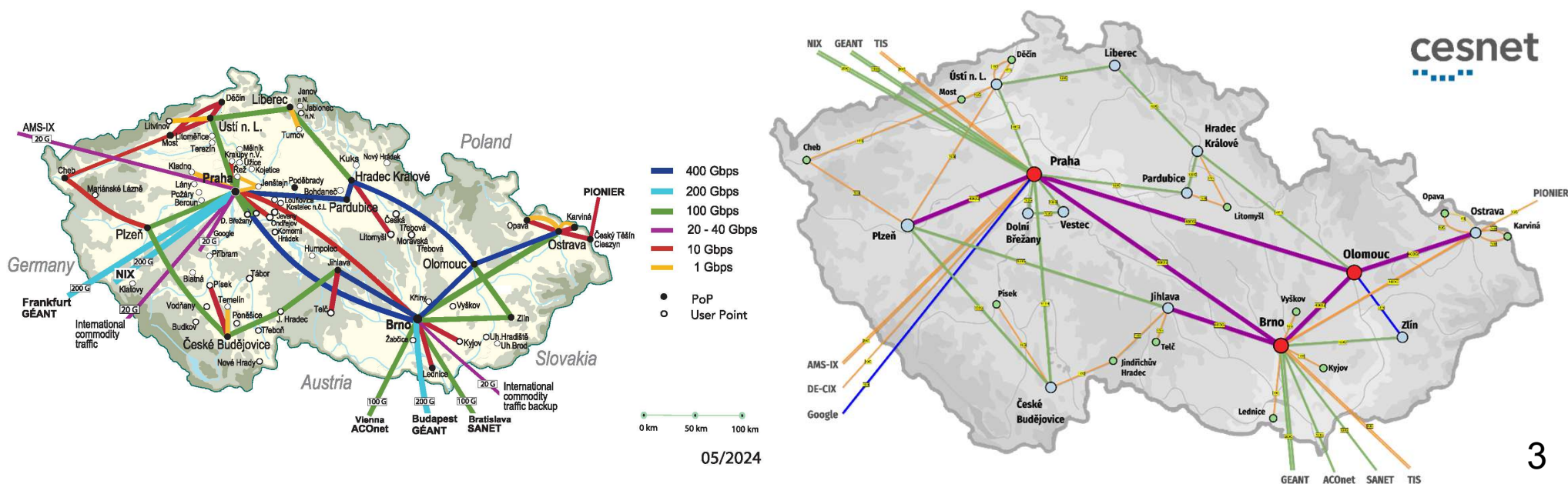


- **CESNET, síť CESNET3**
- **Přesný čas a frekvence**
- **Optická infrastruktura pro přenos času a frekvence**

Založen 1996 jako zájmové sdružení právnických osob

Členové: veřejné a státní vysoké (26) školy, akademie věd

Přidružení členové: Národní muzeum, Moravská galerie v Brně, Extreme Light Infrastructure ERIC



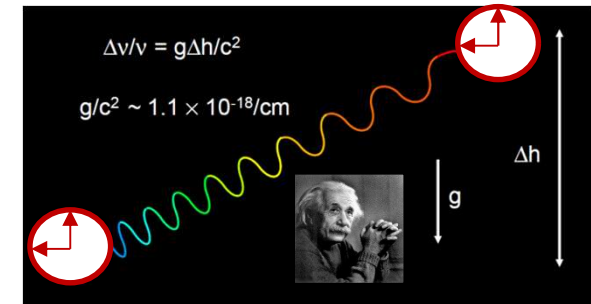
The logo for cesnet, featuring the word "cesnet" in a white, lowercase, sans-serif font. Below the text is a graphic element consisting of a series of white dots of varying sizes arranged in a pattern that suggests a signal or data flow.

cesnet
"...."

PŘENOS ČASU A FREKVENCE



- Čas a frekvence – veličiny které umíme měřit nejpřesněji
- Umožní měřit i velmi „jemné“ efekty
- Testy základních zákonů a hypotéz
- Fyzika, (radio)astronomie, geologie, seismologie, monitorování zásob vody, ropy, kovů..



Precise tests of fundamental physics

Gravitational red shift

by Wikipedia

„Constancy“ of fundamental constants

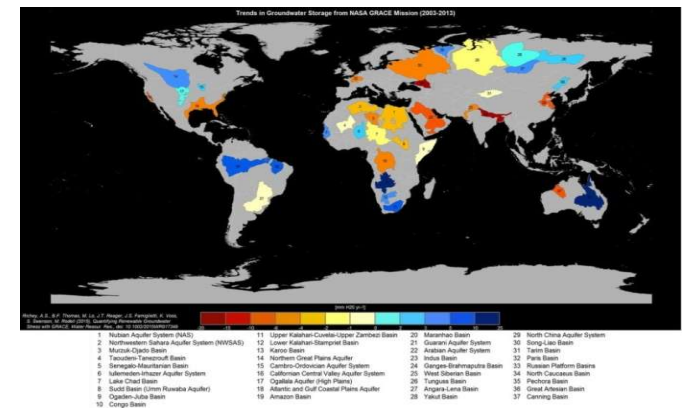
rel. change of α [10^{-15} year]

rel. change of Ry [10^{-15} year]

Peik et al., PRL, 2004, 93/17

Gravitational wave detection

by NASA



Kde jsou přesný čas a stabilní frekvence potřebné?



Telecommunication (ICT)



Data centers



Finance



Transport



Navigation



Power grids



Defence



■ Metalické, optické vedení

- telegraf 1865, dnes koaxiální kabely nebo vlákna, na krátkou vzdálenost

■ Radiové systémy

- DCF (77.5 kHz) – od 1959, AM, šum v řádu milisekund

■ Satelitní navigační systémy (GPS, Galileo, GLONASS, Beidou)

- běžné přijímače – šum v řádu desítek nanosekund
- metoda Common View – porovnání hodin, shodný vliv atmosféry v geograficky blízkých lokalitách, absolutní přesnost cca 1 ns (např. GTR50)

■ Obousměrný satelitní přenos (TWSTFT)

- předpoklad stejné doby šíření v obou směrech

■ Internet

■ Obousměrný přenos optickou linkou



GNSS (GPS, Galileo, Glonass, Beidou)

■ Běžný přijímač s výstupem 1 PPS

- chyba 50 ns – 1 μ s

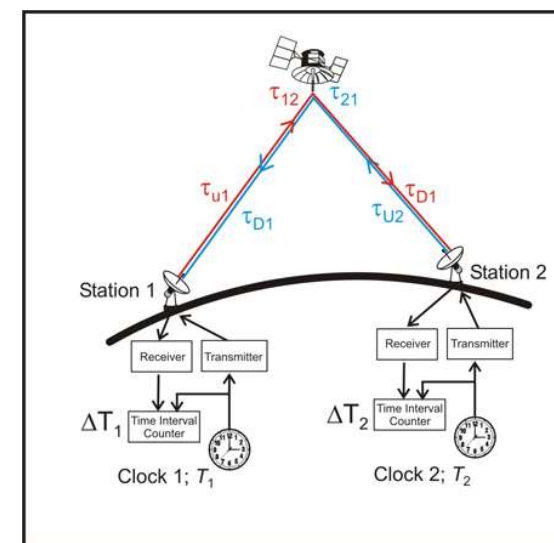
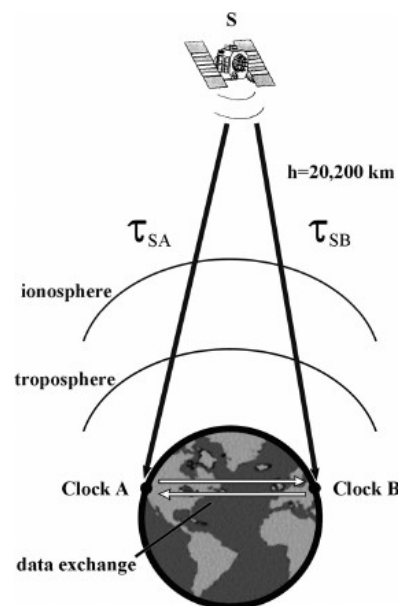
■ Metoda Common-View (CV)

