

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra měření



Diplomová práce

Software pro porovnání vysoce přesných etalonů času

Bc. Jan Dittrich

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jaroslav Roztočil, CSc.

Studijní program: Kybernetika a robotika

Obor: Senzory a přístrojová technika

2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Podpis autora práce

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce, panu doc. Ing. Jaroslavu Roztočilovi, CSc., za vedení této práce a za poskytnutí pravidelných konzultací. Dále za možnost použít data Laboratoře přesného času a frekvence FEL ČVUT.

Také děkuji pánům Ing. Alexandru Kunovi, Ph.D. a RNDr. Ing. Vladimíru Smotlachovi, Ph. D. za možnost použít data Laboratoře Státního etalonu času a frekvence, resp. Laboratoře CESNET.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dittrich** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **406281**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Senzory a přístrojová technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

SW pro porovnání vysoce přesných etalonů času

Název diplomové práce anglicky:

SW for Comparison of High Quality Time Standards

Pokyny pro vypracování:

Provedte rozbor metod po porovnání přesných časových stupnic generovaných kvantovými etalony času a frekvence. Na základě tohoto rozboru analyzujte dosažitelnou přesnost měření a realizujte SW aplikaci pro zpracování dat naměřených metodou Common-View a metodou dvoucestného přenosu času po optických vláknech. Aplikaci ověřte na datech z Laboratoře přesného času a frekvence FEL ČVUT, Laboratoře Státního etalonu času a frekvence, případně dalších časových laboratoří (CESNET, GO Pecný).

Seznam doporučené literatury:

- [1] M. A. Lombardi, L. M. Nelson, A. N. Novick and V. S. Zhang: Time and Frequency Measurements Using the Global Positioning System. Cal Lab: The International Journal of Metrology, 2001.
- [2] Ebenhag, S-C.: Frequency Transfer Techniques and Applications: Göteborg: Chalmers University of Technology, 2013.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Jaroslav Roztočil, CSc., katedra měření FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **22.01.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **25.05.2018**

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2018/2019

doc. Ing. Jaroslav Roztočil, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podp s vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt

Tato diplomová práce se věnuje realizaci softwarové aplikace určené k porovnávání přesných časových stupnic vysoce přesných etalonů času a frekvence. Aplikace je odzkoušena porovnáváním lokální časové stupnice Laboratoře přesného času a frekvence FEL ČVUT a časové stupnice Laboratoře Státního etalonu času a frekvence LSEČF, která reprezentuje národní aproximaci časové stupnice UTC. Software je napsán v jazyce C v programu LabWindows/CVI. Pro porovnávání jsou zvoleny dvě metody, a to metoda společného pozorování „Common View“, která využívá pro přenos času satelitní systémy, a metoda dvoucestného přenosu času po optických vláknech. Pro porovnávání pomocí metody „Common View“ se zde využívají satelitní systémy GPS, GLONASS a Galileo. Tato práce obsahuje také analýzu těchto metod a jejich vzájemné porovnání.

Abstract

This diploma thesis is about development of a software application designed to compare exact timescales of high precision time and frequency standards. The application is tested by comparing the local timescale of the Laboratory of Precision Time and Frequency CTU FEE and the timescale of the Laboratory of the National Time and Frequency Standard which presents the Czech national approximation of the UTC timescale. The software is written in C language in LabWindows/CVI software. There are two methods selected for this comparison, the Common View method, which uses satellite systems, and the method of Two-Way Time Transfer using optical fibers. For the Common View method, the GPS, GLONASS and Galileo satellite systems are used. This work also includes an analysis of these methods and their mutual comparison.

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Časové stupnice.....	2
2.1.	Světový čas (UT).....	2
2.2.	Mezinárodní atomový čas (TAI).....	2
2.3.	Koordinovaný světový čas (UTC).....	3
3.	Optická vlákna.....	4
3.1.	Úvod.....	4
3.3.	Typy optických vláken.....	4
3.3.1.	Jednovidová vlákna.....	4
3.3.2.	Vícevidová vlákna.....	4
3.4.	Multiplex.....	5
3.5.	Vlnový multiplex (WDM).....	5
3.5.1.	Hrubý vlnový multiplex (CWDM).....	6
3.5.2.	Hustý vlnový multiplex (DWDM).....	6
3.6.	Polarizační vidová disperze (PMD).....	7
3.7.	Chromatická disperze (CD).....	8
4.	Satelitní systémy.....	9
4.1.	Satelitní systém GPS.....	10
4.2.	Satelitní systém GLONASS.....	11
4.3.	Satelitní systém Galileo.....	11
5.	Metody porovnávání času a frekvence.....	12
5.1.	Úvod.....	12
5.2.	Jednocestný přenos času a frekvence.....	12
5.3.	Dvoucestný přenos času a frekvence.....	14
5.4.	Porovnání pomocí satelitních systémů.....	15
5.4.1.	Metoda společného pozorování „Common View“.....	17
5.5.	Porovnání pomocí optických vláken.....	18
6.	Software.....	19
6.1.	Metoda společného pozorování „Common View“.....	20
6.2.	Metoda dvoucestného přenosu času po optických vláknech.....	24

6.3. Porovnání metod přenosu času po optických vláknech a „Common View“	29
7. Výsledky měření	30
7.1. Úvod	30
7.2. Metoda „Common View“ s využitím GPS	31
7.3. Metoda „Common View“ s využitím GLONASS	33
7.4. Metoda „Common View“ s využitím Galilea	35
7.5. Porovnání jednotlivých satelitních systémů	36
7.6. Metoda dvoucestného přenosu času po optických vláknech	37
7.7. Porovnání obou metod	38
8. Závěr	41
9. Literatura	42
10. Příloha	43

1. Úvod

Přesný časový údaj má ve vědě a technologii mnohem větší význam, než si většina lidí uvědomuje. Dnešní společnost je závislá na elektronické komunikaci ve všech odvětvích a tlak na vývoj dokonalejší elektronické komunikace zvyšuje důležitost přesné časové synchronizace. Přesné časování je především důležité pro navigaci pomocí systému navigačních satelitů (GNSS¹), jako je například GPS². Precizní a stabilní časovou stupnici poskytuje především národní metrologický institut. Ten zajišťuje stabilní časový standard pomocí atomových hodin. S rozvojem v oblasti satelitních systémů nastala možnost získat spolehlivou časovou stupnici také pomocí těchto systémů.

Metrologické instituty a laboratoře mající k dispozici vlastní precizní časovou stupnici satelitních systémů využívají k porovnávání své stupnice s časovými stupnicemi ostatních laboratoří, čímž dosahují vyšší přesnosti. Tuto možnost využívá i naše Laboratoř přesného času a frekvence ČVUT FEL. Porovnávání přesných časových stupnic, resp. atomových hodin jednotlivých laboratoří probíhá buďto pomocí komparátoru frekvence s využitím techniky DMTD³, nebo pomocí čítačů časových intervalů (TIC⁴), které porovnávají rozdíl mezi dvěma sekundovými pulsy (PPS⁵). Kombinace lokálního a vzdáleného porovnávání umožňuje vzájemné porovnání všech atomových hodin a generování celosvětové referenční časové stupnice UTC⁶.

Tato diplomová práce se zabývá porovnáváním časových stupnic pomocí satelitních systémů a optických vláken. Porovnávání časových stupnic pomocí satelitních systémů je sice pro mnoho aplikací dostatečně přesné, ovšem nedosahuje nejvyšší možné přesnosti. Vyšší přesnost omezuje několik faktorů – viz kapitola 5.4. Především je to průchod signálu atmosférou, přičemž nejvíce signál ovlivňuje průchod ionosférou. Pro vyšší přesnost je tedy třeba použít jiný druh komunikace, který není závislý na průchodu signálu atmosférou. Z tohoto důvodu se tato diplomová práce zabývá také využitím optických vláken pro přenos času.

Software vytvořený v rámci této diplomové práce využívá obě dvě výše uvedené možnosti. Pro porovnání časových stupnic pomocí satelitních systémů byla zvolena metoda společného pozorování tzv. „Common View“, pro porovnání pomocí optických vláken pak metoda dvoucestného přenosu času. Mimo vyhodnocení výsledků pomocí výše uvedených metod je vhodné vyhodnotit také diferenci těchto dvou metod.

Struktura této diplomové práce začíná úvodem do tematiky časových stupnic. Následuje kapitola, která se zabývá optickými vlákny. Zde se práce zaměřuje především na tematiku vlnového multiplexu a disperze způsobené průchodem signálu optickým vláknem. Další kapitola pojednává o druhém způsobu komunikace, tedy o satelitních systémech. Teoretickou část uzavírá kapitola zaměřená na typy metod používaných pro porovnání času a frekvence.

Po probrání potřebné teorie přechází tato práce k praktické části, tj. softwaru. Poté následuje zpracování výsledků měření, kterých bylo dosaženo pomocí tohoto softwaru s využitím dat poskytnutých Laboratoří přesného času a frekvence ČVUT FEL, Laboratoří státního etalonu času a frekvence a Laboratoří CESNET.

¹ Global Navigation Satellite System

² Global Positioning System

³ Dual Mixer Time Difference

⁴ Time Interval Counter

⁵ Pulse Per Second

⁶ Coordinated Universal Time

2. Časové stupnice

Metody, kterými lidé zaznamenávali údaj o čase, se s postupným vývojem lidstva měnily. Zpočátku se čas měřil podle rotace země. Tato metoda ovšem nebyla velmi přesná kvůli změnám v rychlosti rotace, které způsobují, že jednotlivé dny nejsou vždy stejně dlouhé. Postupem času se proto od této metody upustilo. Situace se změnila s příchodem rádiové komunikace. Komunikační systémy, které jsou různě propojené po celém světě, jsou vysoce závislé na stabilním a synchronizovaném údaji o čase. S příchodem možnosti rychlé a snadné dopravy na velké vzdálenosti se zvýšila priorita vysoké kompatibility lokální časové stupnice s globální časovou stupnicí.

Časová stupnice je definovaná počátečním bodem, od kterého se nepřetržitě sbírají další časové údaje. Ze sekund se stávají minuty, z minut hodiny a tak dále. Existuje více druhů časových stupnic. Rozdíl mezi nimi může být jak v jejich počátečním bodě, tak v rozdílu délky jejich časových jednotek, popřípadě v obojím. Jelikož se definice základní jednotky času sekundy v průběhu historie měnila, bylo vyvinuto několik časových stupnic pro určení oficiálního světového času.

2.1. Světový čas (UT)

Světový čas (UT⁷) je časová stupnice založena na rotaci země kolem své osy. Základem určení času je zde pozorování slunce nad horizontem. Takzvaný pravý slunečný čas je určen jako časový interval mezi dvěma výskyty nejvyššího možného pozorování slunce nad horizontem. Tento údaj je ovšem ovlivněn jak polohou měření, tak i ročním obdobím. Také rotace země kolem slunce neprobíhá po kruhové, nýbrž po elipsově ose. Kvůli těmto variacím vznikl takzvaný střední slunečný čas, který upravuje pravý slunečný čas časovými rovnicemi. Na základě tohoto středního slunečního času s korekcí nulového poledníku, vznikla časová stupnice UT0. Po přidání korekce posuvu zemského pólu pak vznikla časová stupnice UT1, jejíž počátečním bodem je 1. ledna, 1958 v 00:00:00 GMT⁸. Ovšem ani tyto korekce nestačily pro vznik dostatečně stabilní a přesné časové stupnice.

2.2. Mezinárodní atomový čas (TAI)

Mezinárodní atomová časová stupnice (TAI⁹) je založena na principu atomové rezonanční frekvence. Jedná se o souřadnicový referenční čas zavedený Mezinárodním úřadem pro míry a váhy (BIPM¹⁰). Pro vznik této stupnice jsou zapotřebí atomové hodiny. Udržování této stupnice zahrnuje pravidelné porovnávání až stovek atomových hodin umístěných v různých laboratořích po celé planetě. Počáteční bod této stupnice se shoduje s počátečním bodem stupnice UT1. Čas je

⁷ Universal Time

⁸ Greenwich Mean Time

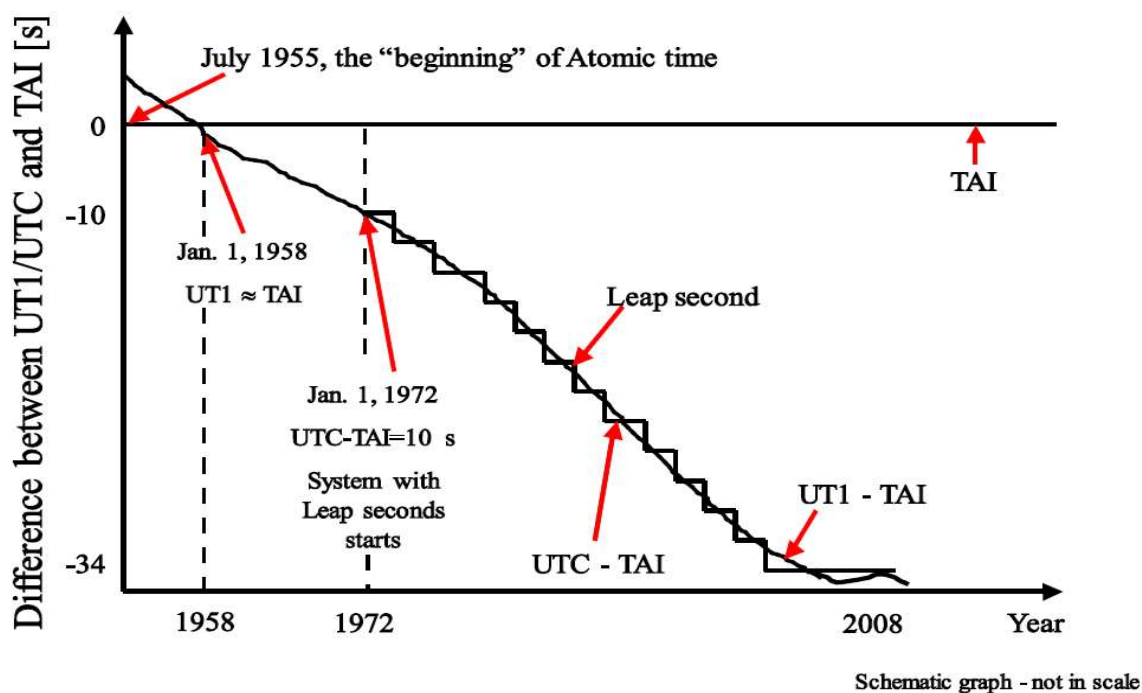
⁹ International Atomic Time

¹⁰ Bureau International des Poids et Mesures

zde pouze jedna ze souřadnic souřadnicového systému se třemi prostorovými souřadnicemi a jednou časovou. Tato stupnice je definovaná v rámci geocentrického referenčního rámce. Tento rámec vzniká v centru Země s jednotkou času realizovanou na rotujícím geoidu. Z toho důvodu musí být všechny atomové hodiny, které jsou zapojeny do této časové stupnice, umístěny v nulové nadmořské výšce nebo musí být provedena korekce. Z teorie relativity totiž vyplývá, že hodiny, na které působí menší gravitační síla, běží rychleji než hodiny, na který působí větší gravitační síla. Tato stupnice tedy vzniká jako vážený průměr údajů z až 450 atomových hodin umístěných v přibližně 70 laboratořích po celém světě. Délka časového intervalu jedné sekundy je zde definována stejně jako v časové stupnici UT1. Tato časová stupnice ovšem není závislá na rotaci Země, a proto zde nevznikají variace tohoto původu. To znamená, že stupnice UT1 a TAI se od sebe postupem času odklánějí. [1]

2.3. Koordinovaný světový čas (UTC)

Tato časová stupnice vznikla kvůli potřebě oficiální stabilní časové stupnice s charakteristikou atomové stupnice, která je zároveň závislá na rotaci Země. Vznikla na základě atomových hodin, jejichž frekvence byla několikrát ročně upravována pro vyšší kompatibilitu se stupnicí UT1. Toto řešení s častými úpravami hodin nebylo ideální. Proto vznikla nová metoda založená na tom, že rozdíl mezi stupnicemi UTC a TAI bude vždy počet celých sekund. Jakmile je rozdíl mezi UTC a UT1 vyšší než 0,9 sekundy, je přidána nebo odečtena jedna sekunda vzhledem ke stupnici TAI. Tyto takzvané skokové sekundy („Leap seconds“) řeší problém odklánění stupnic založených na rotaci Země od stupnic založených na atomových hodinách. To znamená, že časová stupnice UTC zahrnuje vlastnosti atomové stupnice TAI, ovšem s tím rozdílem, že stupnice UTC je závislá na rychlosti rotace Země. Z této stupnice se stala hlavní světová časová stupnice, podle které se řídí celý svět. Pro jednotlivá časová pásma pak je k základnímu UTC přičten či odečten určitý počet půlhodin. Rozdíly zde uvedených časových stupnic jsou zobrazeny na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Diference mezi stupnicemi TAI, UT1 a UTC. Převzato z [1].