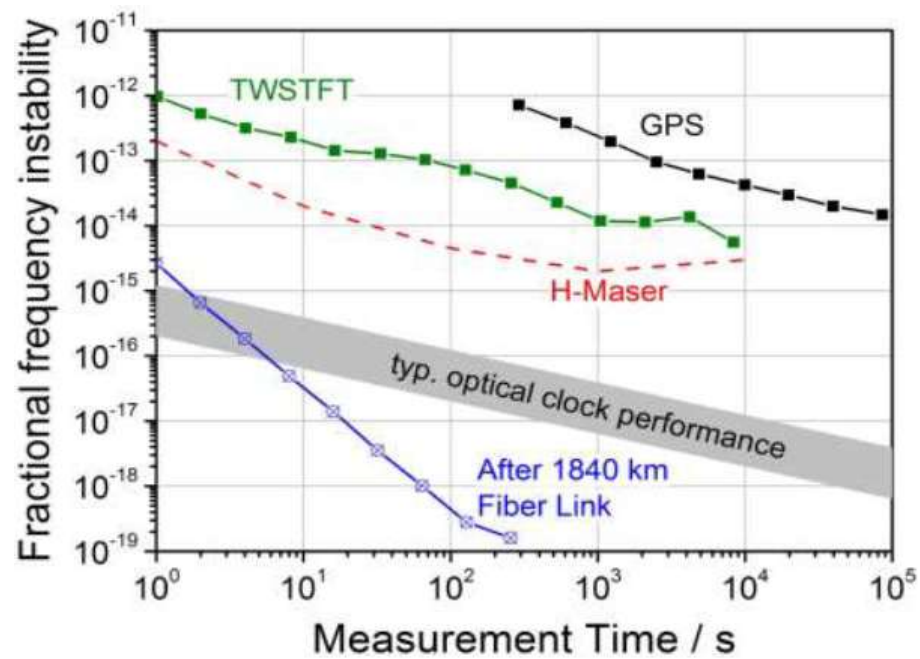
- chyba < 10ns

Geostacionární satelity (2 x 36000 km)

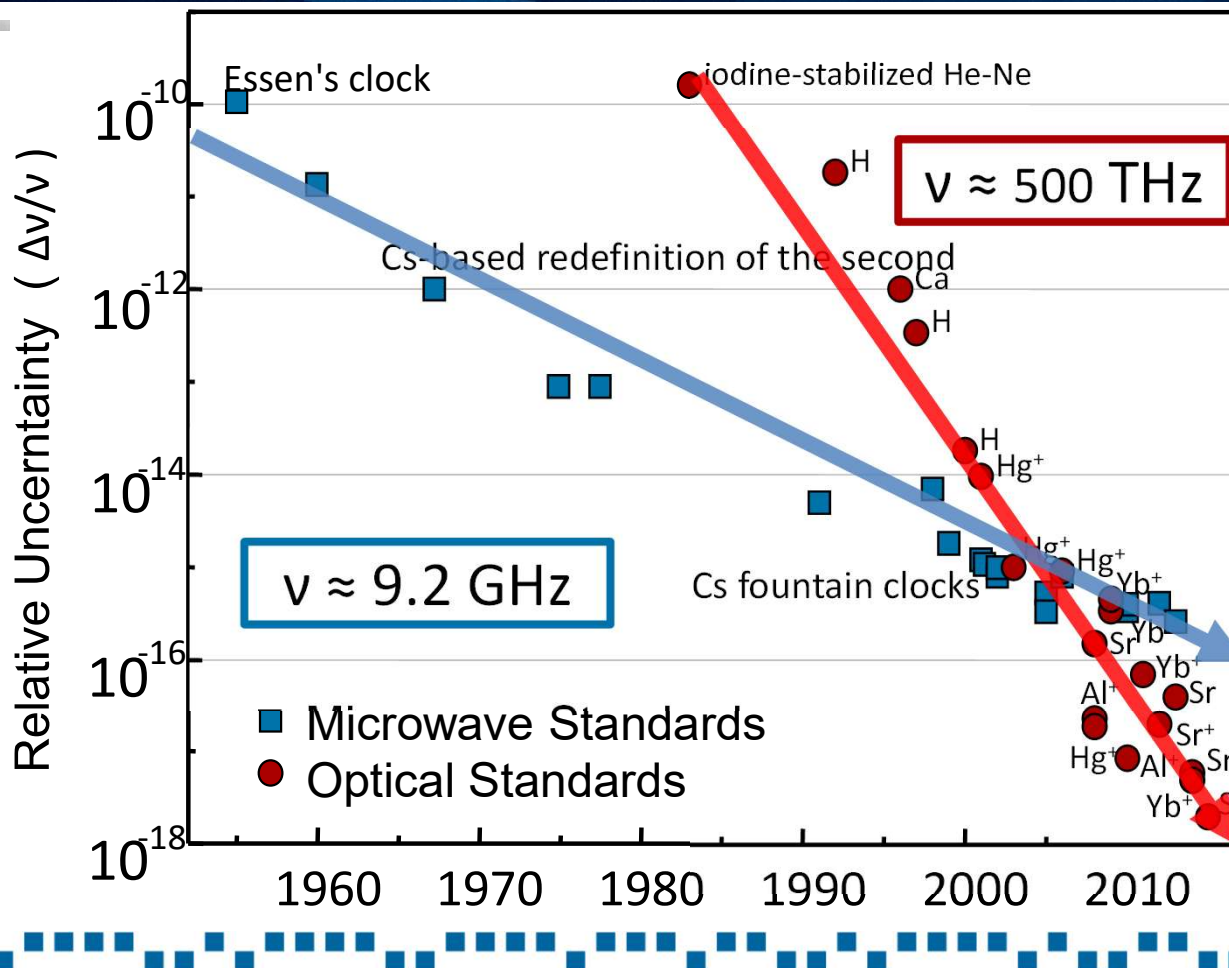
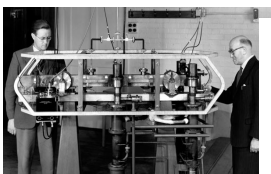
■ Metoda TWSTFT

- přesné (~ 1ns), velmi drahý provoz





Credit: Droste13



Single-ion clocks:
Al⁺, Hg⁺, Yb⁺, Sr⁺, Ca⁺



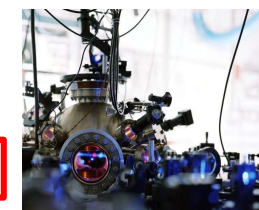
[1] S. Weyers *et al.*, *Metrologia* 55 (2018) 789–805

[2] T.L. Nicholson, *et al.*, *Nature Com.* 6, 6896 (2015)

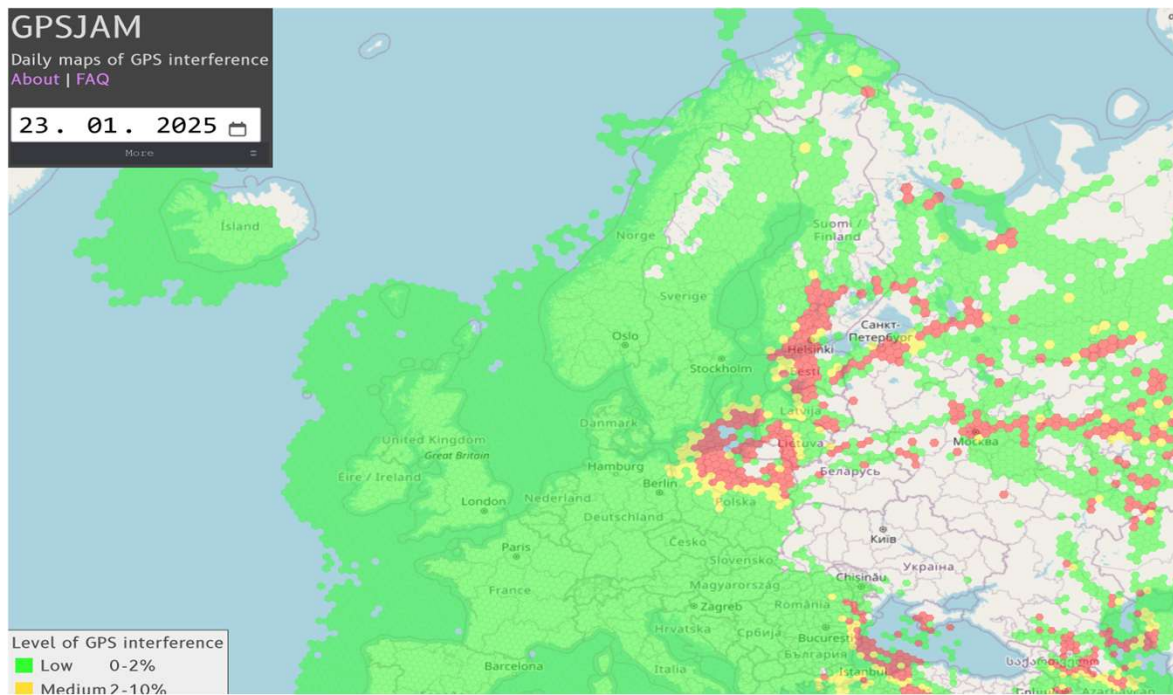
Neutral Atoms: Sr, Yb, Hg

1.7×10^{-16}

2.1×10^{-18}



Lze GNSS plně důvěřovat?



■ NTP - port 123

- Obousměrný přenos, binární
- 64-bit časový údaj
 - 32-bit: počet sekund od 1.1.1900
 - 32-bit: "desetinná část", rozlišení 2^{-32} (~0.23 ns)

■ Protokol IEEE 1588 (PTP)

- Implementace v 2. vrstvě podle OSI (Ethernet) nebo ve 4. vrstvě (UDP)
- Follow-up paket (přenáší informaci o předchozím paketu)
- Přepokládá HW podporu ve přepínači (měření zpoždění, aktualizace follow-up paketu)

■ White Rabbit

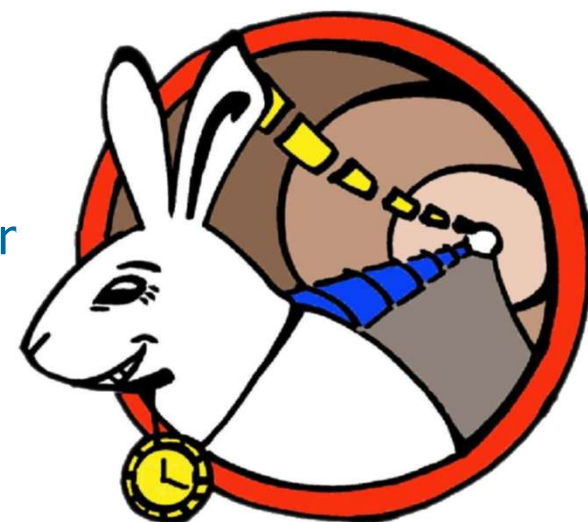
- Rozšíření IEEE1588 jako IEEE1588-2019
- Silně preferován obousměrný přenos jedním vláknem
- Využívá synchronní Ethernet
- Speciální přepínače

Prakticky dosažitelná nejistota

- time 1 s
- NTP 1 ms (rozsáhlá síť, PC se standardním krystalem)
10 μ s (lokální síť, kvalitní oscilátor, HW podpora v serveru)
- IEEE-1588 1 μ s (lokální síť, Ethernet, podpora v přepínačích)
- White Rabbit < 1 ns (synchronní Ethernet)

White Rabbit

- Open-source projekt vyvinutý pro potřeby distribuce přesného času a frekvence v CERNu
- Možnost velkého množství odběrných míst (tisíce)
- Sub-nanosekundová přesnost synchronizace s rozlišením v řádu pikosekund ("sub-nanosecond accuracy and picoseconds precision of synchronization")
- Klíčové komponenty
 - rozšíření PTP protokolu (přesný timestamping)
 - synchronní Ethernet
 - přesné měření fáze a real-time kompenzace zpoždění



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

cesnet
"...."

OPTICKÁ INFRASTRUKTURA PRO PŘENOS ČASU A FREKVENCE



Použité technologie:

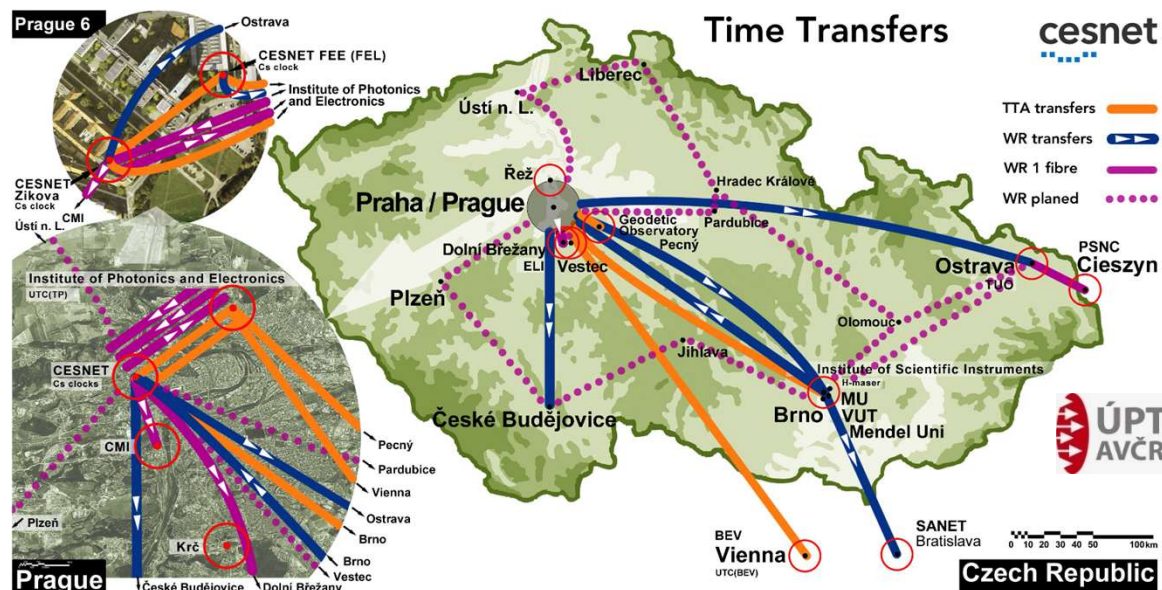
■ Optické adaptéry TTA (2009)

- přímé porovnání časové stupnice atomových hodin

■ Systém White Rabbit (2015)

- přenos lokální časové stupnice
- distribuční infrastruktura
- služba dostupná v 6 popech

■ Koherentní přenos optické frekvence- spolupráce ÚPT AVČR



■ 20 Points-of-Presence, každý WR switch

- WR PoPy i u sousedů: AT (Vienna), Poland (Cieszyn), SK (Bratislava)