3. Optická vlákna

3.1. Úvod

Optická vlákna jsou plastová či skleněná vlákna, která přenáší data pomocí světelného paprsku. Využívají jevu úplného odrazu světla. Toho je dosaženo pomocí dvou vrstev s odlišným indexem lomu. Index lomu představuje poměr mezi rychlostí šíření světla ve vakuu a v daném prostředí. Vnitřní část má větší index lomu než část obvodová. Důležitý parametr pro optická vlákna je takzvaná numerická apertura neboli maximální úhel, pod kterým může paprsek do vlákna vstoupit, aby se jím mohl šířit. Pro totální odraz světla je třeba, aby vstupní úhel na rozhraní dvou prostředí byl vyšší než kritický úhel, při kterém je výstupní úhel roven 90° .

Pro přenos se používají vlnové délky, při kterých dochází k nejnižší absorpci signálu prostředím. Pro skleněná vlákna to jsou hodnoty 850, 1300 a 1500 nm. Pro plastová okolo 650 nm. Mezi výhody přenosu po optických vláknech patří bezpochyby vysoká přenosová rychlost, a to i na větší vzdálenosti. Dále se zde vyskytují menší energetické ztráty než u elektrických přenosů. Tento přenos má také velmi vysokou odolnost proti vnějšímu rušení.

3.3. Typy optických vláken

Optická vlákna se dělí podle průměru jádra na jednovidová a vícevidová, a ta pak dále podle profilu indexu lomu na vlákna se skokovou změnou indexu lomu a s gradientní změnou indexu lomu. Jednotlivé typy optických vláken mají odlišnou numerickou aperturu, ale i útlum či disperzi. Poslední dva zmíněné parametry, tj. útlum a disperze, zásadně ovlivňují schopnost přenosu po optických vláknech. Konkrétněji útlum ovlivňuje velikost přenášeného optického výkonu, zatímco disperze rychlost přenosu.

3.3.1. Jednovidová vlákna

Jednovidová vlákna neboli „Single Mode“ jsou vlákna s malým průměrem jádra. Mají tedy menší rozměry oproti vícevidovým vláknům (průměr jádra 5-10 μm). Důsledkem toho se v nich šíří pouze jeden optický mód. Následkem malého průměru jádra vzniká velký odrazový úhel ve vlákně, což vede ke kratší trase optického signálu ve vlákně. Proto jsou tato vlákna vhodná pro přenos na větší vzdálenosti.

3.3.2. Vícevidová vlákna

Vícevidová vlákna mají průměr jádra 50-62,5 μm . Do vlákna se skokovou změnou indexu („Step index“) vstupují optické módy pod mnoha úhly a šíří se totálním odrazem na rozhraní jádro-plášť. U vláken s plynulou změnou indexu („Gradient Index“) opisuje paprsek sinusovou křivku.

V důsledku toho je zde menší disperze. Vícevidová vlákna mají vyšší světelnou kapacitu, ale používají se spíše na kratší vzdálenosti, např. v datových aplikacích.

3.4. Multiplex

Na přenosová média je často kladen požadavek na přenos více informací najednou. Zde se nabízí možnost pro každý přenos zvolit jiný přenosový kanál. To by však v případě optických vláken znamenalo natáhnout jich fyzicky více, což by vedlo ke zdražení zavedení této přenosové trasy. V našem konkrétním případě, kde se porovnávají dvě časové stupnice, by ovšem vznikl další problém. Nebylo by totiž možné zajistit identické podmínky pro rychlost přenosu (teplota, vzdálenost atd.) obou dvou kanálů.

Existuje však ještě jiný způsob, který spočívá ve sdílení kapacity kanálu. Této metodě se říká tzv. „multiplexing“. Pomocí tohoto sdílení je jeden fyzický kanál rozdělen na několik logických kanálů. Je zde několik možností, jak tento „multiplexing“ uskutečnit, avšak ne všechny metody jsou pro optická vlákna vhodné. Jedna z možností je frekvenční multiplex, tedy rozdělení šířky pásma fyzického kanálu. Tato metoda se nejčastěji používá v radiovém přenosu, kde se na různých frekvencích přenáší různé signály ve stejný čas. V optických přenosech se tato metoda dá rozdělit na elektrické multiplexování, kde se výsledným součtovým signálem moduluje zdroj záření, a na optické multiplexování neboli vlnový multiplex. Poslední zmíněná metoda je použita i v našem případě.

3.5. Vlnový multiplex (WDM)

Vlnový multiplex (WDM¹¹) umožňuje použít jednu optickou linku pro více signálů s rozdílnou vlnovou délkou současně, viz obrázek 3.1. Tímto způsobem lze rozšířit kapacitu sítě bez nutnosti zřizování více fyzických kanálů. Pro použití této metody je potřeba vlnový multiplexor ve vysílači, který spojí více vysílaných signálů s rozdílnou vlnovou délkou do jednoho společného kanálu. Zároveň se na konci tohoto kanálu nachází demultiplexor, který signály opět rozdělí. Metoda se používá především pro jednovidová vlákna.

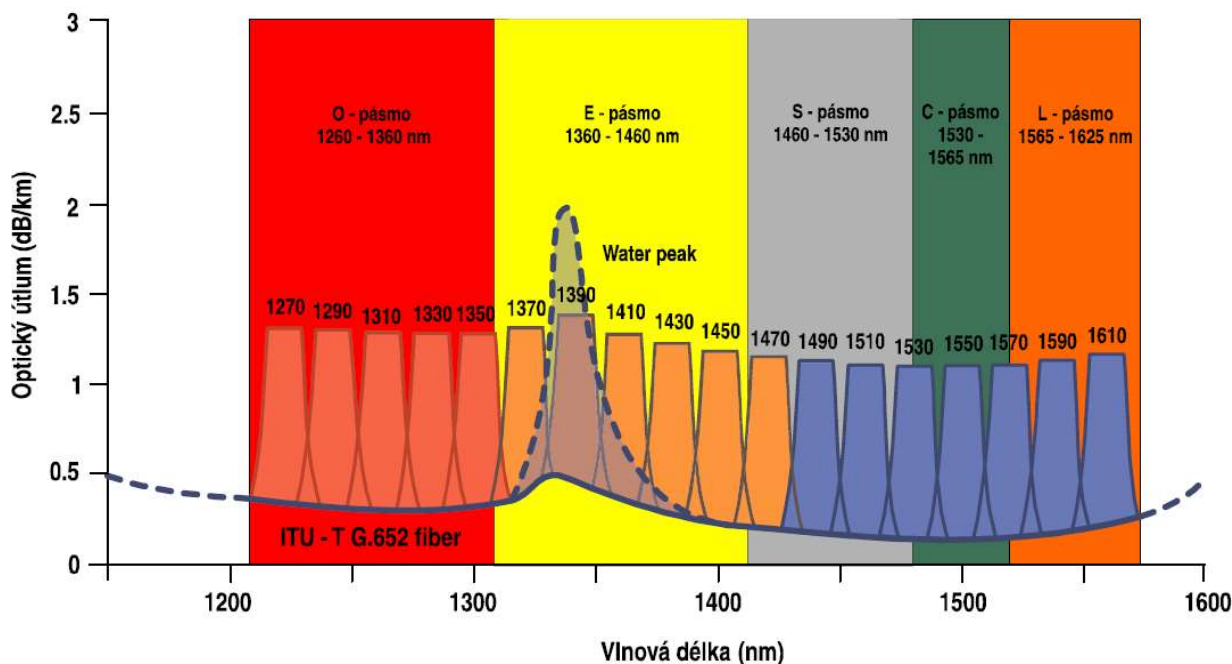


Obrázek 3.1: Vlnový multiplex

¹¹ Wavelength Division Multiplexing

3.5.1. Hrubý vlnový multiplex (CWDM)

Hrubý vlnový multiplex (CWDM¹²) využívá vlnové délky 1270 až 1610 nm s mezerami mezi kanály 20 nm. To by znamenalo možnost až 18 kanálů, ovšem pro standardní vlákno G.652 je k dispozici 5 kanálů v rozmezí 1270 až 1350 nm a 8 kanálů v rozmezí 1470 až 1610 nm. Dohromady tedy až 13 kanálů. Šířka kanálu kolem 13 nm (+/- 6,5 nm). Tato technologie umožňuje přenosovou rychlost až 2,5 Gbit/s na vzdálenost menší než 120 km. Mezi výhody patří především levná a dostupná technologie, snadné rozšiřování a snadná změna konfigurace. [12]



Obrázek 3.2: Kanály pro technologii CWDM. Převzato z [12].

3.5.2. Hustý vlnový multiplex (DWDM)

Tato technologie vznikla na popud stále se zvyšující potřeby lepšího využití stávající infrastruktury. Pomocí technologie s hustým vlnovým multiplexem (DWDM¹³) je možné zvýšit počet kanálů až na 80. Technologie není v principu složitá, nicméně k její realizaci je zapotřebí komplexní systém, který se skládá z několika komponent. Z tohoto důvodu je toto řešení nákladnější než technologie CWDM.

Jedna z hlavních komponent tohoto systému DWDM je takzvaný transpondér. Ten dokáže konvertovat vstupní širokopásmový signál na více jednotlivých signálů s danou vlnovou délkou. Transpondér obvykle převede vstupní optický signál na signál elektrický. Tímto elektrickým signálem poté ovládá DWDM laser, který opět generuje optický signál pro jednotlivé vlnové délky. Dále tento systém obsahuje optický multiplexor, který má za úkol sesbírat jednotlivé signály

¹² Coarse Wavelength Division Multiplexing

¹³ Dense Wavelength Division Multiplexing

s rozdílnými vlnovými délkami ze všech transpondérů a vyslat je spolu ve svazku do optického vlákna. Výše zmíněný transpondér se dělí na 3 generace. Generace 1R sloužila pouze k přeposlání, to znamená, že dál bylo posláno, až na drobné vyčištění signálu, téměř identicky to, co bylo přijato. Generace 2R signál zesílila a zároveň pomocí tvarovacího obvodu upravovala tvar signálu. Generace 3R pak mimo zesílení a úpravu tvaru signálu navíc umožňuje korekci časových poloh signálu.

Systém také obvykle obsahuje optický zesilovač pro kompenzaci útlumu signálu, a to jak pro delší vzdálenosti optické trasy, tak i přímo v multiplexoru a demultiplexoru, kde také k útlumu dochází. Optický zesilovač je zde zvolen, protože dokáže zesílit všechny vlnové délky. Nevýhoda tohoto optického zesilovače je ta, že do přenosu zavádí šum, neboť se může uvolnit foton s nežádoucí vlnovou délkou. Přesto se řešení s převodem jednotlivých vlnových délek na elektrické signály, které by se zesílily a převedly zpět na optický signál, nevyužívá, protože by bylo mnohem nákladnější. Zesilovač je vhodné umísťovat přibližně každých 100 km. Tato technologie je tedy obzvlášť výhodná na větší vzdálenosti (100 – 1000 km).

Další komponenta tohoto systému je takzvaný optický „add-drop“ multiplexor. Ten umožňuje vkládání či vyjmutí různých vlnových délek. Je-li potřeba v některém úseku trasy vložit či vyjmout určitou vlnovou délku a dále s ní pracovat, umístí se tam „add-drop“ multiplexor.

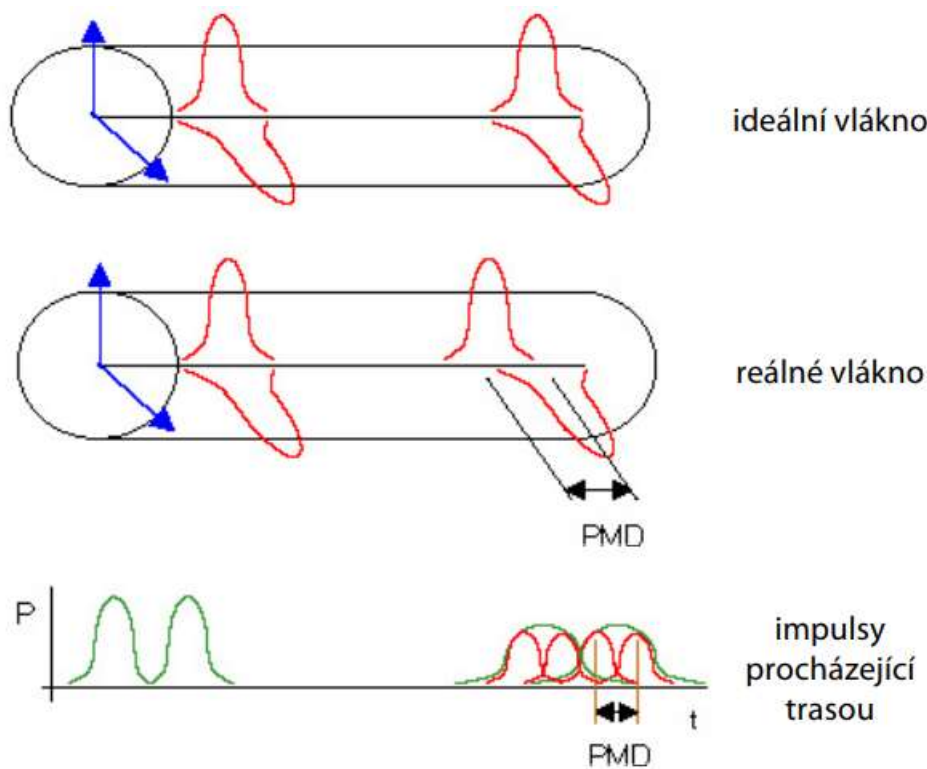
Na konci optické trasy se nachází demultiplexor, který odděluje ze svazku rozdílné vlnové délky na jednotlivé signály. Tyto komponenty mohou fungovat jak v pasivním módu, který využívá optických hranolů, filtrů a difrakčních mřížek, tak i v aktivním módu, který je řešen pomocí laditelných filtrů.

3.6. Polarizační vidová disperze (PMD)

Polarizační vidová disperze (PMD¹⁴) způsobuje zkreslení signálu, který prochází optickým vláknem. Tato disperze vzniká, protože optické vlákno není ideálně kruhové a homogenní. Signál se v jednovidovém vlákně šíří ve dvou navzájem kolmých rovinách. Skládá se tedy z horizontální a vertikální složky, které by měly v ideálním vlákně dorazit do cíle ve stejný okamžik. V reálném vlákně se signál v každé rovině šíří trochu jinou rychlostí. Z toho vyplývá, že v cíli trasy vzniká zpoždění. Polarizační vidová disperze omezuje maximální přenosovou rychlost a snižuje odstup signál šum. Hlavní problém této disperze je, že je těžší předvídatelná a ovlivňuje ji mnoho faktorů.

Působení je podobné působení níže popsané chromatické disperze. Chování je ovšem více náhodné. Příčina této disperze je způsobena mnoha faktory, nejen výrobou optického vlákna. Mimo výrobu vlákna je také velmi důležité kabelování trasy, při kterém vznikají různé ohyby a pnutí. Dále mají svůj vliv vibrace i teplotní změny. Kombinace všech těchto faktorů způsobuje značně náhodné chování. K náhodnosti přispívá i fakt, že si obě dvě roviny navzájem vyměňují energii. Znamená to, že je vhodné brát tuto disperzi jako náhodný kolísající jev. Z tohoto důvodu je tedy velmi obtížné ji jakkoliv kompenzovat. Naštěstí není její vliv tak výrazný jako u chromatické disperze. [5]

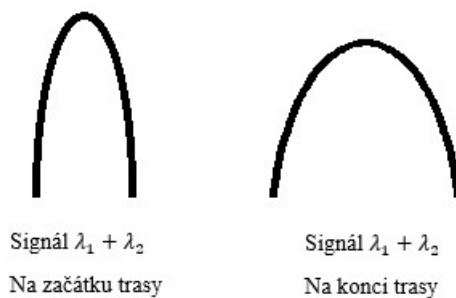
¹⁴ Polarisation Mode Dispersion



Obrázek 3.3: Polarizační vidová disperze v optickém vlákně. Převzato z [5].

3.7. Chromatická disperze (CD)

Chromatická disperze (CD¹⁵) je mnohem výraznější oproti výše popsané polarizační vidové disperzi. Způsobuje ji rozdílný index lomu pro odlišné vlnové délky. Jejím důsledkem vzniká rozdílná rychlost přenosu světla v závislosti na vlnové délce. Tedy pokud signál obsahuje více spektrálních složek, dorazí tyto složky do cíle v rozdílném čase. Signál se tedy průchodem vlákna časově roztahuje.