■ Pokročilé WR switche

- multiple switchable references
- redundant power supply

■ Služby: primárně PTP a White Rabbit

omezeně i 10 MHz a 1PPS

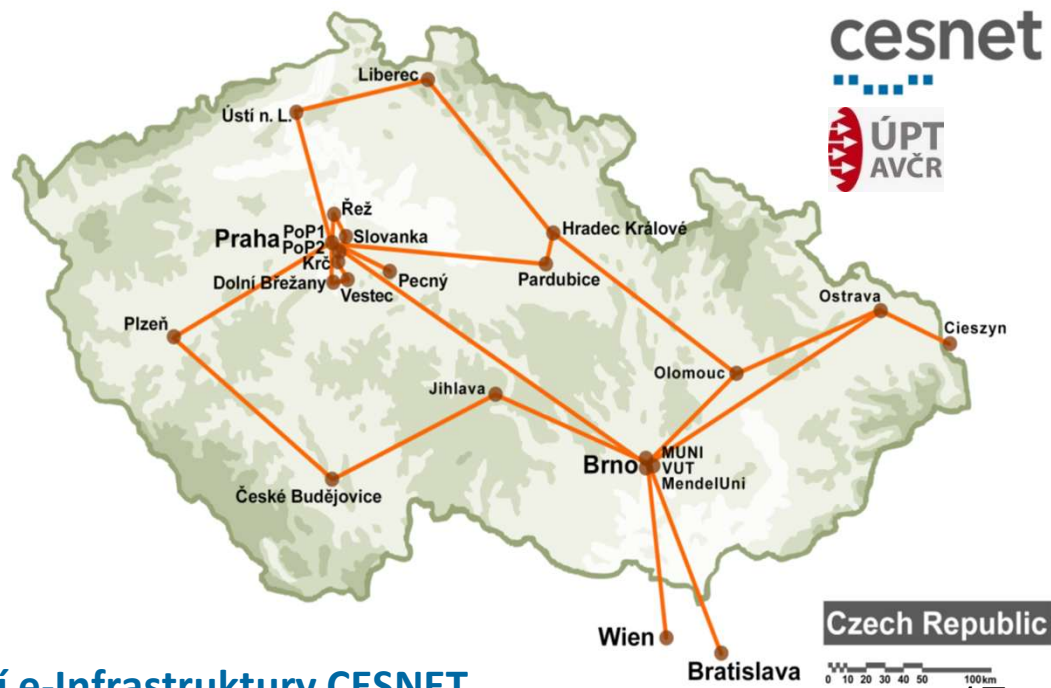
■ Spektrum sdíleno s datovými přenosy

■ Obousměrné bidi EDFA (dodávka probíhá)

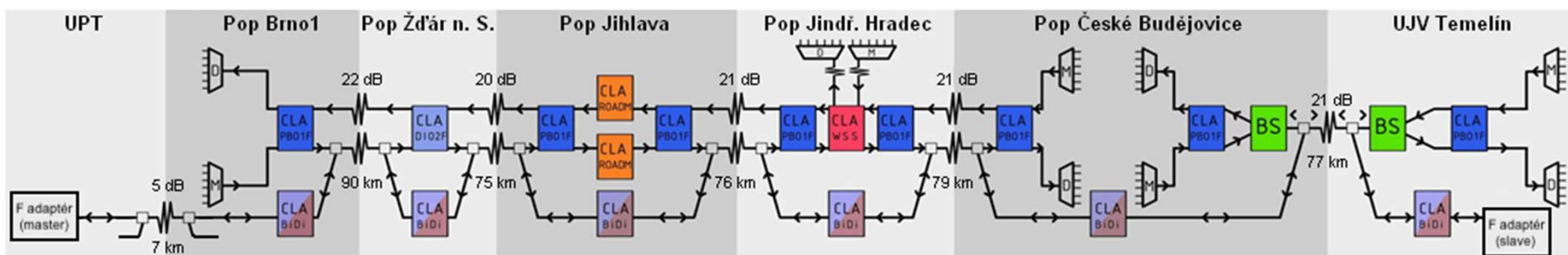
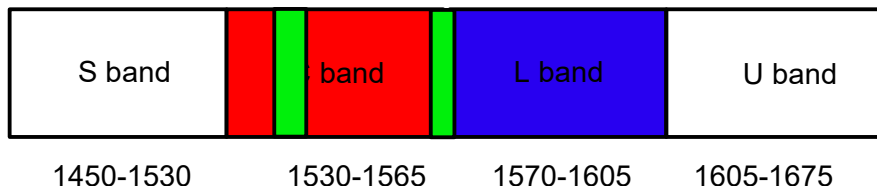
■ Dva zdroje času sledovatelné k UTC(TP)

- H-maser Cesnet (Praha) a UPT AVCR (Brno)

■ Výstavba v rámci modernizace optické sítě národní e-Infrastruktury CESNET



- S pomocí OADM rezervováno optické spektrum v páteři (bypassy)
- Nasazeno zhruba 120 OADM, 2500km tras, dual window: kanály 46-39 a 9-6
- Jedna „anomálie“ 1458nm propojení Ca+ hodin
- Dual band bidi EDFAs pro pokrytí ztrát kanálů



2009

Praha - Vídeň

2012

NEAT TF project

2017-19

CLONETS project

2020-
23

CLONETS-Design Study

Feb
2024

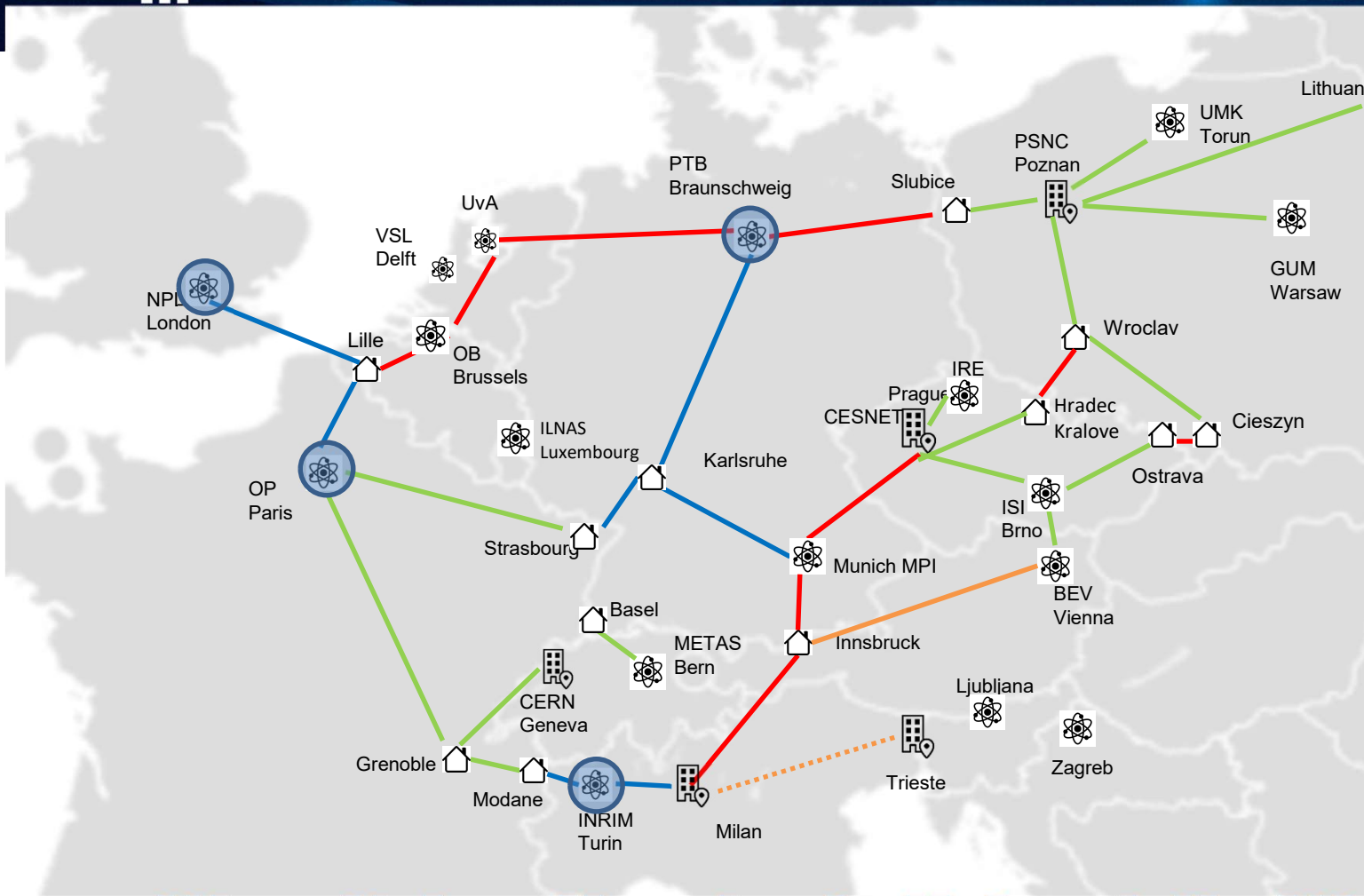
CERN workshop

June2024

Launch SIG-TFN




- Web page: <https://community.geant.org/sig-tfn/>
- New scientific community of metrology
- SIG-TFN brings together NRENs and the science of accurate time
- Strong interest: 100 subscribers to sig-tfn@lists.geant.org





Solution:

- Red lines are proposed for GN5-2
- These will interconnect national 'islands' of frequency networks
- Support redefinition of the SI second

-  NMI Frequency reference
-  Research institute
-  Hut for housing RLS

Kolegové z Oddělení koherenční optiky, Ústavu přístrojové techniky v
Brně

Lada Altmannová, Ondřej Havliš, Vladimír Smotlacha, Jaromír Šíma,
Martin Šlapák a řada dalších kolegů z CESNETu

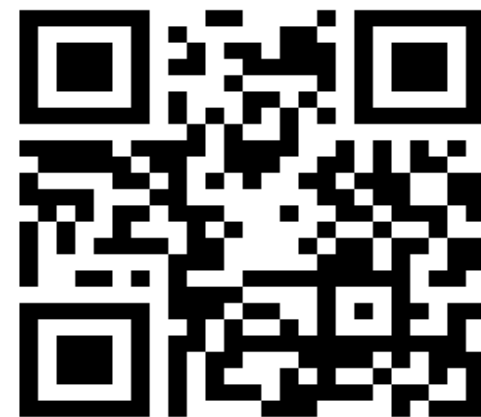


cesnet
"...."

DĚKUJI ZA POZORNOST

josef.vojtech@cesnet.cz

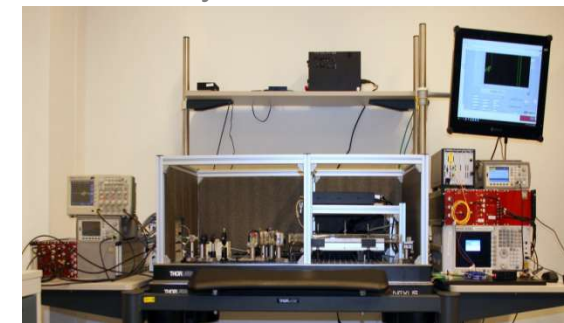
DOTAZY PROSÍM?



Caesium fountain clock at NPL
UK, height of 2.5 m

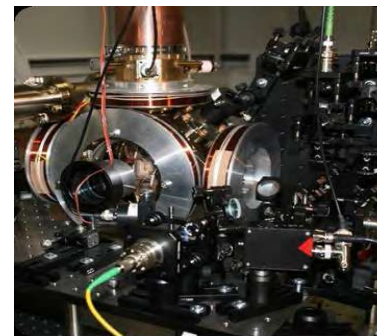


Acetylene stabilized laser



Optical atomic clock based
on trapped single Ca ion

- Cost of ownership
- More interconnected clocks (Cs primary standards and H masers) improve accuracy and stability of the time scale
- “Interconnection” means time transfer
- Hard to transfer some clocks (sensitive + not a small ones)



Cesiové hodiny typu 5071A

5071A jsou nejběžnější a nejlepší komerční cesiové hodiny

- vyrábějí se již 30 let
- HP5071A (1991) -> Agilent -> Symmetricom -> Microsemi -> Microchip

Jaký je výstup hodin?

- sekundové pulsy a frekvence 10 MHz
- aktuální datum a čas na sériové lince

A kde je v ČR mají?

- jen několik organizací, např. CESNET, FEL ČVUT, UFE AV ČR, VUGKT, ...



Stabilita $1 \cdot 10^{-14}$ (ADEV, 5 dní)

Přesnost $5 \cdot 10^{-13}$



■ akusticky

- zvon
- výstřel z děla
 - problém s malou rychlostí zvuku, zejména při nastavení lodních hodin
 - odchylka 1s způsobí chybu zeměpisné délky 15 úhlových vteřin (1/4 námořní míle na rovníku)

■ vizuální symbol

- „Time ball“ – Greenwich Observatory (1833), USNO (1845)

■ telegraf

- USNO (1865)

■ rádiový signál

- 1905



■ služba distribuce přesného času

- Mainflingen (u Frankfurtu n. Mohanem)
- frekvence 77.5 MHz, amplitudová modulace, 50kW
- příjem možný v okruhu cca 1500 km
- v provozu od 1959

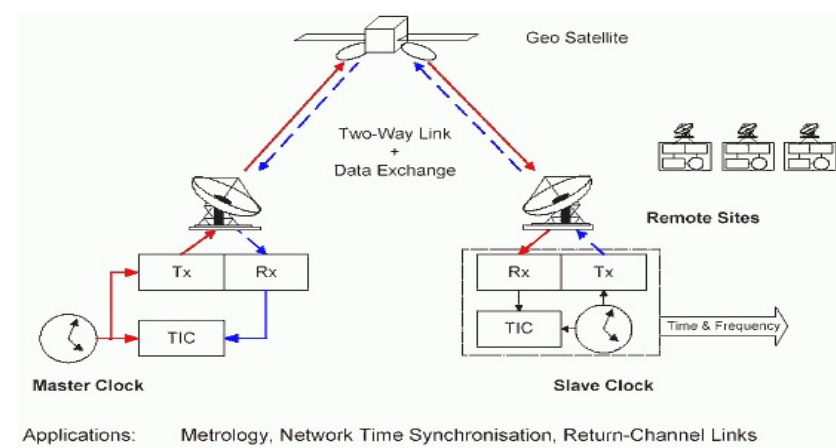
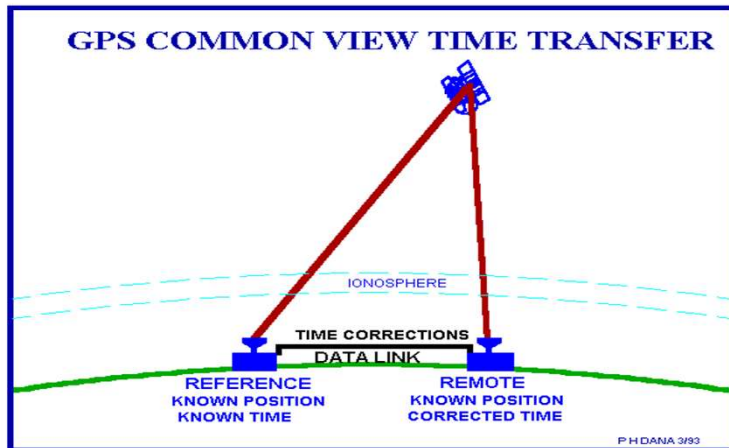
■ masově využíváno ve velké části Evropy

- radiobudíky
- nástěnné hodiny

■ nehodí se pro náročnější aplikace

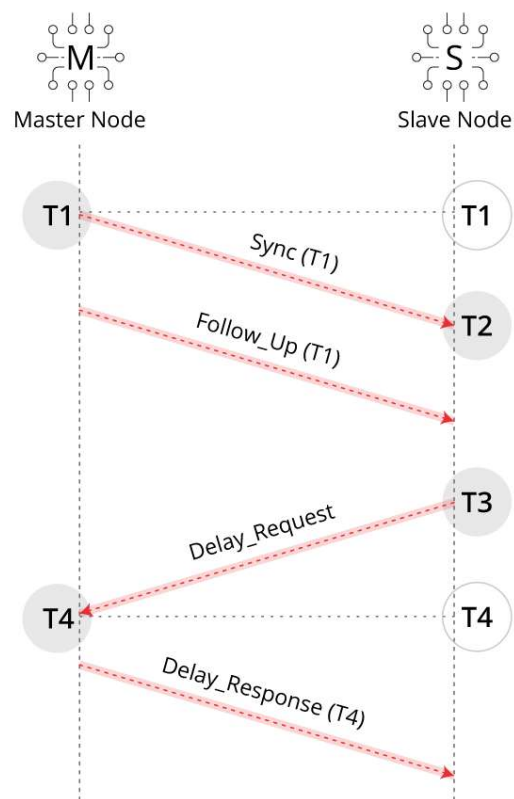
- chyba v řádu milisekund (kolísání zpoždění, nepřesná demodulace 77.5 kHz)