Obrázek 3.4: Signál s 2 spektrálními složkami s vlnovou délkou λ_1 a λ_2 – původní vlevo, roztažený vlivem chromatické disperze vpravo

¹⁵ Chromatic dispersion

Roztažení signálu je pak výraznější pro užší impulsy a vyšší přenosové rychlosti. Toto roztahování může způsobit, že signál zasáhne i do vedlejších bitů. Tím by vzniklo zkreslení přenášené informace. Dále si lze na obrázku 3.4 všimnout, že signál tímto roztahováním ztrácí energii. Chromatickou disperzi ovlivňuje jak materiál, ze kterého je optické vlákno vyrobené, tak i geometrické vlastnosti daného vlákna.

Velikost chromatické disperze určuje její koeficient $D(\lambda)$:

$$D(\lambda) = \frac{dt_g(\lambda)}{d(\lambda)} \quad (1)$$

Koeficient chromatické disperze udává změnu zpoždění signálu t_g v základních jednotkách $[\frac{ps}{nm*km}]$, neboli o kolik pikosekund se rozšíří signál po jednom kilometru trasy při spektrální šířce zdroje záření jednoho nanometru. Tento koeficient roste s délkou trasy a se spektrální šířkou zdroje záření. Vliv chromatické disperze lze omezit. Například vhodnou volbou indexu lomu již při výrobě optického vlákna. Dále lze tuto disperzi omezit správným výběrem zdroje záření.

Pro nulový koeficient se určuje nulová chromatická disperze λ_0 , která se pro většinu vláken pohybuje v rozmezí 1300 – 1324 nm. Důležitý je též sklon disperzní charakteristiky, pro nulový koeficient je sklon $S_0 = \frac{dD(\lambda_0)}{d\lambda}$. Koeficient $D(\lambda)$ lze pro konvenční optická vlákna vypočítat pro danou vlnovou délku s velmi dobrou přesností pomocí vztahu:

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right) \quad (2)$$

Je-li tento koeficient vypočítán, pak lze určit časové rozšíření signálu Δt :

$$\Delta t = D(\lambda) * \Delta\lambda * l \quad (3)$$

Kde $\Delta\lambda$ značí rozdíl nejmenší a největší vlnové délky spektra signálu a l značí délku optického vlákna. [6]

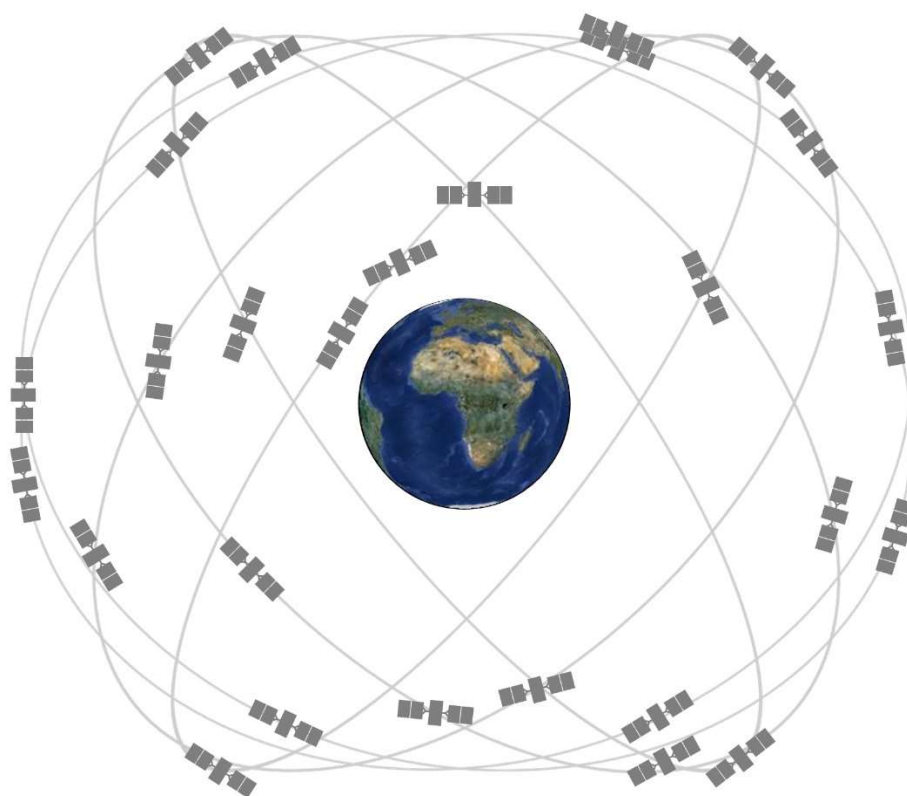
4. Satelitní systémy

V dnešní době se na větší vzdálenosti používají pro přenos času a frekvence satelitní systémy. Nejčastěji potom americký satelitní systém GPS, popřípadě ruský systém GLONASS¹⁶. Tyto systémy byly dlouhou dobu přístupné pouze pro armádní účely. To je již minulostí a tyto systémy byly zpřístupněny pro širokou veřejnost. Momentálně je ve vývoji i evropský satelitní systém Galileo či čínský Beidou.

¹⁶ Globalnaja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistěma

4.1. Satelitní systém GPS

Tento satelitní systém byl navržen pro 24 satelitů, které se pohybují po 6 oběžných dráhách. Momentálně se využívá až 32 satelitů. Oběžné dráhy mají přibližně kruhový tvar a jsou rovnoměrně rozmístěny kolem rovníku se sklonem 55° . Dráhy jsou od sebe posunuty o 60° . Průměrná vzdálenost družice od centra Země je kolem 26 600 kilometrů. Tedy přibližně 20 200 kilometrů od povrchu Země. [2] Původní plán počítal s rovnoměrným rozložením družic po 4 kusech na každou oběžnou dráhu. Nyní jsou družice rozmístěny nepravidelně po 5-6 kusech. I přes toto pokrytí existují na jihu i na severu Země odlehlá místa, kde nejsou satelity viditelné.



Obrázek 4.1: Satelitní systém GPS a jeho rozložení kolem Země. Převzato z [9].

Pro porovnávání časových stupnic pomocí satelitních systémů je potřeba reference. Tu mají satelitní systémy k dispozici, protože každá satelitní družice má svůj vlastní lokální časovou stupnici generovanou atomovými hodinami, které jsou součástí družice. Družice disponují cesiovými nebo rubidiovými hodinami podle typu produkce dané družice.

Nominální frekvence těchto atomových hodin je $f_0 = 10,23 \text{ MHz}$. Od této frekvence jsou dále odvozeny dvě mikrovlnné frekvence $f_1 = 1575,42 \text{ MHz}$ a $f_2 = 1227,60 \text{ MHz}$. Tyto dvě frekvence jsou nosnými frekvencemi pásem L1 a L2 a jsou stejné pro všechny družice. Před vysláním jsou fázově modulované s pseudonáhodným šumem. Vzniká tak binární C/A¹⁷ kódování (C/A kód) s čipovou frekvencí 1,032 MHz nebo precizní binární kódování (P kód) s čipovou frekvencí 10,23 MHz. Mezi kódy je fázový posun 90° . Tyto kódy jsou unikátní pro každou družici.

¹⁷ Coarse/Aquisition code

To znamená, že se takto dají jednotlivé družice identifikovat. Je zde tedy aplikovaná metoda CDMA¹⁸.

4.2. Satelitní systém GLONASS

Stejně jako GPS i tento systém byl navržen pro 24 družic, ovšem pouze pro 3 oběžné dráhy se sklonem 65°, které jsou od sebe posunuty o 120°. Družice obíhají přibližně ve výšce 19 000 km nad zemským povrchem. GLONASS má ve vysokých zeměpisných šířkách lepší viditelnost než GPS.

V principu se tento systém od systému GPS moc neliší. Jeden z rozdílů je ten, že systém GLONASS používá stejný kód pro všechny družice, zatímco jednotlivé satelity používají odlišnou nosnou frekvenci. Místo metody CDMA, která se používá v systému GPS, zde je použita metoda FDMA¹⁹. Když se objeví rušivý signál o stejné frekvenci tak, na rozdíl od GPS, se zde vyruší pouze signál z jedné družice, a ne z celého satelitního systému. Na druhou stranu, různé frekvence mají odlišné zpoždění. Je tedy obtížnější provést správnou kalibraci přijímače. Vysílání probíhá v pásmu 2 000 – 10 000 MHz. Nominální hodnoty pásem L1, L2 a L3 pro FDMA jsou definovány rovnicí (1).

$$f_{kLx} = f_{0Lx} + k\Delta f_{Lx} \quad (4)$$

V této rovnici k představuje frekvenční kanál, f_{0Lx} je frekvence pro dané frekvenční pásmo a Δf_{Lx} je diference mezi nosnými frekvencemi pro dané frekvenční pásmo. Konkrétněji pak:

Signál	f_0 [MHz]	Δf [kHz]
L1	1602	562,5
L2	1246	437,5
L3	1201	437,5

Tabulka 4.1: Nosné a diferenční frekvence pro GLONASS pásma. Převzato z [10].

4.3. Satelitní systém Galileo

Tento evropský projekt, pojmenovaný po slavném italském astronomovi, má své hlavní sídlo v Praze. Galileo by měl nabídnout civilní alternativu oproti převážně armádně zaměřeným systémům GPS a GLONASS. Systém je projektován pro 30 družic umístěných na třech oběžných dráhách se sklonem 56° a s posunem o 120°. 24 družic má být aktivních a 6 náhradních. Družice se nacházejí přibližně 23 300 km nad povrchem Země. Galileo je zatím stále ve vývoji. Momentálně je na oběžné dráze 22 družic. Předpokládá se, že systém bude do dvou let plně funkční.

Galileo, stejně jako GPS, používá pro všechny družice stejnou nosnou frekvenci a využívá tedy metodu CDMA. Frekvence pásem E1, E5 a E6 jsou vyobrazeny v tabulce 4.2.

¹⁸ Code Division Multiple Access

¹⁹ Frequency Division Multiple Access

Signál	f_0 [MHz]
E1	1575,42
E6	1278,75
E5	1191,795
E5a	1176,45
E5b	1207,14

Tabulka 4.2: Nosné frekvence pro frekvenční pásma systému Galileo.

5. Metody porovnávání času a frekvence

5.1. Úvod

Když v minulosti porovnávání atomického času a frekvence začínalo, neměli vědci možnost přenosu časového údaje na dálku. Činili tak pomocí přenosných cesiových hodin. Ovšem s pokrokem technologií se postupně začali objevovat možnosti, jak porovnávat časové stupnice i na velké vzdálenosti.

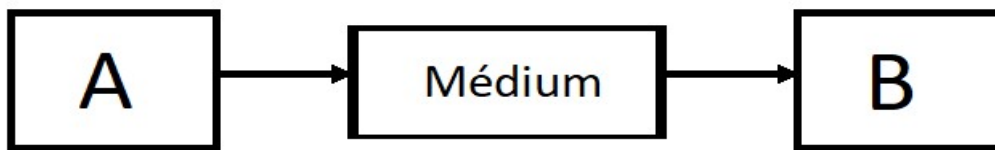
Nejprve se začala používat metoda využívající signálů pozemního rádiového navigačního systému LORAN²⁰, který původně vznikl pro námořní navigaci. K přenosu signálu LORAN využívá systému rádiových stanic umístěných podél pobřeží. Tyto stanice vysílají pulsy dlouhých radiových vln. [11] Dále vznikla možnost použít pro přenos televizní signál. Dnes se již však ke vzdálenému porovnání času a frekvence používají především metodiky využívající satelitních systémů a v poslední době se také začínají používat, pro vzdálenosti do stovek kilometrů, metody využívající optická vlákna.

5.2. Jednocestný přenos času a frekvence

Při jednocestném přenosu času a frekvence, nezávisle na typu přenosového média, se vysílá údaj o čase či frekvenci z jednoho zdroje k jinému zdroji pro porovnání či pro synchronizaci času a frekvence. Po přijetí vysílaného signálu často probíhá dekódování. Jednocestný přenos má výhody v jednoduchosti a také v možnosti vysílat pro více přijímačů zároveň.

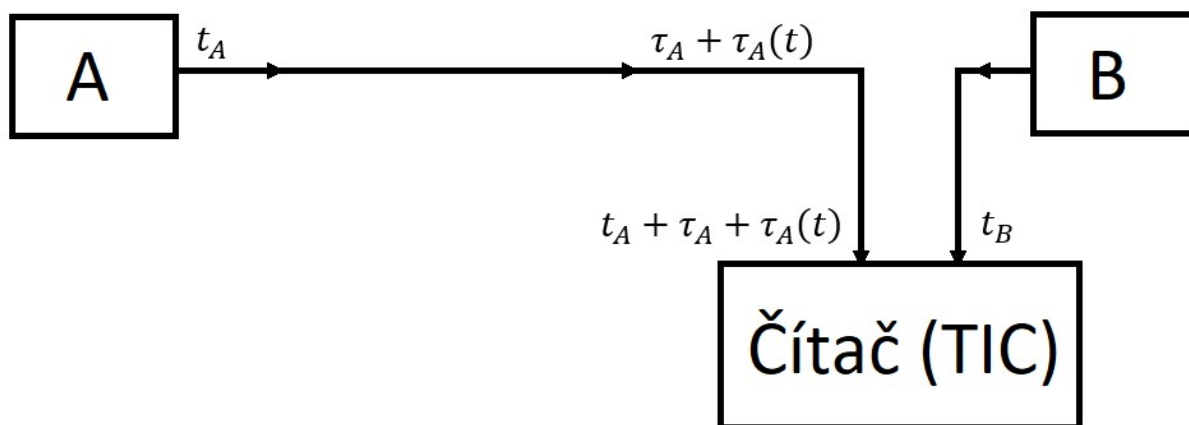
Na obrázku 5.1 lze vidět zjednodušené schéma pro jednocestný přenos z bodu A (zdroj času a frekvence) do bodu B (přijímač). Tímto přenosem vzniká zpoždění. Je zde tedy potřeba toto zpoždění korigovat. Pro vysokou přesnost je třeba znát fyzickou lokaci obou bodů i typ přenosového média. Jsou-li tyto informace k dispozici, lze zpoždění přenosu výpočtem korigovat.

²⁰ Long Range Navigation System



Obrázek 5.1: Zjednodušené schéma jednocestného přenosu z bodu A do bodu B přes libovolné médium

Pro porovnání času a frekvence dvou hodin jednocestnou metodou se používá čítač časových intervalů (TIC), viz obrázek 5.2. Hodiny A a B jsou porovnávány mezi sebou pomocí čítače, viz rovnice (5). Tento čítač je umístěn co nejbližší k hodinám B, aby zpoždění přenosu mezi hodinami B a čítačem bylo zanedbatelné. Když signál z hodin A dorazí, je čas přijetí měřen místními hodinami B. V tomto případě se tedy porovnávají hodiny A relativně k hodinám B.



Obrázek 5.2: Schéma zapojení s čítačem pro porovnávání času metodou jednocestného přenosu.

$$TIC = t_B - (t_A + \tau_A + \tau_A(t)) \quad (5)$$

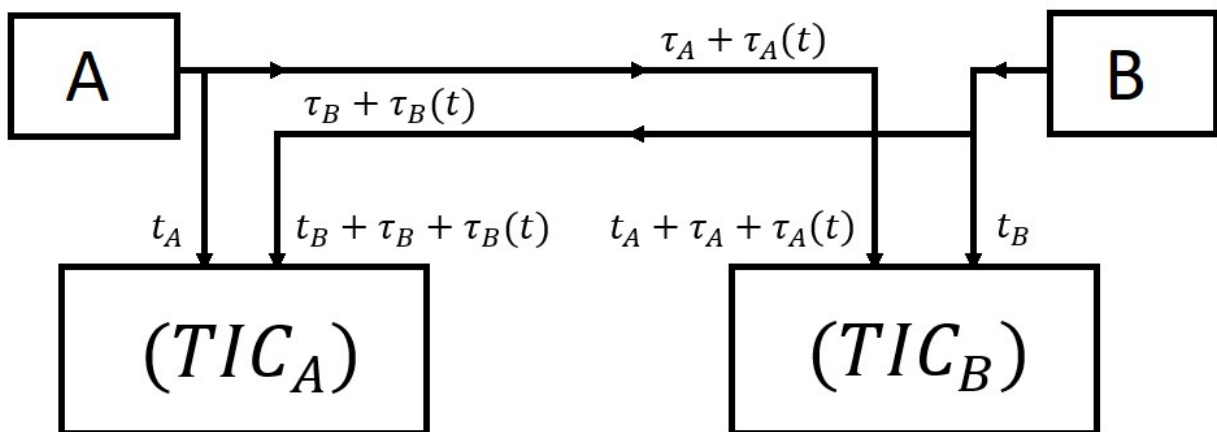
Zpoždění přenosu má jak konstantní složku τ_A , tak složku proměnlivou v čase $\tau_A(t)$.

Pro tento způsob přenosu času mezi dvěma body je třeba provést úvodní kalibraci, pomocí které se určí, za jakou dobu se signál přenesou z bodu A do bodu B. Toho je dosaženo posláním periodického signálu se známou nebo předpokládanou stabilitou. Jako médium se zde pro přenos využívá především systém GPS, ovšem také navigace LORAN či optická vlákna. Nevýhoda této metody spočívá v nižší přesnosti, která je způsobena proměnlivou časovou složkou zpoždění $\tau_A(t)$.

5.3. Dvoucestný přenos času a frekvence

Princip této metody spočívá v tom, že oba dva body (hodiny) vysílají a přijímají zároveň. Schéma zapojení pro tuto metodu je zobrazeno na obrázku 5.3. Porovnávání využívá dvou čítačů. TIC_A je umístěn co nejbližší k hodinám A, TIC_B co nejbližší k hodinám B. Na jeden vstup čítače je přiveden časový údaj okamžiku vyslání signálu PPS z místních hodin a na druhý pak časový údaj okamžiku přijetí PPS signálu vyslaného ze vzdálených hodin. Oba dva údaje jsou měřeny místními hodinami. Tedy čítač TIC_A porovnává hodiny A vůči hodinám B a čítač TIC_B porovnává hodiny B vůči hodinám A. Obě dvě porovnávání zahrnují zpoždění přenosu.

Kanály mohou být odděleny fyzicky (např. dvě různá optická vlákna) nebo logicky (např. oba kanály sdílí jedno optické vlákno, ale využívají odlišnou vlnovou délku). Jelikož trasa z bodu A do bodu B by měla mít teoreticky stejnou vzdálenost a stejné podmínky jako trasa z bodu B do bodu A, zpoždění by se měla vyrovnat. V reálných podmínkách ovšem tyto trasy nemusí být vždy symetrické a je zde potřeba provést kalibraci.



Obrázek 5.3: Schéma zapojení pro porovnávání času metodou dvoucestného přenosu

$$TIC_A = t_A - (t_B + \tau_B + \tau_B(t)) \quad (6)$$

$$TIC_B = t_B - (t_A + \tau_A + \tau_A(t)) \quad (7)$$

Nejsou-li přenosové kanály dostatečně symetrické, je potřeba do porovnání hodin zařadit faktor asymetrie $F(t)$, viz rovnice (8).

$$t_A - t_B = \frac{TIC_A - TIC_B - F(t)}{2} \quad (8)$$

5.4. Porovnání pomocí satelitních systémů

Nejčastější způsob pro porovnávání času a frekvence spočívá ve využití satelitních systému (GNSS). Každá družice má několik atomových hodin, čehož lze využít pro vysoce přesné časování. Jedny atomové hodiny družice jsou používány jako hlavní a ostatní slouží jako záloha. Většina hodin na Zemi je synchronizována podle koordinovaného světového času UTC. Pro atomové hodiny umístěné v družicích to neplatí, protože časová stupnice UTC je závislá na rotaci Země. Pro satelitní systém GPS proto vznikl takzvaný „GPS time“. Tato časová stupnice byla v roce 1980 nastavena podle časové stupnice UTC. Od té doby se tyto stupnice rozcházejí. Jelikož časová stupnice GPS není závislá na rotaci Země, není zde třeba vkládat skokové sekundy („leap seconds“), viz kapitola 2.3. Zprávy z družice obsahuje i informaci o rozdílu satelitní časové stupnice vůči stupnici UTC. GNSS přijímač tuto informaci využívá pro potřebný přepočet. Pro vysokou časovou přesnost vysílají všechny družice ve stejný čas. Aby toho bylo možné docílit, každých 12 hodin probíhá synchronizace. GNSS přijímač pak pro měření času používá krystalový oscilátor, který je pravidelně synchronizován pomocí atomových hodin z družic.

Nevýhoda využívání satelitních systému pro porovnávání času a frekvence spočívá v nižší přesnosti oproti například využití optických vláken. Ve skutečnosti je velmi obtížné dosáhnout pomocí satelitních systémů přesnosti pod 10 ns. Tato nižší přesnost je způsobena průchodem signálu atmosférou, ale také možnostmi odrazu signálu od okolních překážek, jako jsou vysoké budovy, skály atd. Inkonzistence v atmosféře ovlivňuje rychlost průchodu signálu. Z tohoto důvodu je vhodné vylučovat z měření družice s nevhodným pozorovacím úhlem. Nejpresnější jsou údaje z družic, které se při vysílání nacházejí přímo nad přijímačem, protože trasa signálu je v tomto případě nejkratší možná. Software vylučuje z měření všechny údaje, pro které je elevace nižší než 20°. V rámci formátu CGGTTS²¹ se vypočítává matematický model, který by měl tato zpoždění, která vznikla průchodem signálu ionosférou, popř. troposférou, kompenzovat.

K ovlivnění nejistot může dojít nejen po cestě, ale i uvnitř satelitního systému či přímo v lokální síti. Uvnitř satelitního systému může tyto nejistoty ovlivňovat stabilita satelitních hodin, přesnost časové stupnice daného satelitního systému, přesnost predikce efemeridu atd. Také v lokální síti přesnost měření ovlivňuje mnoho faktorů. Například nepřesnost v určení souřadnic antény, zpoždění antény a trasy mezi anténou a GNSS přijímačem, nepřesnost A/D převodníku, digitální zpracování v GNSS přijímači atd. Podle údajů z publikace [13] dosahují tyto nejistoty pro satelitní systém GPS následujících hodnot:

Zdroj Nejistoty	Nejistota
Ionosféra (< 1000 km)	3 – 15 ns
Troposféra (< 20km)	0,3 – 3 ns
Oběžná dráha GPS	6 ns (RMS ²²)
GPS hodiny	6 ns (RMS)
Odraz signálu	Kód: 1,5 – 3 ns

²¹ Consultative Committee for Time and Frequency Group on GNSS Time Transfer Standard

²² Root Mean Square – efektivní hodnota

Zdroj Nejistoty	Nejistota
Odraz signálu	Nosná: 15 – 30 ps
Šum přijímače	Kód: 0,75 – 1,5 ns (RMS) Nosná: 3 – 6 ps (RMS)

Tabulka 5.1: Hodnoty pro jednotlivé zdroje nejistot. Převzato z [13].

Existuje však mnoho metod pro zvýšení přesnosti měření. Například korekce ionosférického zpoždění na základě dvoufrekvenčního měření, či již zmíněný matematický model pro korekci ionosférického, ale i troposférického zpoždění. Nevhodné odrazy signálu od okolních překážek lze také korigovat dodatečným postprocessingem.

Pro zvýšení přesnosti je velmi důležitá kalibrace GNSS přijímače. Konkrétně kalibrace zpoždění mezi fázovým centrem antény a výstupem tohoto přijímače. Tento proces se obvykle dělí na tři samostatné kalibrace, a to kalibraci antény, kalibraci kabelů a kalibraci samotného přijímače.

Kalibrace přijímače probíhá pomocí simulátoru. Vnitřní zpoždění tohoto simulátoru odpovídá zpoždění, které vzniká mezi začátkem C/A či P kódování a vnitřním PPS pulzem, který je synchronizován s časem satelitního systému. Tento proces je blíže popsán například ve vědeckém článku [14]. Kalibrace Antény probíhá pomocí přenosu signálu uvnitř bezdozvukové komory s minimálními odrazy signálu. Pro tuto kalibraci je třeba znát zpoždění antény, které je závislé jak na frekvenci, tak i na teplotě. Pro přesnou kalibraci je tedy nutné tuto závislost změřit.

Není-li známa žádná dodatečná informace, potřebuje GNSS přijímač změřit alespoň 4 časové signály, jelikož zde jsou 4 neznámé v podobě 3 prostorových rozměrů a jednoho časového posunu. Je-li GNSS přijímač umístěn stále ve stejné poloze, lze tuto úlohu zredukovat pomocí přesně určených souřadnic polohy antény. V tomto případě stačí pouze jedna družice pro přesné určení času.

Metody pro porovnávání času a frekvence pomocí satelitních systémů se dají rozdělit do tří kategorií. Jednocestný přenos, metoda „Carrier Phase“ a metoda společného pozorování „Common View“. Pro kalibrace se pro svou jednoduchost, ale přesto dostatečnou přesnost nejčastěji používá jednocestný přenos. Další dvě zmíněné metody jsou již složitější a neobejdou se bez postprocessingu, a proto se používají pouze je-li třeba co možná nejvyšší přesnosti. Nejistoty těchto metod ovlivňuje mnoho faktorů, z nichž některé jsou zmíněny výše, a je tedy obtížné je určit. Podle vědeckého článku [3] by ovšem neměly přesáhnout hodnoty v tabulce 5.1.

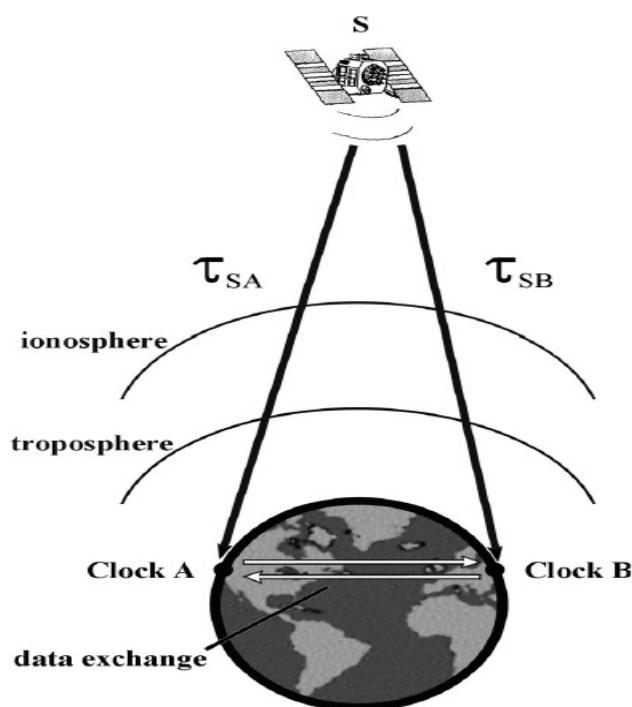
Metoda	Nejistota pro 24 hodin měření [ns]
Jednocestný přenos	< 20
„Common View“ s jedním kanálem	< 10
„Common View“ s více kanály	< 5
„Carrier-Phase Common View“	< 0,5

Tabulka 5.1: Nejistoty jednotlivých GNSS metod. Převzato z [3].

Výše uvedené metody jsou blíže popsány v rámci mé bakalářské práce [4]. Metoda společného pozorování „Common View“ s využitím více kanálů je navíc stručně popsána v následující kapitole, jelikož software vytvořený v rámci této diplomové práce využívá pro satelitní porovnávání právě tuto metodu.

5.4.1. Metoda společného pozorování „Common View“

Metoda „Common View“ využívá referenci atomových hodin v družici pouze jako médium. Ve skutečnosti porovnává hodiny jedné laboratoře s hodinami jiné laboratoře a to tak, že se porovnává difference mezi laboratorními hodinami a hodinami v družici pro obě laboratoře. Referenční čas družice se tedy vyruší. Dále se vyruší chyby, které jsou identické pro obě dvě laboratoře. Ve verzi s použitím více kanálů obě laboratoře přijímají pomocí GNSS přijímače data ze všech momentálně dostupných družic a tato data se následně v rámci postprocessingu zprůměrují. S touto metodou tedy nelze porovnávat laboratoře v reálném čase. Většinou jsou data od obou laboratoří k dispozici následující den a porovnávání tedy probíhá zpětně. Jsou-li porovnávané laboratoře od sebe vzdáleny do 1000 kilometrů, je velmi nepravděpodobné, že by v průběhu měření nastal okamžik, kdy by laboratoře neměly k dispozici žádnou společně pozorovatelnou družici. Průběh měření by tedy měl být plynulý.



Obrázek 5.4: Princip metody společného pozorování „Common View“. Převzato z [3].

Data z družic se vysílají jednou za 16 minut. Jelikož je možno danou družici sledovat následující den na stejném místě o 4 minuty dříve, i toto vysílání po 16 minutách je každý den posunuto o 4 minuty. V tomto 16minutovém intervalu jsou vyhrazeny 2 minuty pro navázání

spojení, 13 minut pro sbírání a průměrování dat a 1 minuta pro oddělení od následujícího měření. Metoda „Common View“ generuje nejpřesnější výsledky pro vzdálenost mezi laboratořemi do stovek kilometrů, a to z důvodu podobných pozorovacích podmínek a většího počtu společně pozorovatelných družic v daný okamžik. Pro zvýšení přesnosti této metody je vhodné používat stejné či podobné přijímací zařízení v obou laboratořích a co nejpřesněji určit pozici antény. Nejistoty této metody nejvíce ovlivňuje zpoždění ionosféry a troposféry, nevhodné odrazy signálu od okolních objektů, chyby efemeridu, ale i zpoždění vzniklé mezi anténou a zařízením.

5.5. Porovnání pomocí optických vláken

Optická vlákna sloužící jako médium pro přenos času a frekvence se v poslední době stala středem pozornosti mnoha laboratoří času a frekvence. Toto médium lze použít jak při jednocestné metodice přenosu času a frekvence, tak i pro dvoucestnou metodiku. Tato část se bude zabývat především dvoucestnou metodikou, se kterou pracuje software vytvořený v rámci této diplomové práce.

Schéma dvoucestné metody je zobrazeno na obrázku 5.3. Toto porovnání zahrnuje dva adaptéry, které jsou propojeny buď jednou obousměrnou optickou linkou, nebo dvěma jednosměrnými. Tyto adaptéry vysílají signál PPS lokálních hodin a zároveň přijímají signál PPS odeslaný ze vzdálených hodin, se kterými se lokální hodiny porovnávají. Při využití dvou jednosměrných optických linek nastává problém v rozdílné délce těchto vláken, protože v reálných podmínkách nelze zaručit jejich identickou délku. Vzniká zde asymetrie zpoždění Δt , kterou je potřeba zjistit pro správnou kalibraci, viz rovnice (9).

$$\Delta t = Z_{\text{zpoždění}}_{AB} - Z_{\text{zpoždění}}_{BA} \quad (9)$$

Řešení s jednou obousměrnou optickou linkou má výhodu v identické vzdálenosti přenosu v obou směrech. Signály využívají vlnového multiplexu, vysílají tedy na odlišných vlnových délkách. Jelikož rychlost šíření a chronická disperze v optickém vlákne závisí na vlnové délce, vzniká i zde asymetrie zpoždění Δt , viz rovnice (10).

$$\Delta t = D(\lambda) * \Delta \lambda * l + D_{\text{passive}} \quad (10)$$

$D(\lambda)$ – koeficient chromatické disperze

$\Delta \lambda$ – rozdíl vlnových délek

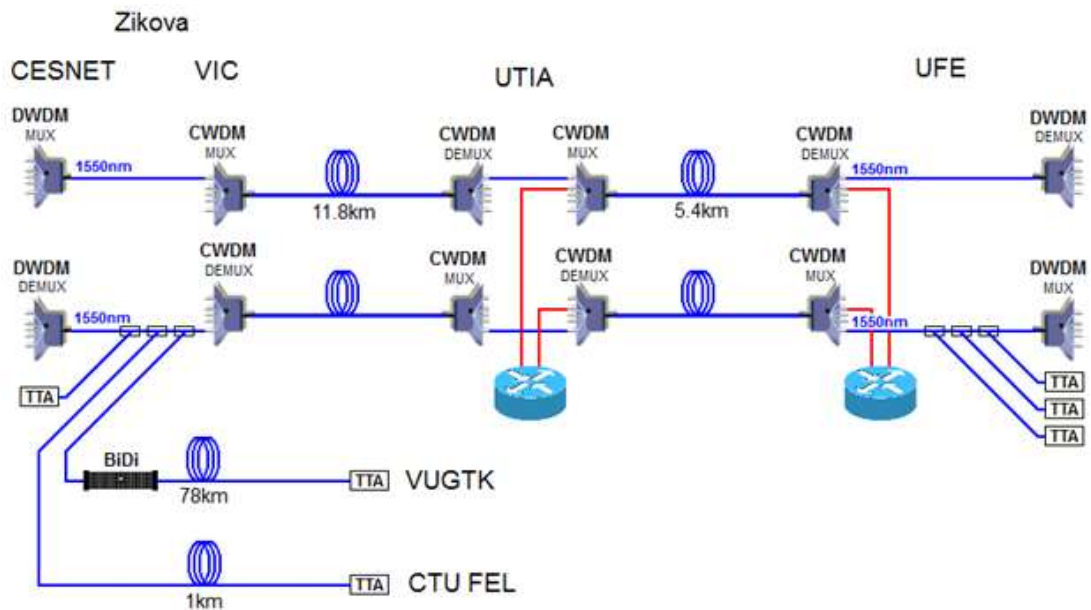
l – délka optické linky

D_{passive} – chromatická disperze pasivních elementů

Ve výše uvedené rovnici (10) ovšem nejsou zohledněny nejistoty přenosu. Tyto nejistoty způsobuje hned několik různých fyzických jevů, jako například závislost indexu lomu a chromatické disperze na teplotě. [7]

Na následujícím obrázku 5.4 je zobrazena trasa optické linky mezi Laboratoří přesného času a frekvence FEL a Laboratoří Státního etalonu času a frekvence (LSEČF ÚFE²³)

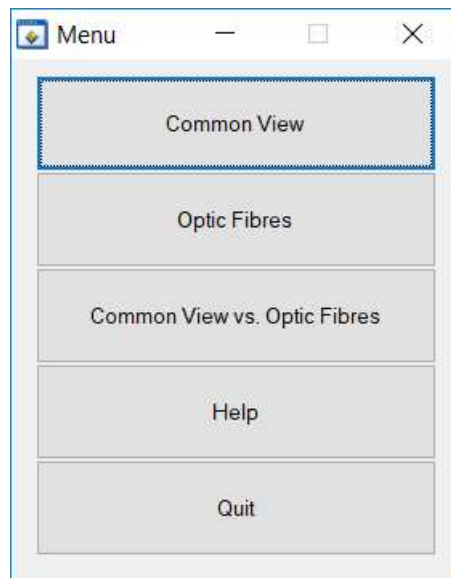
²³ Laboratoř Státního etalonu času a frekvence – Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR



Obrázek 5.4: Schéma trasy optické linky mezi FEL ČVUT a LSEČF ÚFE. Převzato z [15].