- CV GNSS - 20 000 km:(GPS, GALILEO, GLONASS, ...) precision 3 – 50 ns
- GNSS PPP (Precise Point Positioning) 0.1 ns
- TWSTF – 2 x 36 000km: 0.1 ns

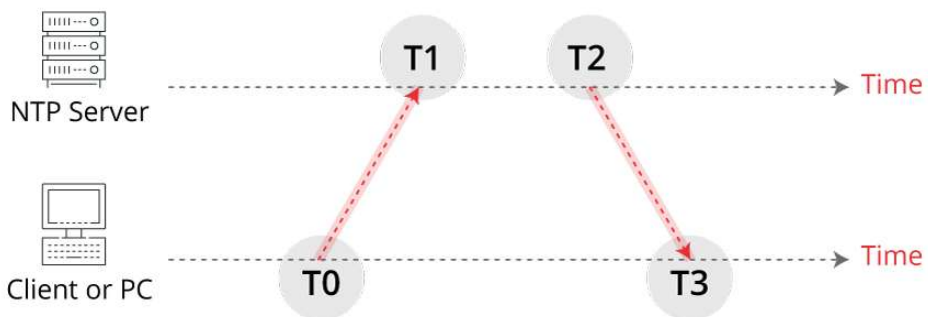
Credits: Colorado, Timetech



■ zpoždění $\delta = (T4 - T1) - (T3 - T2)$

■ offset $\theta_0 = ((T4 - T1) + (T3 - T2)) / 2$

Follow_Up packet nese informaci o T1



<https://www.incibe-cert.es/en/blog/ntp-sntp-and-ptp-what-time-synchronization-do-i-need>

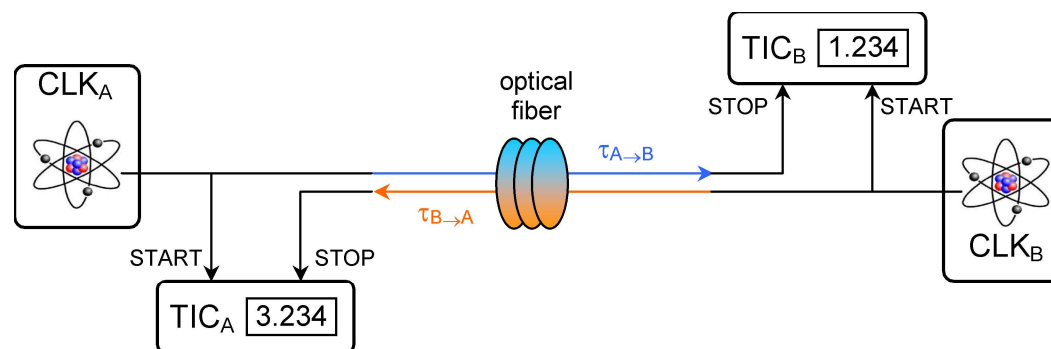
■ zpoždění $\delta = (T3 - T0) - (T2 - T1)$

■ offset $\theta_0 = ((T3 - T0) + (T2 - T1)) / 2$

$$\theta_0 - \delta / 2 \leq \theta \leq \theta_0 + \delta / 2$$

■ Porovnání dvou hodin

- Kompenzace zpoždění není nutná



principle of two-way comparison:

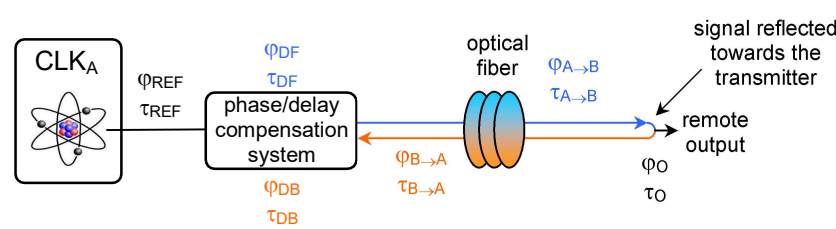
$$TIC_A = CLK_A - CLK_B + \tau_{B \rightarrow A}$$

$$TIC_B = CLK_B - CLK_A + \tau_{A \rightarrow B}$$

if $\tau_{A \rightarrow B} = \tau_{B \rightarrow A}$ (fiber reciprocity)
then
 $CLK_A - CLK_B = (TIC_A - TIC_B)/2$

■ Distribuce času

- Je nutné kompenzovat zpoždění na trase i jeho změny



phase stabilization:

$$\varphi_O = \varphi_{REF} + \varphi_{DF} + \varphi_{A \rightarrow B}$$

$$\varphi_{RT} = \varphi_{DF} + \varphi_{A \rightarrow B} + \varphi_{B \rightarrow A} + \varphi_{DB}$$

if $\varphi_{RT} = 0$ (kept by feedback)
then

$$\varphi_O = \varphi_{REF} + \left. \begin{aligned} &+ (\varphi_{DF} - \varphi_{DB})/2 + \\ &+ (\varphi_{A \rightarrow B} - \varphi_{B \rightarrow A})/2 \end{aligned} \right\} \cong 0$$

delay stabilization:

$$\tau_O = \tau_{REF} + \tau_{DF} + \tau_{A \rightarrow B}$$

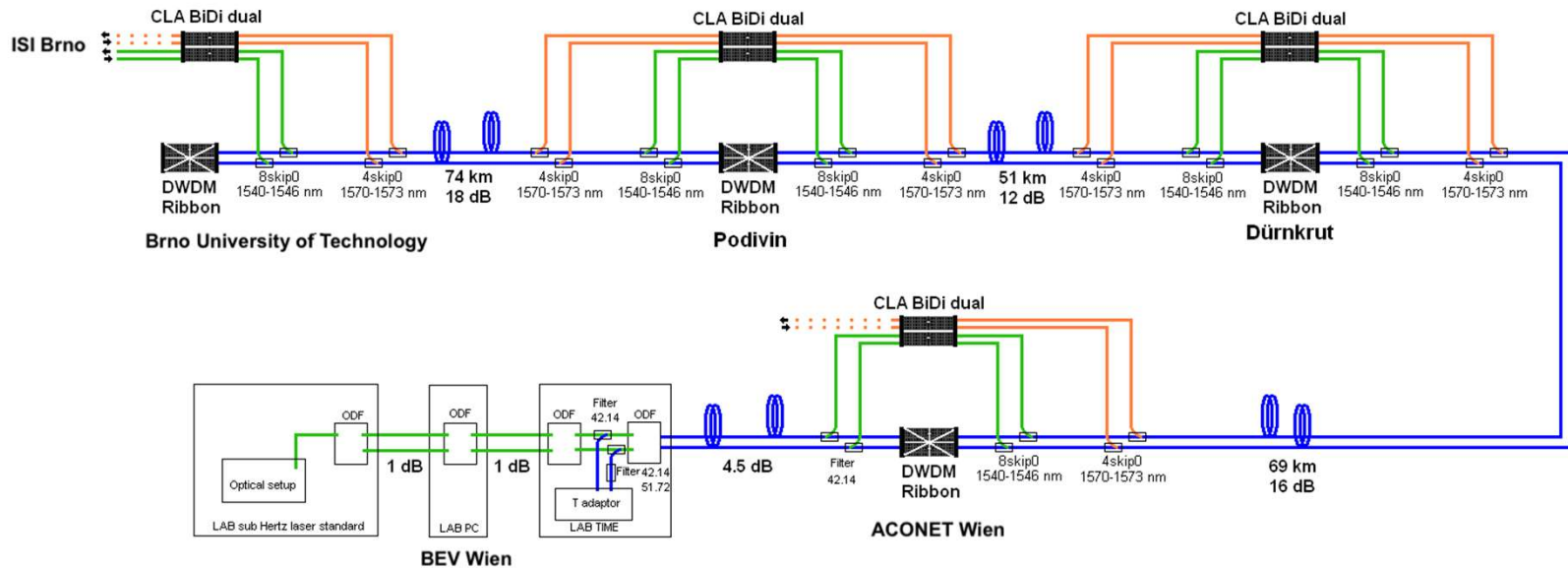
$$\tau_{RT} = \tau_{DF} + \tau_{A \rightarrow B} + \tau_{B \rightarrow A} + \tau_{DB}$$