Detailní popis této trasy i s tabulkou nejistot zpoždění lze nalézt v práci [8]. Celková délka trasy, jak lze vyčíst z obrázku 5.4, činí 18,2 km.

6. Software



Obrázek 6.1.: Úvodní menu programu.

Tento software je vytvořen v programu LabWindows/CVI a je psán v jazyce C. Software je k dispozici v Laboratoři Přesného času a frekvence FEL ČVUT. Slouží ke zpracování

naměřených dat pomocí metod společného pozorování „Common View“, dvoucestného přenosu času po optických vláknech a vzájemného porovnání těchto dvou metod. Po spuštění programu se objeví grafické okno „Menu.uir“, které obsahuje úvodní menu, viz obrázek 6.1. V tomto menu si lze vybrat mezi výše zmíněnými metodami, dále je zde možnost otevření nápovědy pomocí tlačítka „Help“. Samozřejmě nechybí tlačítka „Quit“ pro vypnutí programu. Inicializace všech těchto možností probíhá v rámci zdrojového souboru „Main.c“. Po vybrání jedné ze tří metod se program přepne do grafického okna pro zpracování dané metody a menu se přesune do horní lišty, kde lze mezi metodami libovolně přepínat. Nápověda se také přesune do horní lišty. Toto rozložení si lze prohlédnout např. na obrázku 6.2.

Dále se v horní liště nachází možnost zobrazit převaděč časových formátů. Tento převaděč převádí mezi sebou časové formáty UTC, MJD²⁴ a UnixTime. Metody pro tento převaděč se nacházejí ve zdrojovém souboru „TimeConvProgram.c“. Metoda „TimeToUnix“ slouží k převodu z časového formátu UTC do unixového času. Tedy jako vstupní argumenty této metody se zadává příslušný den, měsíc, rok, hodina, minuta a sekunda a metoda vrací příslušný vypočítaný unixový čas. Metoda „UnixToTime“ dělá pravý opak. Jako argument se zde zadává jednak unixový čas, ale i proměnná (1-6), která určuje, jestli metoda bude vracet den, měsíc, rok, hodinu, minutu nebo sekundu. Dále se zde nachází metody „UnixToMjd“ a „MjdToUnix“, které slouží k převodu mezi časovými formáty „UnixTime“ a MJD.

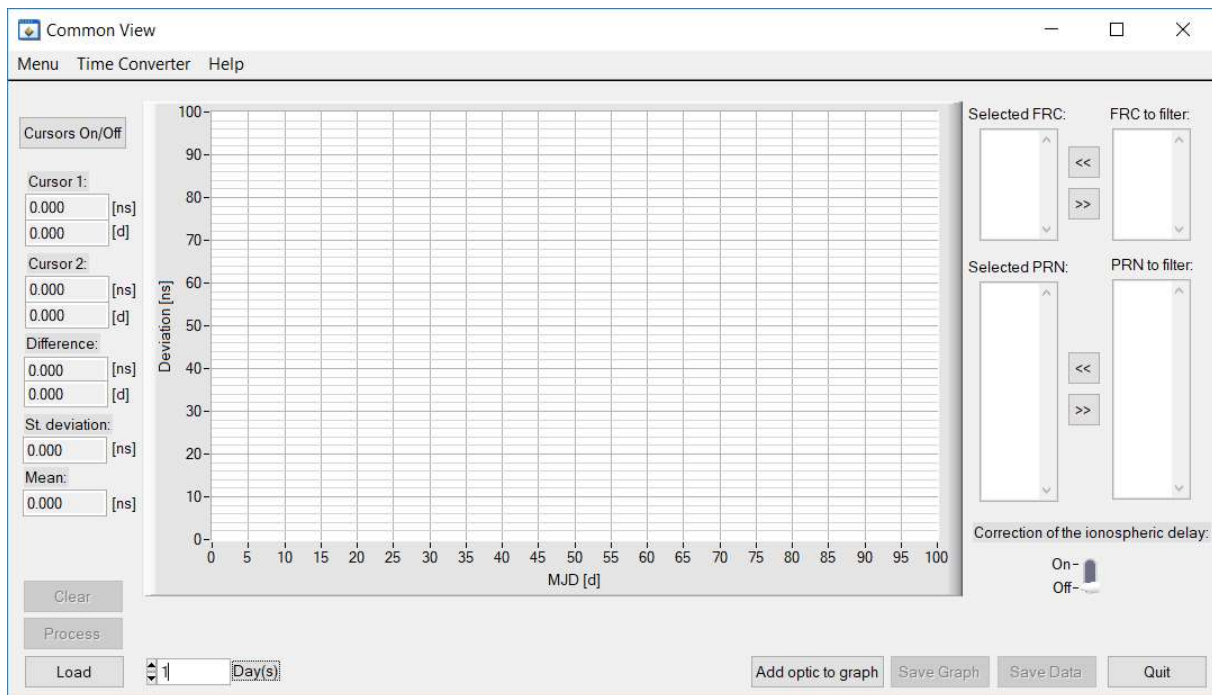
Většina proměnných pro tento program je definována v hlavičkovém souboru „Structs.h“, kde jsou rozděleny do struktur pro jednotlivé části programu.

6.1. Metoda společného pozorování „Common View“

Po kliknutí na tlačítka „Common View“ se otevře grafické okno „CVgraphics.uir“ pro zpracování této metody, viz obrázek 6.2. Metoda je blíže popsána v kapitole 5.4.1.

Pro tuto metodu se používají data z družic, které poskytuje GNSS přijímač GTR, a to ve formátu CGGTTS. Tento formát je detailněji popsán například v [4]. Laboratoře ovšem využívají různé verze CGGTTS. Software byl tedy otestován pro několik verzí tohoto formátu. Nejčastější verze, kterou poskytuje i Laboratoř přesného času a frekvence FEL ČVUT, je verze 2.0 s 24 sloupci. Dále se vyskytuje verze 1.0 s 21 sloupci ve které chybí sloupce FR, HC a FRC, které poskytují informaci o číslech kanálů přenosové frekvence a přijímače a o použitém frekvenčním kódu. Tato verze využívá frekvenční kód L1C satelitního systému GPS. Také se vyskytuje verze, kde jsou naopak 2 sloupce navíc. Tuto verzi některé laboratoře využívají při použití frekvenčního kódu L3P. V těchto dvou přidaných sloupcích PS 1 a PS 2 jsou zaznamenány frekvenční kódy, které byly použity pro lineární kombinaci, ze které vznikl kód L3P.

²⁴ Modified Julian Date



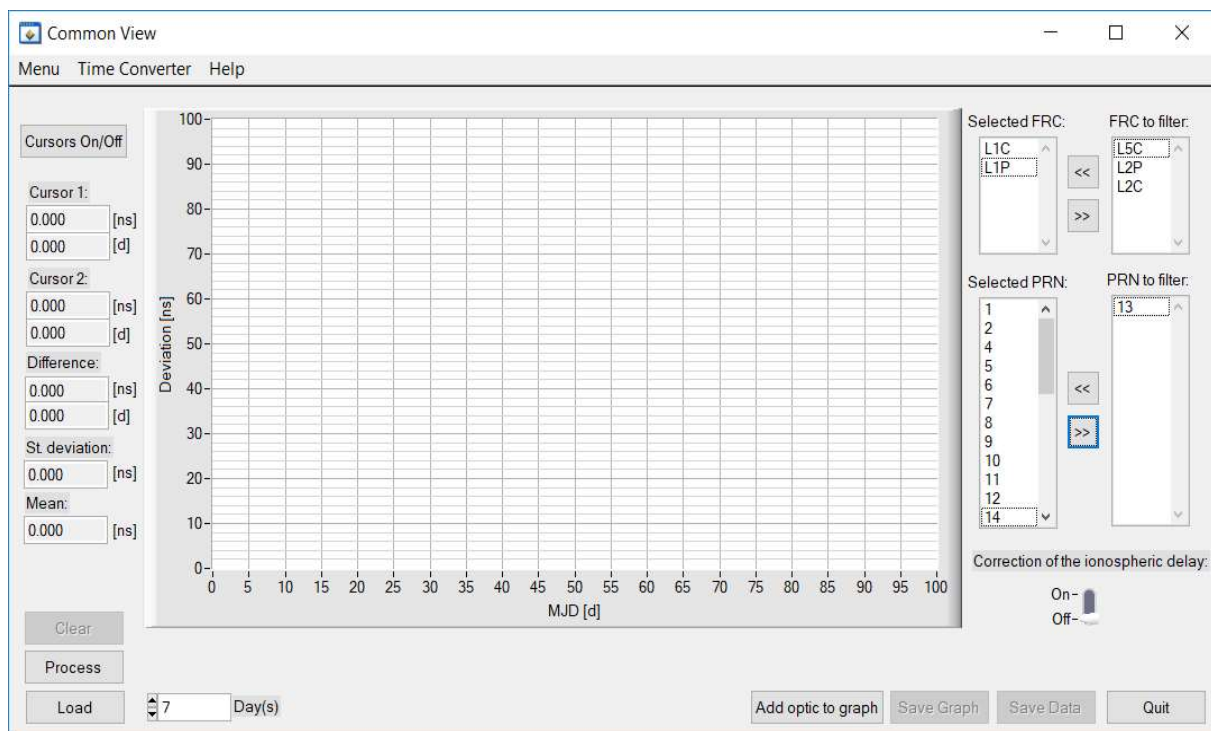
Obrázek 6.2: Okno programu pro metodu „Common View“.

Pro nahrání souborů CGGTTS dvou laboratoří, které se budou porovnávat, slouží tlačítko „Load“. Před nahráním souborů si lze v kolonce „Day(s)“ nastavit, kolik dní se bude porovnávat. Data jsou ukládána do souborů po dnech. Kolik dní se zde nastaví, tolik souborů od obou laboratoří se bude porovnávat. Po kliknutí na tlačítko „Load“ se spustí zpětné volání (tzv. „Callback“), které se nachází ve zdrojovém souboru „CVprogram.c“. Toto volání vytvoří vlákno „ThreadLoadFunctionCV“, které bude obsluhovat nahrávání dat ze souborů. Zobrazí se tedy vyhledávací okno pro vkládání souborů. Jako první se vybírá soubor hlavní laboratoře, která se bude porovnávat vůči vedlejší laboratoři. Soubory jsou pojmenovány podle daného dne ve formátu MJD. Po vybrání daného souboru si program zapamatuje MJD vybraného dne a zobrazí se okno pro vybrání souboru vedlejší laboratoře, kde se primárně zobrazí jen soubory s tím samým MJD. Názvy souborů pro následující dny si program vygeneruje pomocí funkcí ze zdrojového souboru „GetFileNameCV.c“.

Nahrávání dat ze souborů probíhá ve funkci „Load“, která se volá vždy pro každý den znovu. Funkce má 3 vstupní parametry. Názvy dvou souborů, ze kterých se mají data načítat a proměnnou, která určuje, zda se jedná o první den z vybraného období či o dny následující. V rámci této funkce se dále volá funkce „Common“. Tato funkce obsahuje část, kde se data nahrávají a převádějí do správného formátu. Dále se zde zaznamenávají čísla PRN dostupných družic a dostupné frekvenční kódy, které se pomocí funkce „PrintToListFRC“ a „PrintToListPRN“ vyobrazí v grafickém okně, aby si uživatel mohl vybrat, která data bude chtít zpracovat. Všechny funkce, které obsluhují tyto listy frekvenčních kanálů a družic, se nacházejí ve zdrojovém souboru „CVlist.c“.

Po nahrání souborů se zpřístupní tlačítko „Process“ a ve sloupcích „Selected FRC“ a „Selected PRN“ se zobrazí všechny frekvenční kanály a čísla družic, které jsou k dispozici pro obě dvě laboratoře. Program zpracovává data ze všech družic a frekvenčních kanálů, které jsou v tomto sloupci. Primárně se tedy zpracovávají data ze všech dostupných frekvenčních kanálů, nicméně

uživatel má možnost si pomocí tlačítka „>>“ libovolně vybrané kanály či družice přesunout do sloupce „FRC to filter“ resp. „PRN to filter“. Takto přesunuté kanály a družice se vyfiltrují a zpracovávat se nebudou. Je tu vždy možnost si odebraný kanál či družici znovu do sloupce „Selected FRC“ resp. „Selected PRN“ přidat pomocí tlačítka „<<“. Dále má uživatel možnost zapnout, popřípadě vypnout korekci ionosférického zpoždění. Zapnout tuto korekci se doporučuje při vzájemné vzdálenosti porovnávaných laboratoří větší než 500 km. Je-li vše nastaveno, stačí už jen použít tlačítko „Process“, kterým se spustí zpracování dat.



Obrázek 6.3: Okno programu pro metodu „Common View“ po nahrání dat ke zpracování.

Na obrázku 6.3 lze vidět okno po nahrání dat. Tlačítko „Process“ pro zpracování dat je zpřístupněno. Data se zpracovávají podle metodiky Laboratoře Státního etalonu času a frekvence (LSEČF). Zmáčknutí tohoto tlačítka spustí zpětné volání, které vytvoří vlákno „ThreadProcessFunctionCV“ pro obsluhu zpracování dat. Toto vlákno pak volá funkci „Compare“, která se nachází ve zdrojovém souboru „CVfilter.c“ a přiřazuje k sobě správná data obou laboratoří na základě uživatelem nastavených filtrů. Tato funkce obsahuje možnosti „withFRC“ a „withoutFRC“, protože verze CGGTTS 1.0 neobsahuje sloupec s FRC kódy. V tomto případě se nastaví k porovnávání frekvenční kód L1C, který tato verze využívá. Zpracovávají se pouze data, pro které platí, že pozorovací úhel daného satelitu nesmí být menší než 20° a zároveň efektivní hodnota zbytků po lineárním vyrovnání nesmí být větší než 5 ns.

Algoritmus pro přiřazování správných dat vezme údaj hlavní laboratoře a v rámci toho samého dne začne vyhledávat kompatibilní údaj v datech z druhé laboratoře. Toho je možno dosáhnout, protože si program při nahrávání dat zapamatoval indexy pro začátky jednotlivých dnů. Je-li kompatibilní údaj nalezen, zaznamená se index těchto spárovaných dat a vyhledávání pokračuje pro následující údaj hlavní laboratoře. Jakmile je informace o čase pořízení dat vedlejší laboratoře vyšší než u hlavní laboratoře, znamená to, že kompatibilní údaj mezi daty vedlejší laboratoře není. Ukončí se tedy cyklus pro vyhledávání dat ve vedlejší laboratoři a pokračuje se pro následující údaj hlavní laboratoře.