if $\tau_{RT} = const.$ (kept by feedback)
then

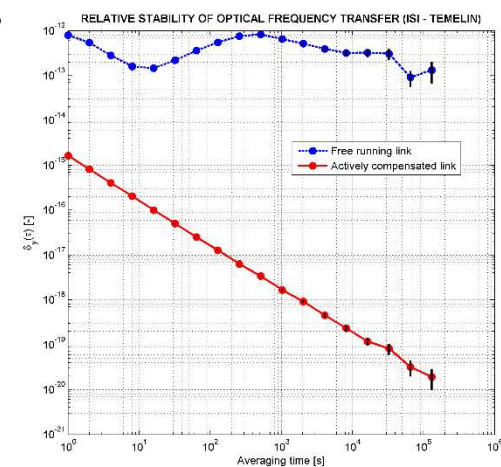
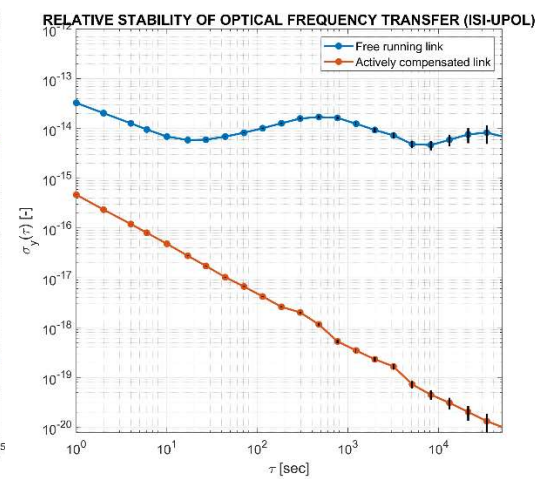
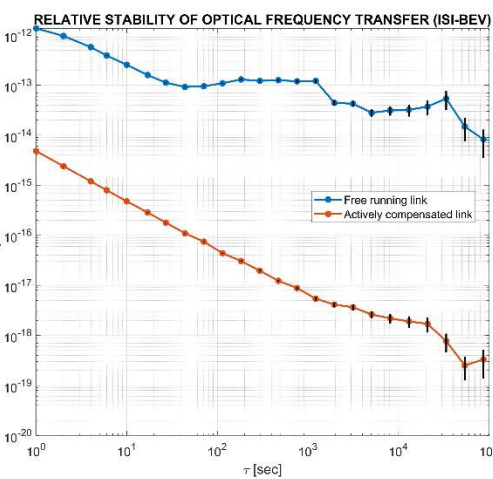
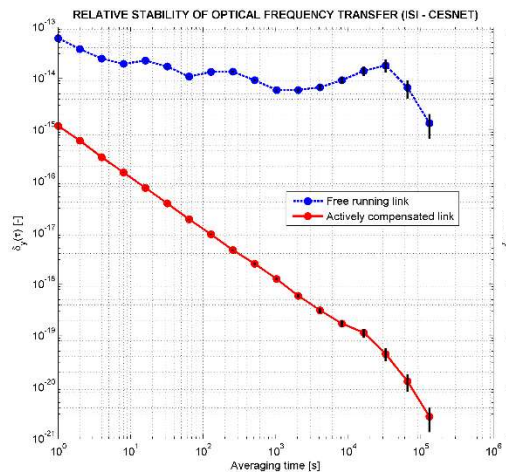
$$\tau_O = \tau_{REF} + \tau_{RT}/2 + \left. \begin{aligned} &+ (\tau_{DF} - \tau_{DB})/2 + \\ &+ (\tau_{A \rightarrow B} - \tau_{B \rightarrow A})/2 \end{aligned} \right\} \cong 0$$

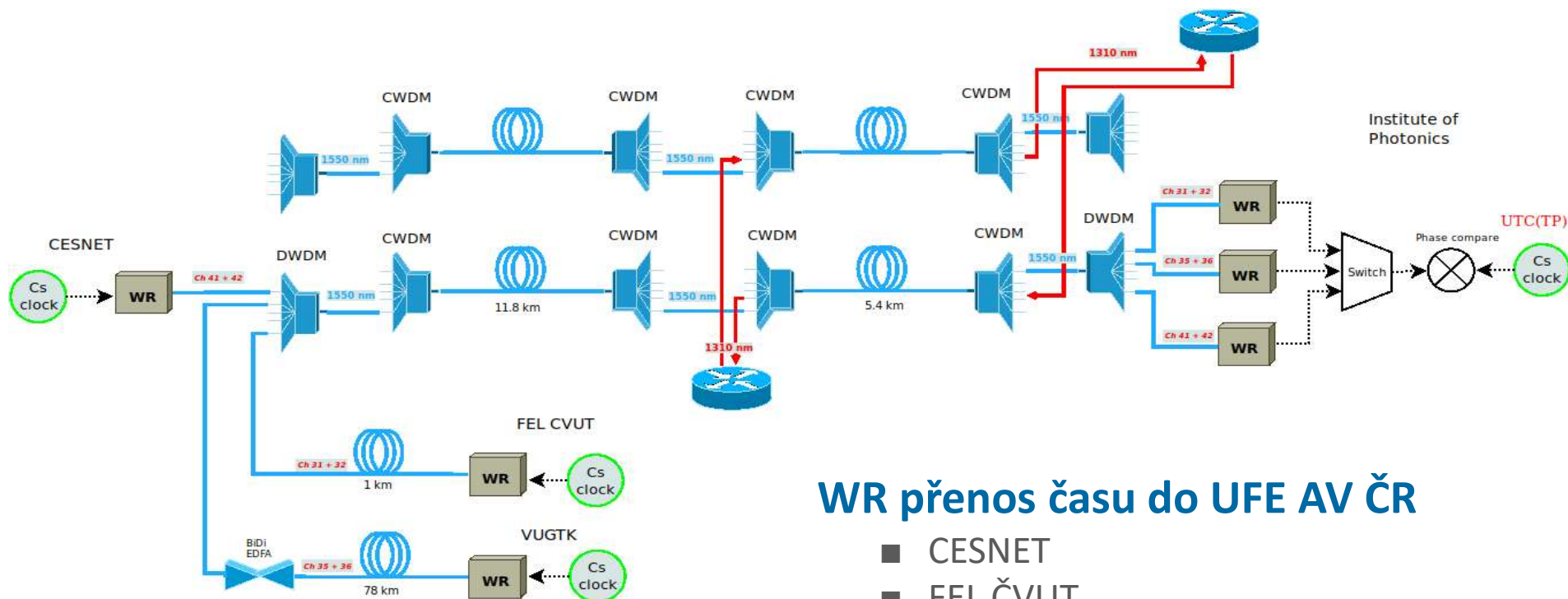


- Nové řešení optické trasy
 - 2 inline zesilovací body (Podivín a Dürnkrot)
 - Trasa je dlouhá 186,8 km a 44,79 dB
 - Kompenzace 4 CzL CLA BiDi dual



- With the active compensation method to achieve stability on lines $\times 10^{-18}$