Proběhne-li toto spárování kompatibilních dat obou laboratoří, zavolá se funkce „getGNSS“. Tato funkce vypočítává diferenci diferencí dvou laboratoří vůči systému GNSS. Diference obou laboratoří vůči systému GNSS je již vypočtena v rámci formátu CGGTTS. Tato funkce tedy udělá diferenci těchto dvou údajů „REFSYS“.

$$REFSYS_{Hlavní} = Hlavní\ čas - GNSS\ čas \quad (11)$$

$$REFSYS_{Vedlejší} = Vedlejší\ čas - GNSS\ čas \quad (12)$$

$$\Delta t = REFSYS_{Hlavní} - REFSYS_{Vedlejší} = Hlavní\ čas - Vedlejší\ čas \quad (13)$$

Je-li vypnuta korekce ionosférického zpoždění, je třeba do difference zapojit i matematický model „MDIO“ spočítaný pro toto zpoždění v rámci formátu CGGTTS, viz rovnice (14).

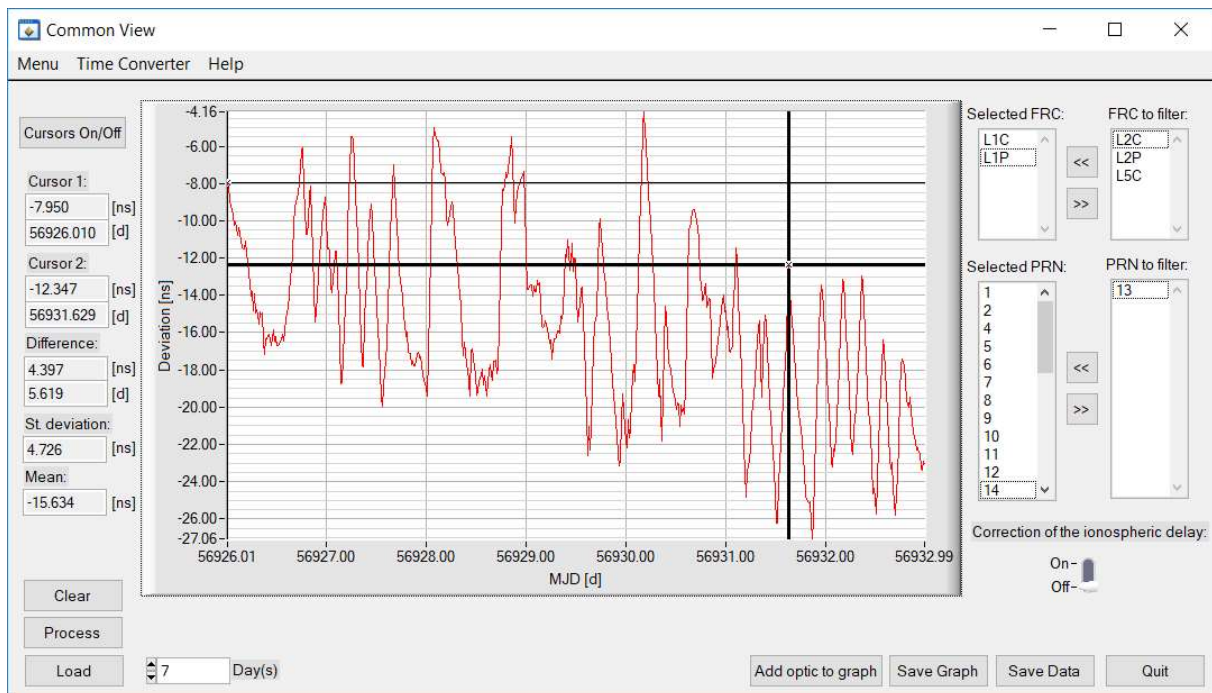
$$\Delta t = (REFSYS_{Hlavní} \mp MDIO_{Hlavní}) - (REFSYS_{Vedlejší} + MDIO_{vedlejší}) \quad (14)$$

Následuje volání funkce „getdMJD“. Ta vypočítá pro každý údaj porovnání jeho MJD i s desetinnými místy, viz rovnice (15). Při tomto výpočtu nejsou zahrnuty sekundy, jelikož se vždy jedná o celé minuty.

$$dMJD = MJD + (Počet\ Hodin * 60 + Počet\ Minut) / 1440 \quad (15)$$

Poté se volá funkce „Averaging“, která slouží pro průměrování diferencí jednotlivých družic. Tato funkce spočítá průměr hodnot ze všech použitých družic pro daný čas a poté vypočte pro každou družici odchylku od tohoto průměru a také směrodatnou odchylku. Pokud je odchylka od průměru pro danou družici větší než trojnásobek směrodatné odchylky, program zjistí, pro kterou družici v daném čase je odchylka od průměru největší a toto měření vyloučí. Poté se znovu spočítá průměr, odchylky od průměru a směrodatné odchylky a kontrola podmínky se opakuje, dokud není splněna. Pokud jsou k dispozici již pouze dvě družice a podmínka stále není splněna, pak se celé měření pro tento časový údaj vyloučí.

Jsou-li data zpracována, program je zobrazí do grafu. Dále zobrazí směrodatnou odchylku a průměr, viz obrázek 6.4.

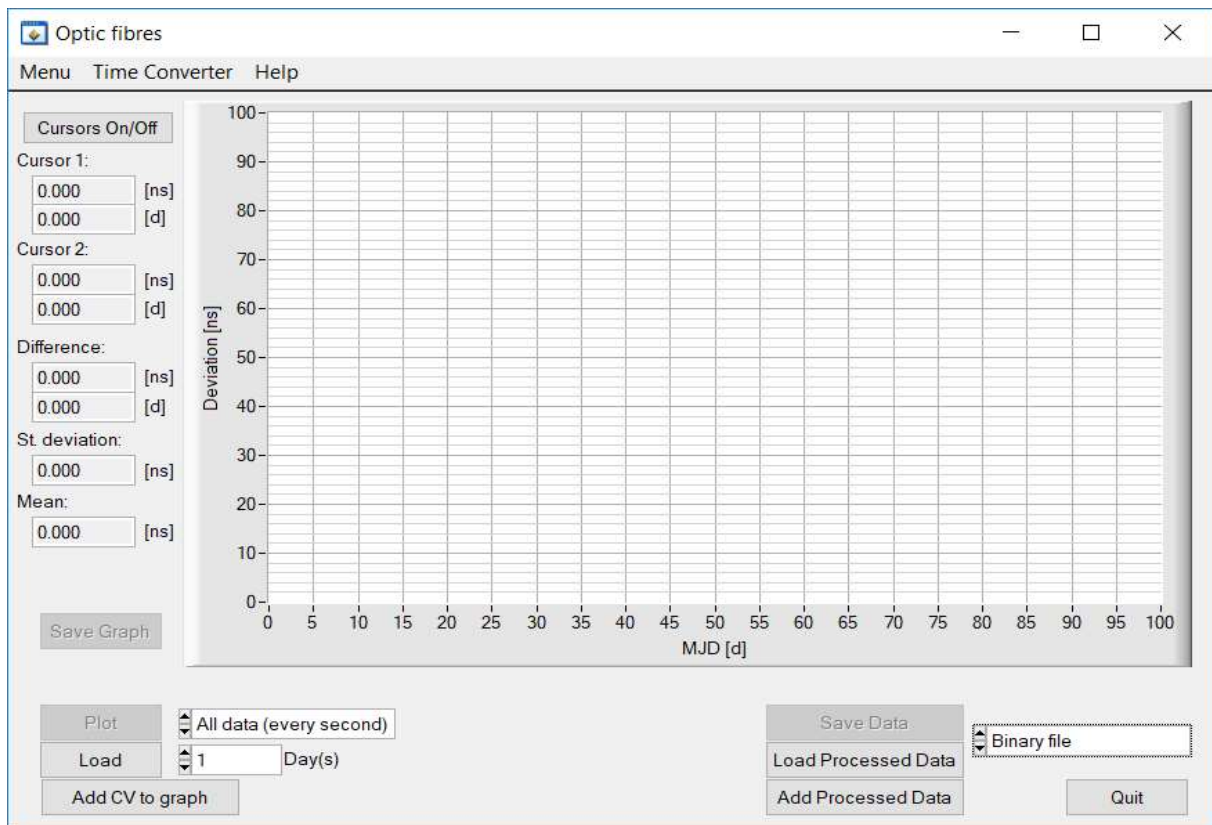


Obrázek 6.4: Okno programu pro metodu „Common View“ po zpracování dat.

Software umožňuje zobrazit více průběhů do grafu najednou. Každý průběh se pak zobrazí jinou barvou. Pro smazání grafu slouží tlačítko „Clear“. Pro práci s grafem jsou k dispozici kurzory, které se zapínají, popřípadě vypínají tlačítkem „Cursors On/Off“. Dále lze v grafu přibližovat pomocí kombinace klávesy Ctrl a přetáhnutím s levým kliknutím myši přes oblast, která se bude přibližovat (tzv. „Zoom to Rectangle“). Zpracovaná data se dají uložit tlačítkem „Save Data“ do textového souboru, kde se do prvního sloupce zapíše údaje o čase ve formátu MJD a do druhého sloupce údaje o odchylce mezi dvěma porovnávanými časovými stupnicemi. Tento textový soubor slouží mimo jiné jako vstup pro třetí část toho programu, kde se porovnává metoda „Common View“ a metoda dvoucestného přenosu času po optických vláknech mezi sebou. Dále lze uložit graf jako obrázek ve formátu .png pomocí tlačítka „Save Graph“.

6.2. Metoda dvoucestného přenosu času po optických vláknech

Po kliknutí na tlačítko „Optic fibres“ se zobrazí grafické okno „OPTgraphicsRAW.uir“, viz obrázek 6.5. Toto okno slouží pro zpracování dat metodou dvoucestného přenosu času po optických vláknech. Tato metoda je blíže popsána v kapitole 5.3.



Obrázek 6.5: Okno programu pro metodu dvoucestného přenosu času po optických vláknech.

Stejně jako v předchozím případě, i zde jsou data k dispozici v souborech po jednotlivých dnech. Program má tedy opět možnost zvolit si počet dnů, které se budou zpracovávat. Oproti metodě „Common View“, kde pro každý den byly potřeba dva soubory, zde jsou potřeba soubory čtyři. To vyplývá ze skutečnosti, že se jedná o metodu dvoucestného přenosu.

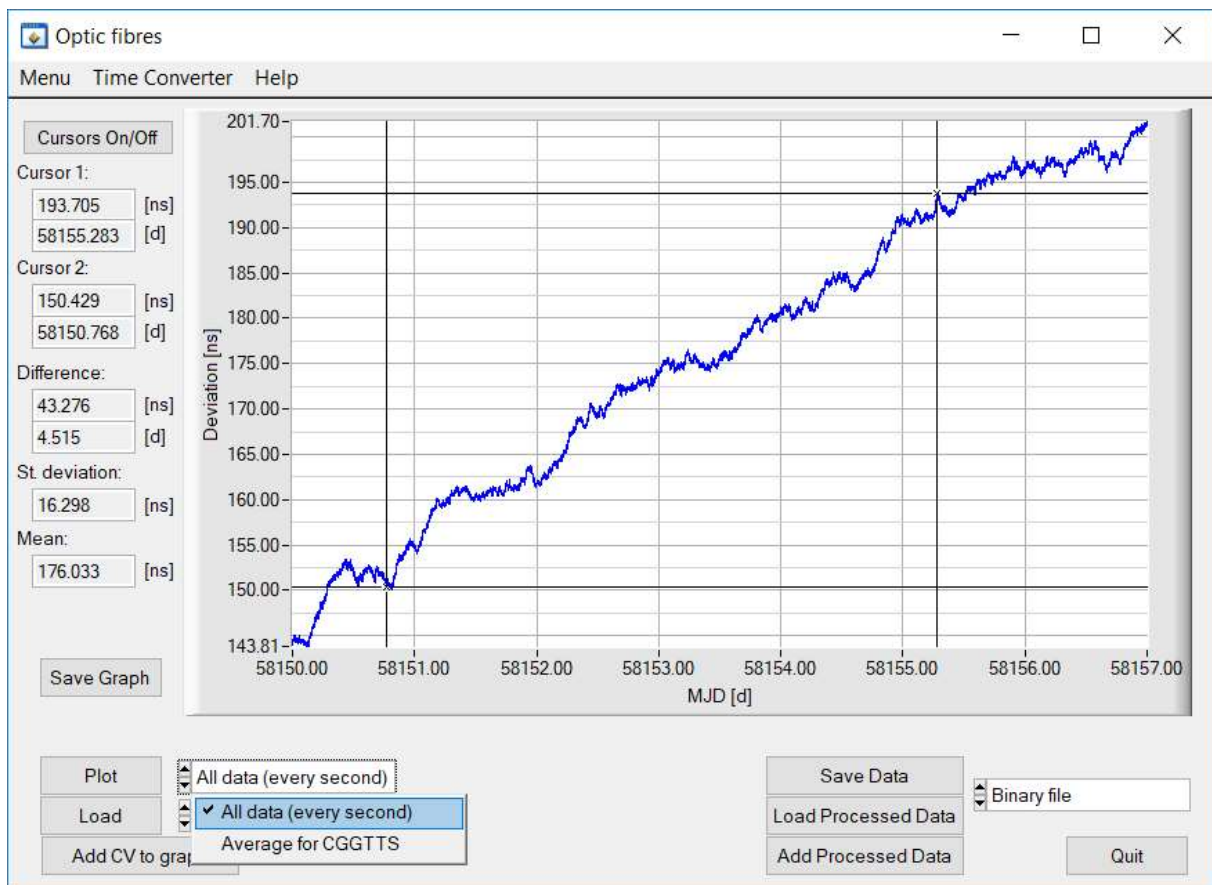
Po kliknutí na tlačítko „Load“ se pomocí zpětného volání spustí vlákno „ThreadLoadFunction“, které obsluhuje nahrávání dat ze souborů. Zobrazí se okno, kde si uživatel nejdříve vybere soubor s údaji o přijetí sekundového pulzu hlavní laboratoří pro daný den, který ho zajímá. Program si zapamatuje tento den a pro další okno, kde si uživatel vybírá soubor s údaji o odeslání sekundového pulzu z hlavní laboratoře, se zobrazí již soubory pouze pro tento zapamatovaný den. Dále následuje výběr souboru s údaji o přijetí sekundového pulzu ve vedlejší laboratoři, a nakonec se vybere soubor s údaji o odeslání sekundového pulzu z vedlejší laboratoře. Jelikož se jedná o sekundový puls, znamená to, že soubor obsahující údaje z jednoho dne má 86400 řádků. Program musí pro každý den načíst tyto soubory čtyři, tedy 345600 řádků. Z tohoto důvodu program tento proces monitoruje a zobrazuje progres jak v procentech, tak i graficky.

Vlákno volá pro každý den funkci „LoadOPT“, která má 5 vstupních parametrů, a to MJD daného dne a názvy 4 souborů. Jelikož mohou ve kterémkoliv souboru pro danou sekundu údaje chybět, obsahuje tato funkce algoritmus, který pro každou sekundu kontroluje, zda je aktuální unixový čas ve všech souborech totožný. Pokud tomu tak není, pak v souboru s nejnižším unixovým časem funkce přeskočí na následující údaj. Toto se opakuje, dokud

unixové časy všech 4 souborů nejsou totožné. Je-li vše v pořádku, tak funkce provede výpočet podle rovnice (8).

Dále se zavolá funkce „ProcessOPT“. Ta na začátku zkontroluje, zda neběží jiné vlákno, které využívá funkci „CGGTTScompute“. Pokud běží, tak počká až se ukončí. Jakmile je předchozí podmínka splněna, zavolá se funkce „CGGTTScompute“, která slouží pro zprůměrování sekundových údajů z této metody kompatibilně s metodou „Common View“. Toto průměrování je potřebné, neboť se výsledky této metody s údaji pro každou sekundu porovnávají s výsledky metody „Common View“, kde jsou data k dispozici jednou za 16 minut.

Po načtení a zpracování dat se zpřístupní tlačítka „Plot“, „Save Graph“ a „Save Data“. Pro zobrazení do grafu si lze vedle tlačítka „Plot“ vybrat, zda se zobrazí údaje pro každou sekundu, nebo zprůměrované údaje kompatibilní s metodou „Common View“.



Obrázek 6.6: Okno programu po zobrazení zpracovaných výsledků pro každou sekundu.

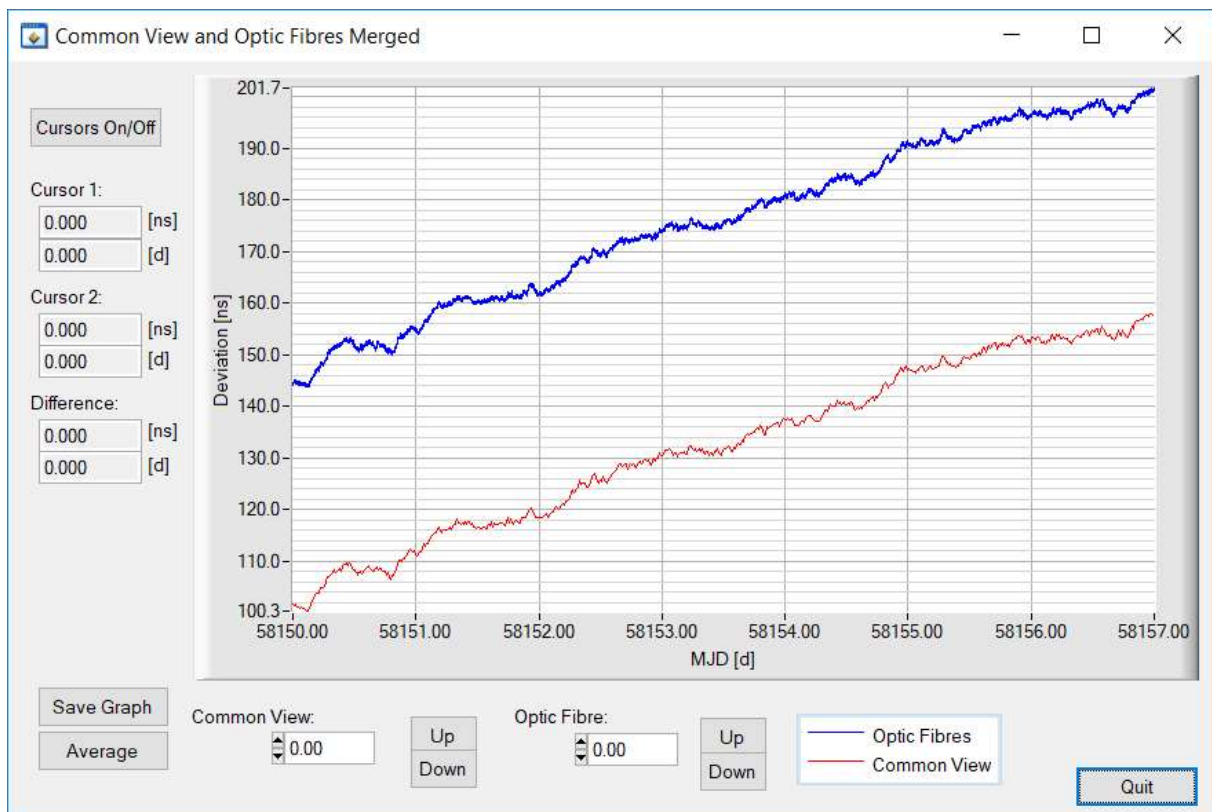
Stejně jako u předchozí metody, i zde se spočítá směrodatná odchylka a průměr. Pro práci s grafem je zde opět možnost zapnutí či vypnutí kurzorů tlačítkem „Cursors On/Off“ a funkce přibližování. Tlačítkem „Save Graph“ se uloží aktuální zobrazený graf jako obrázek ve formátu .png. Tlačítkem „Save Data“ se uloží zpracovaná data, a to podle volby v kolonce vpravo od tlačítka. Na výběr je mezi třemi způsoby uložení.

- První možnost je uložit pouze zprůměrovaná data kompatibilní s metodou „Common View“ do textového souboru. Tento soubor lze použít jako vstup pro porovnávání těchto dvou metod.

- Druhá možnost je uložit data pro každou sekundu do textového souboru. Pro textové ukládání opět platí, že první sloupec platí pro časový údaj a druhý sloupec pro údaj o odchylce.
- Jelikož jsou tato data velmi objemná, je zde ještě třetí možnost, a to uložit data pro každou sekundu do binárního souboru. Mimo to, že má binární soubor menší velikost, je tato volba vhodná také z důvodu rychlejšího načítání souboru.

Tlačítkem „Load Processed Data“ lze již jednou zpracovaná a uložená data opět nahrát, a to ve všech třech výše uvedených možnostech. Opět se pomocí zpětného volání vytvoří vlákno, které toto nahrávání obsluhuje. Pokud se nahrají pouze zprůměrovaná data, nejsou data pro každou sekundu k dispozici. Ovšem pokud se nahrají data pro každou sekundu, musí toto vlákno použít funkci „CGGTTScompute“ a data kompatibilní s metodou „Common View“ opět vypočítat. Dále je zde možnost uložená data pospojovat. Jsou-li v programu nahrána nějaká data a jsou-li k dispozici uložená data pro následující dny, lze tyto data přidat pomocí tlačítka „Add Processed Data“. Tato možnost je vhodná, pokud se různé časové úseky zpracovávaly odděleně, ale nyní je potřeba je zobrazit spolu.

Pokud jsou v programu k dispozici data zpracovaná oběma metodami, pak je zde možnost pomocí tlačítka „Add CV to Graph“ v okně pro optická vlákna či tlačítkem „Add Optic to Graph“ v okně pro „Common View“ zobrazit výsledky do jednoho společného grafu. Zobrazí se nové grafické okno „OPTandCVgraphics.uir“, viz obrázek 6.7. Funkce pro toto okno se nachází ve zdrojovém souboru „OPTandCV.c“.



Obrázek 6.7: Společný graf pro obě metody.

Jak lze vidět na obrázku 6.7, trend obou metod je velmi podobný, ovšem je zde znatelný offset. Proto je zde funkce posouvání výsledků po Y-ose, pro lepší porovnání obou metod. Dále je zde možnost, pro metodu s optickými vlákny, zobrazit výsledky jak pro každou sekundu, tak i zprůměrované výsledky. Přepínat mezi těmito stavy lze pomocí tlačítka „Average“ popřípadě „Every Second“.

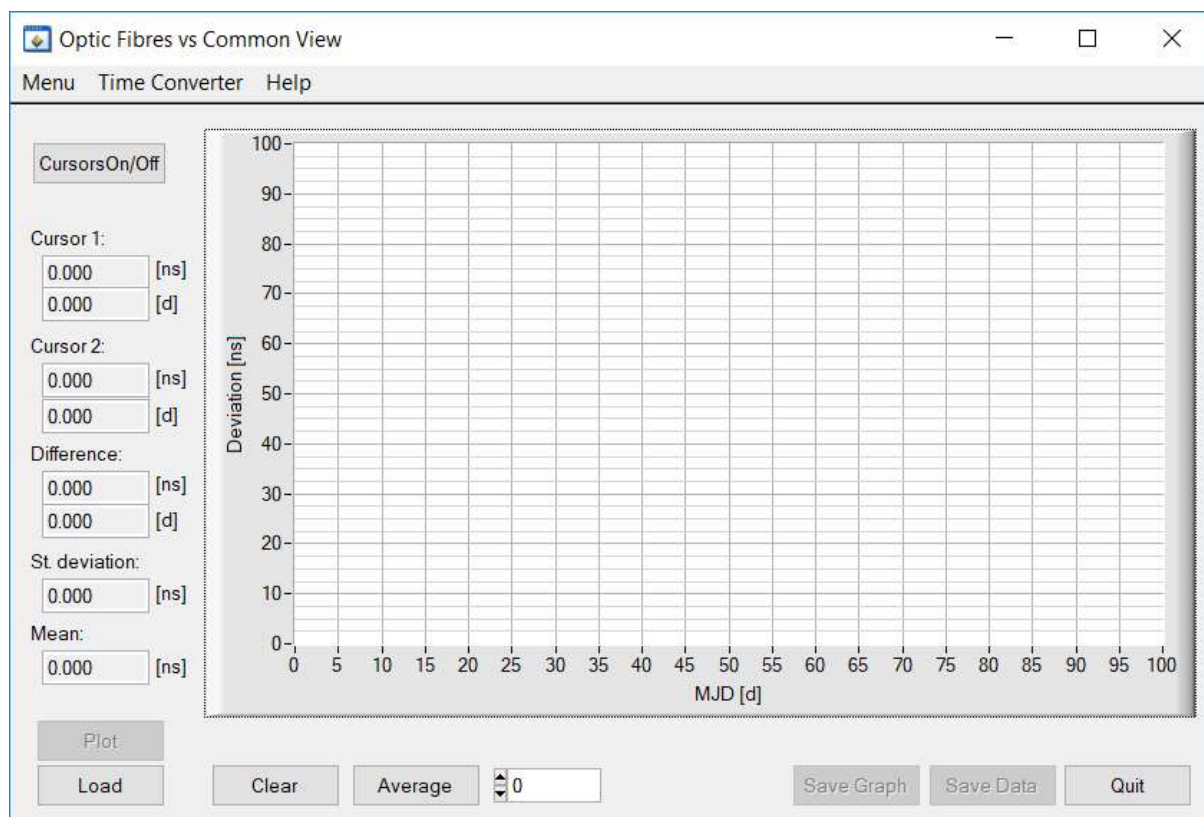


Obrázek 6.8: Zprůměrované výsledky metody dvoucestného přenosu času po optických vláknech posunutě o 40 nanosekund blíže k výsledkům metody „Common View“.



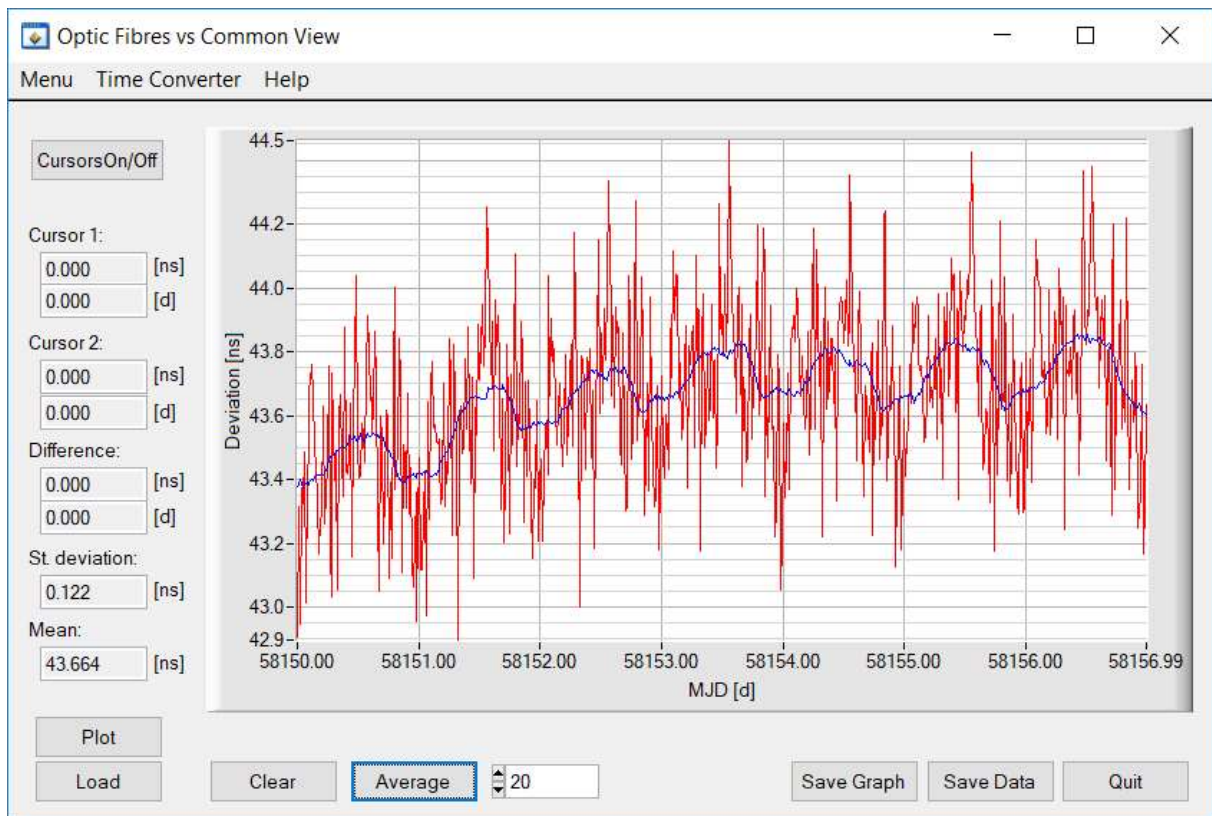
Obrázek 6.9: Funkci „Zoom to Rectangle“ obsahují všechny grafy. Zde použita pro přiblížení první poloviny jednoho dne pro obě dvě metody.

6.3. Porovnání metod přenosu času po optických vláknech a „Common View“



Obrázek 6.10: Okno programu pro porovnání metod „Common View“ a dvoucestného přenosu času po optických vláknech

Pro nahrání souborů slouží tlačítko „Load“. Program vyzve uživatele nejdříve ke vložení souboru s daty zpracovanými metodou dvoucestného přenosu času po optických vláknech. Pro porovnávání je potřeba vložit soubor s uloženými zprůměrovanými daty. Tento soubor se vytváří volbou „Text file for CGGTTS“ při ukládání zpracovaných dat touto metodou. Poté následuje výzva k vložení souboru s daty zpracovanými metodou „Common View“. Po nahrání obou souborů se data zpracují pomocí funkce „ProcessOPTvsCV“, která se nachází ve zdrojovém souboru „OPTvsCVprogram.c“. Po jejich zpracování se zpřístupní tlačítko „Plot“, pomocí kterého se výsledek zobrazí do grafu, viz obrázek 6.11. Dále se zpřístupní tlačítko „Save Data“ pro ukládání dat do textového souboru a tlačítko „Save Graph“ pro uložení grafu jako obrázek ve formátu .png. Tlačítkem „Average“ se do grafu zobrazí klouzavý průměr pro počet vzorků zadaný uživatelem do kolonky vedle tlačítka. Pro výpočet tohoto klouzavého průměru slouží funkce „ChangeAVG“.



Obrázek 6.11: Porovnání výsledků obou metod pro 7 dnů. Modrou barvou vyobrazen klouzavý průměr pro 20 vzorků.

7. Výsledky měření

7.1. Úvod

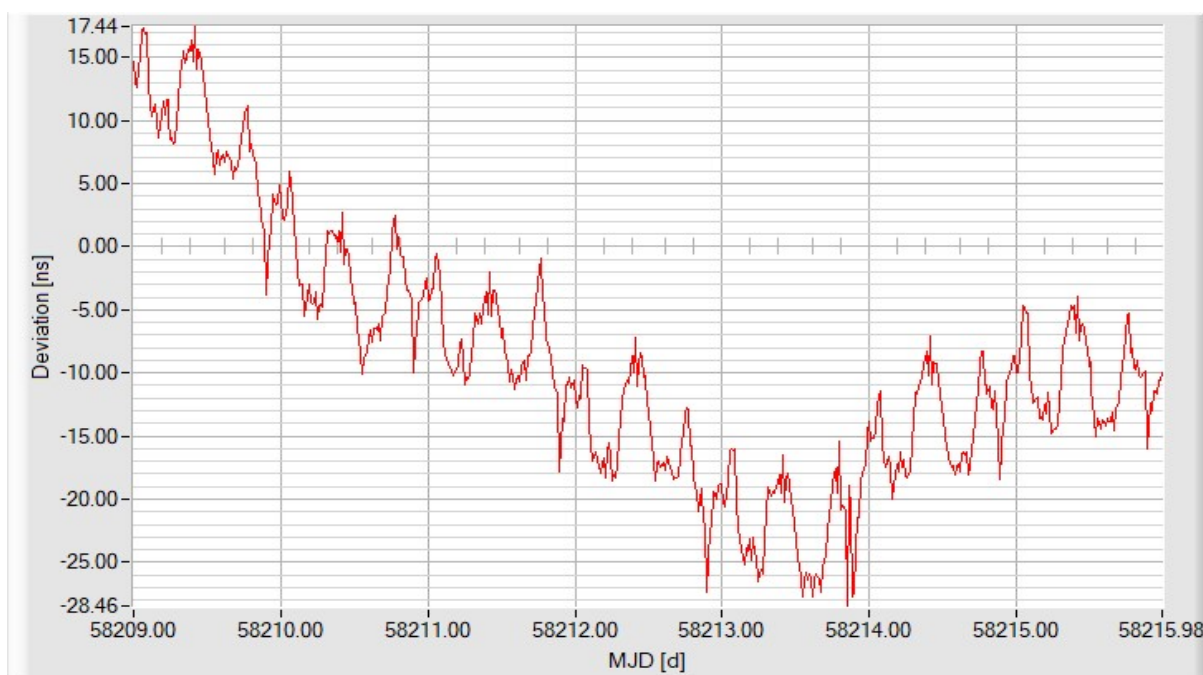
Následující výsledky byly zpracovány pomocí softwaru, který byl vytvořen v rámci této diplomové práce. Tento software je blíže popsán v kapitole 6. Jako zdroj hlavní časové stupnice byly použity cesiové hodiny 5071A provozované Laboratoří přesného času a frekvence FEL ČVUT (viz příloha - obrázek 10.1). Tato časová stupnice je pak porovnávána především s národní aproximací časové stupnice UTC. Tu poskytuje časová stupnice Laboratoře Státního etalonu času a frekvence LSEČF ÚFE. Časová odchylka stupnic je v grafu zobrazena v nanosekundách. Časová osa grafu je zobrazena v časovém formátu MJD, který udává počet dnů od 17. listopadu 1858, jednotky jsou tedy ve dnech.