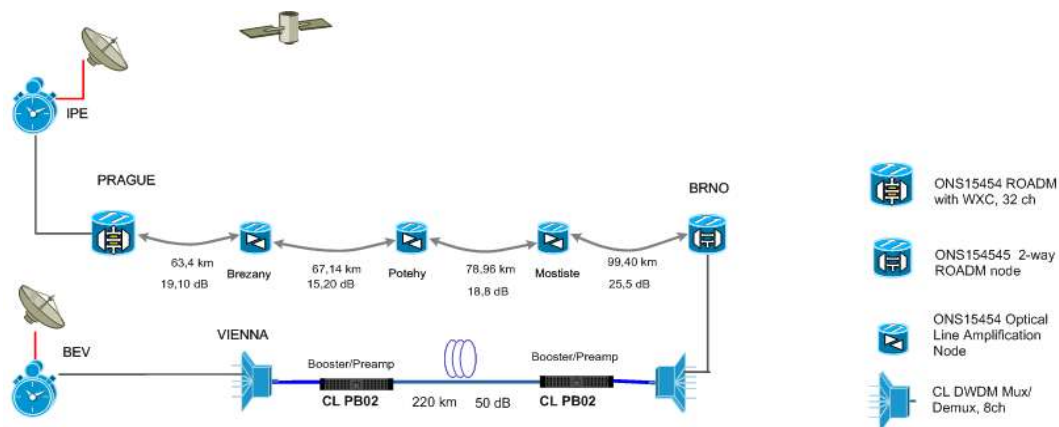


WR přenos času do UFE AV ČR

- CESNET
- FEL ČVUT
- VUGTK

■ **optické porovnávání časových stupnic UTC(TP) a UTC(BEV)**

- délka trasy Praha – Vídeň 550 km
- v provozu od srpna 2011
- první optické porovnávání stupnic dvou národních laboratoří na světě
- spolupráce CESNET, UFE AV ČR, BEV a AcoNET



cesnet
■■■■■



CESNET
atomic time



Námořní navigace vyžaduje referenční čas

- volba poledníku
- Greenwich a San Fernando byly definovány jako nultý poledník

Observatoře

■ Velká Británie

- Greenwich

■ Francie

- Paříž, poledník procházející Louvrem

■ Španělsko

- San Fernando

■ USA

- USNO, Washington D.C.



■ GMT (Greenwich Mean Time)

- historicky čas na poledníku procházejícím Greenwich
- termín GMT se dnes používá jen v ve Velké Británii jako synonymum pro UTC+0h

■ UT1

- střední sluneční čas na zeměpisné délce 0°
- má význam pro určení přestupné sekundy



■ UTC

Universal Coordinated Time X Temps Universel Coordonné

- určen váženým průměrem z >2000 atomových hodin
- výpočet provádí BIPM v Paříži
- délka sekundy určena definicí SI
- aproximuje stupnic UT1
 - při odchylce >0.9s se vkládá/vynechává přestupná sekunda

■ TAI

International Atomic Time X Temps Atomique International

- délka sekundy také podle SI
- výpočet provádí BIPM
- neexistují přestupné sekundy
 - rozdíl proti UTC je celý počet sekund a zvětšuje se
- má význam hlavně pro fyziky

CIRCULAR T 404
2021 SEPTEMBER 09, 07h UTC

ISSN 1143-1393

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
THE INTERGOVERNMENTAL ORGANIZATION ESTABLISHED BY THE METRE CONVENTION
PAVILLON DE BRETEUIL F-92312 SEVRES CEDEX TEL. +33 1 45 07 70 70 tai@bipm.org

The contents of the sections of BIPM Circular T are fully described in the document "Explanatory supplement to BIPM Circular T" available at https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/other-products/notes/explanatory_supplement_v0.6.pdf

1 - Difference between UTC and its local realizations UTC(k) and corresponding uncertainties.
From 2017 January 1, 0h UTC, TAI-UTC = 37 s.

Date 2021	MJD	0h UTC	JUL 29	AUG 3	AUG 8	AUG 13	AUG 18	AUG 23	AUG 28	Uncertainty/ns	Notes	
			59424	59429	59434	59439	59444	59449	59454	uA	uB	u
Laboratory k			[UTC-UTC(k)]/ns									
AGGO (La Plata)			-644.2	-630.4	-642.6	-643.0	-609.9	-584.2	-566.6	1.0	20.0	20.0
ADS (Borowiec)			-3.8	-3.3	-2.5	-1.1	0.0	0.5	1.3	0.3	3.0	3.0
APL (Laurel)			1.2	1.1	1.9	0.2	-0.5	-1.0	-1.2	0.4	19.5	19.5
AUS (Sydney)			-519.3	-530.0	-520.9	-516.7	-512.7	-502.5	-508.3	0.3	11.2	11.2
BEV (Wien)			35.6	40.1	34.6	23.4	26.7	28.1	25.1	0.3	3.4	3.4
BFKH (Budapest)			3041.6	3073.5	3103.1	3136.3	3174.0	3209.6	3240.9	1.5	20.0	20.1
BIM (Sofiya)			14892.4	14930.2	14946.9	14967.4	14983.2	14990.2	14990.9	0.3	7.1	7.2
BIRM (Beijing)			1.6	1.2	-4.2	-7.4	-6.3	-6.0	-9.0	0.7	2.9	3.0
BOM (Skopje)			-	-	145.5	-14.4	-21.1	-32.3	-44.9	2.0	7.5	7.8 (1)
BY (Minsk)			1.3	0.6	0.6	1.7	1.6	1.7	1.0	1.5	12.1	12.1



Národní referenční laboratoře

- realizují vlastní aproximaci stupnice UTC
 - přívlastek je většinou název laboratoře, např. UTC(PTB)
- průběžně měří odchylku své stupnice vůči některé jiné a hlásí ji do BIPM
- BIPM data zpracuje a vydá tzv. Circular-T
 - obsahuje odchylku národní stupnice vůči UTC

Příklady

- ČR: UFE, UTC(TP)
- USA: NIST, USNO
- Francie: Observatoire Paris
- Velká Británie: NPL
- Německo: PTB
- Rakousko: BEV
- Polsko: GUM, AOS
- Španělsko: ROA

CIRCULAR T 404
2021 SEPTEMBER 09, 07h UTC

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
THE INTERGOVERNMENTAL ORGANIZATION ESTABLISHED BY THE METRE CONVENTION
PAVILLON DE BRETEUIL F-92312 SEVRES CEDEX TEL. +33 1 45 07 70 70 tai@bipm.org

ISSN 1143-1393

The contents of the sections of BIPM Circular T are fully described in the document "Explanatory supplement to BIPM Circular T" available at https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/other-products/notes/explanatory_supplement_v0.6.pdf

1 - Difference between UTC and its local realizations UTC(k) and corresponding uncertainties.
From 2017 January 1, 0h UTC, TAI-UTC = 37 s.

Date 2021	0h UTC	JUL 29	AUG 3	AUG 8	AUG 13	AUG 18	AUG 23	AUG 28	Uncertainty/ns	Notes	
MJD		59424	59429	59434	59439	59444	59449	59454	uA	uB	u
Laboratory k		[UTC-UTC(k)]/ns									
AGG0 (La Plata)		-644.2	-630.4	-642.6	-643.0	-609.9	-584.2	-566.6	1.0	20.0	20.0
AOS (Borowiec)		-3.8	-3.3	-2.5	-1.1	0.0	0.5	1.3	0.3	3.0	3.0
APL (Lauzelle)		1.2	1.1	1.9	0.2	-0.5	-1.0	-1.2	0.4	19.5	19.5
AUS (Sydney)		-519.3	-530.0	-520.9	-516.7	-512.7	-502.5	-508.3	0.3	11.2	11.2
BEV (Wien)		35.6	40.1	34.6	23.4	26.7	28.1	25.1	0.3	3.4	3.4
BFKH (Budapest)		3041.6	3073.5	3103.1	3136.3	3174.0	3209.6	3240.9	1.5	20.0	20.1
BIM (Sofiya)		14892.4	14930.2	14946.9	14967.4	14983.2	14990.2	14990.9	0.3	7.1	7.2
BIRM (Beijing)		1.6	1.2	-4.2	-7.4	-6.3	-6.0	-9.0	0.7	2.9	3.0
BOM (Skopje)		-	-	145.5	-14.4	-21.1	-32.3	-44.9	2.0	7.5	7.8 (1)
BY (Minsk)		1.3	0.6	0.6	1.7	1.6	1.7	1.0	1.5	12.1	12.1



Cesiové hodiny typu 5071A

5071A jsou nejběžnější a nejlepší komerční cesiové hodiny

- vyrábějí se již 30 let
- HP5071A (1991) -> Agilent -> Symmetricom -> Microsemi -> Microchip

Jaký je výstup hodin?

- sekundové pulsy a frekvence 10 MHz
- aktuální datum a čas na sériové lince

A kde je v ČR mají?

- jen několik organizací, např. CESNET, FEL ČVUT, UFE AV ČR, ...



Stabilita $1 \cdot 10^{-14}$ (ADEV, 5 dní)

Přesnost $5 \cdot 10^{-13}$