Data pro metodu společného pozorování „Common View“ byla generována pomocí GNSS přijímačů GTR 50/51 (viz příloha – obrázek 10.2). Pro měření byly využity satelitní systémy GPS, GLONASS a Galileo. Korekce ionosférického zpoždění byla vypnuta, protože pro vzdálenosti menší než stovky kilometrů nemá tato korekce význam. Pro měření byla použita data ze všech dostupných družic. Informace o použitých frekvenčních kódech se nachází pod grafem daného měření.

Pro metodu dvoucestného přenosu času přes optická vlákna, která je blíže popsána v kapitole 5.2., se časová stupnice FEL ČVUT kromě porovnávání vůči časové stupnici LSEČF ÚFE, porovnává také vůči časové stupnici CESNET. Tyto laboratoře jsou propojeny sítí optických vláken, viz obrázek 5.4. Na závěr byly porovnány výsledky těchto dvou metod a pomocí softwaru Stable32 vypočítán parametr TDEV²⁵.

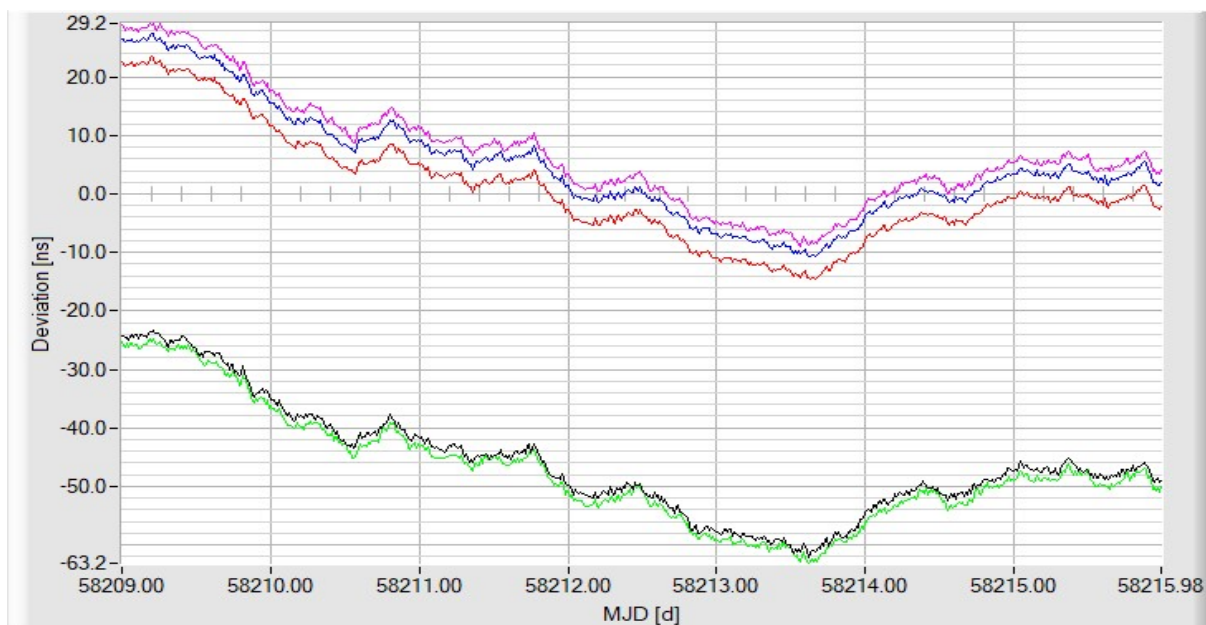
7.2. Metoda „Common View“ s využitím GPS

Následující měření proběhlo pomocí amerického satelitního systému GPS, jenž je popsán v kapitole 4.1. Protože se jedná o metodu společného pozorování „Common View“ s použitím více kanálů, jsou pro měření aplikována data ze všech dostupných družic. Software umožňuje filtrovat jednotlivé družice pro případ, kdyby se některá z družic nechovala korektně, ovšem této možnosti nebylo při následujících měřeních využito. Pro měření byly použity frekvenční kanály L1 a L2 s C/A i s precizním kódováním (dále jen L1C, L1P, L2C, L2P), ale také kód L3P, který vzniká lineární kombinací kanálů L1 a L2.



Obrázek 7.1: Výsledek porovnávání časové stupnice ČVUT FEL vůči časové stupnici LSEČF ÚFE pro období jednoho týdne od 1. do 8. dubna 2018 s využitím satelitního systému GPS. Pro toto porovnávání byly využity všechny dostupné frekvenční kódy (L1C, L1P, L2C, L2P, L5C). Jak si lze všimnout, časová odchylka zde velmi kolísá. To je způsobeno velkým offsetem mezi jednotlivými kódy, viz obrázek 7.2.

²⁵ Time Deviation



Obrázek 7.2: Výsledek porovnávání časové stupnice ČVUT FEL vůči časové stupnici LSEČF ÚFE pro období jednoho týdne od 1. do 8. dubna 2018 s využitím satelitního systému GPS pro jednotlivé frekvenční kanály a kódy. Jednotlivé kódy jsou zobrazeny takto:

Červená barva: L1C, směrodatná odchylka = 9,623 ns, střední hodnota = 0,771 ns

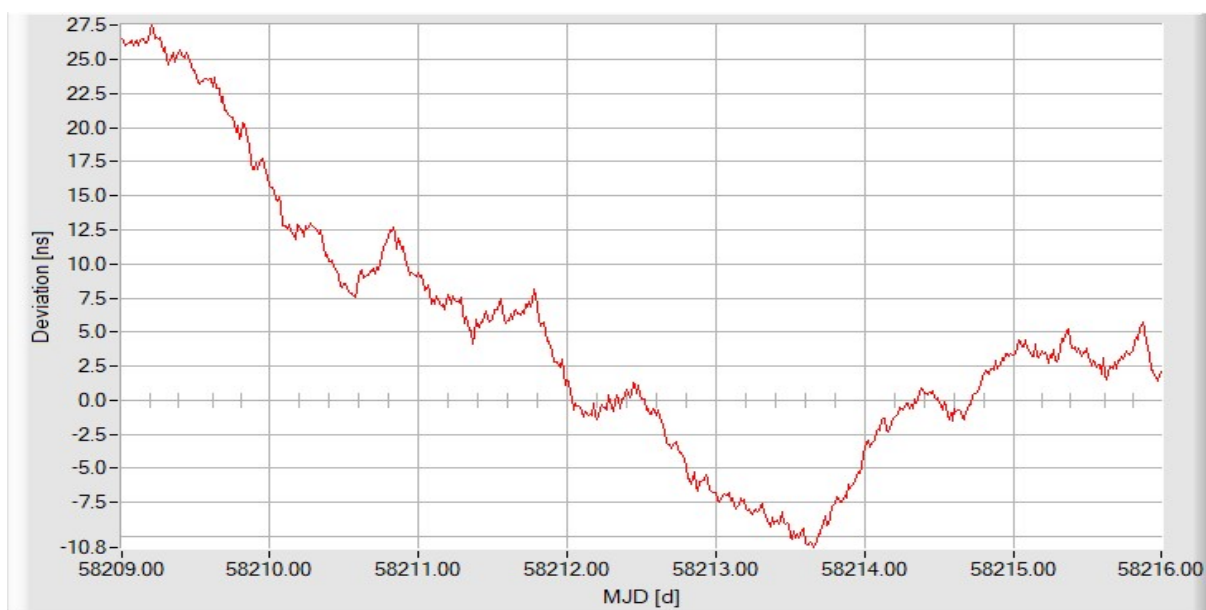
Modrá barva: L1P, směrodatná odchylka = 9,619 ns, střední hodnota = 4,722 ns

Zelená barva: L2C, směrodatná odchylka = 9,655 ns, střední hodnota = -47,229 ns

Růžová barva: L2P, směrodatná odchylka = 9,649 ns, střední hodnota = 6,842 ns

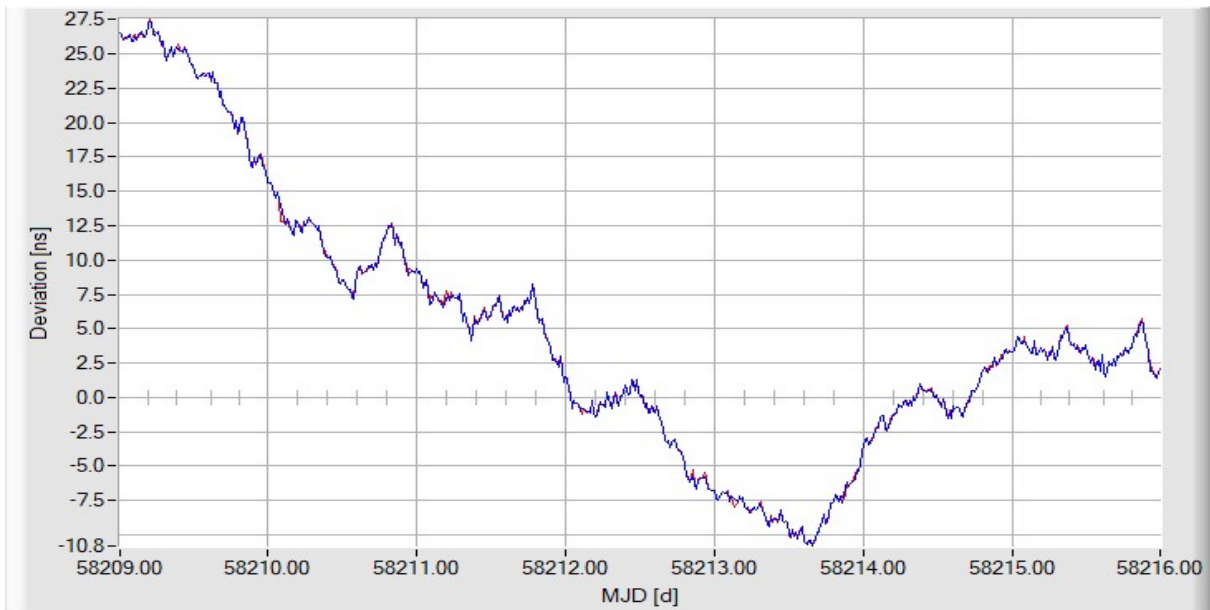
Černá barva: L5C, směrodatná odchylka = 9,701 ns, střední hodnota = -45,966 ns

Mezi jednotlivými frekvenčními kódy vzniká offset, protože některé frekvenční kódy nebyly dostatečně zkalibrovány. Z těchto frekvenčních kódů je nejlépe zkalibrován kód L1C.



Obrázek 7.3: Výsledek porovnávání časové stupnice ČVUT FEL vůči časové stupnici LSEČF ÚFE pro období jednoho týdne od 1. do 8. dubna 2018 s využitím frekvenčního kódu L3P satelitního systému

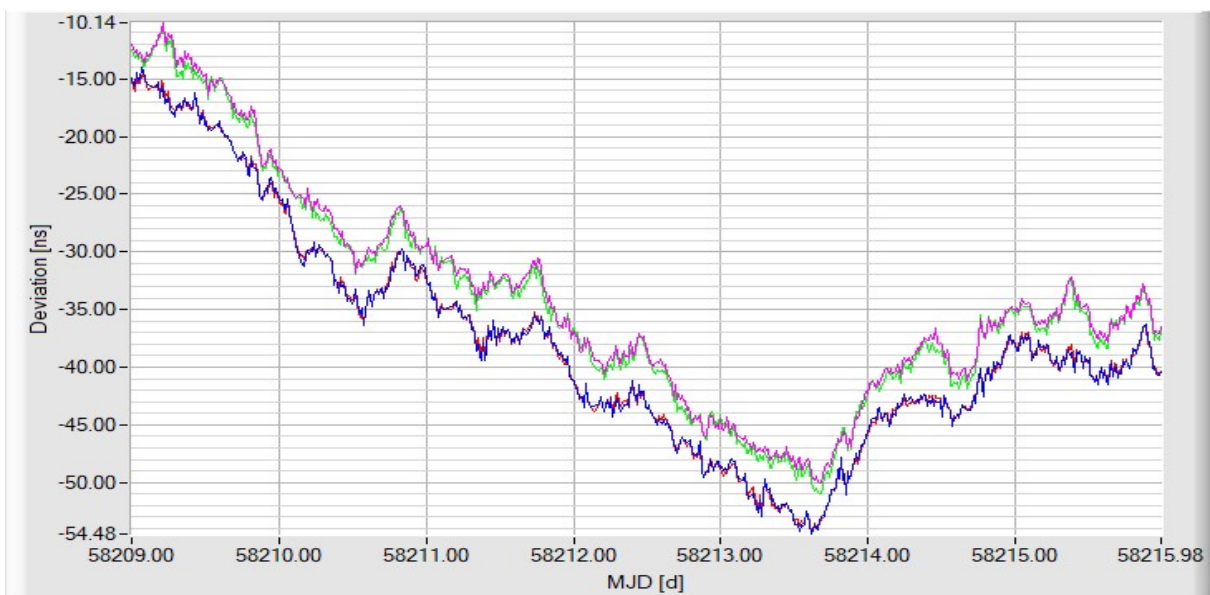
GPS. Směrodatná odchylka = 9.568 ns, střední hodnota = 4,773 ns. Z těchto hodnot vyplývá, že frekvenční kód L3P, který vzniká jako lineární kombinace frekvenčních kanálu L1 a L2, má nejmenší offset vůči kódu L1P, viz následující obrázek 7.4.



Obrázek 7.4: Prolnutí předchozích výsledků frekvenčních kódů L1P (modrá barva) a L3P (červená barva).

7.3. Metoda „Common View“ s využitím GLONASS

Následující měření proběhlo pomocí ruského satelitního systému GLONASS, jenž je popsán v kapitole 4.2. I zde jsou aplikována data ze všech dostupných družic.



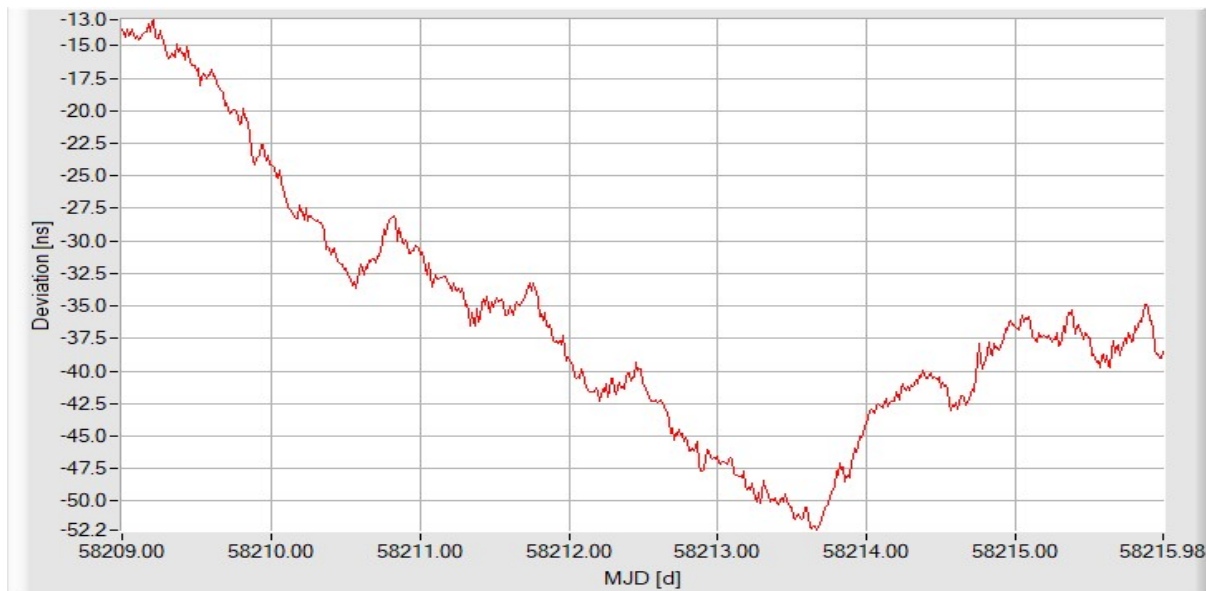
Obrázek 7.5: Výsledek porovnávání časové stupnice ČVUT FEL vůči časové stupnici LSEČF ÚFE pro období jednoho týdne od 1. do 8. dubna 2018 s využitím satelitního systému GLONASS pro jednotlivé frekvenční kódy. Jednotlivé kódy jsou zobrazeny takto:

Červená barva: L1C, směrodatná odchylka = 9,769 ns, střední hodnota = -37,854 ns

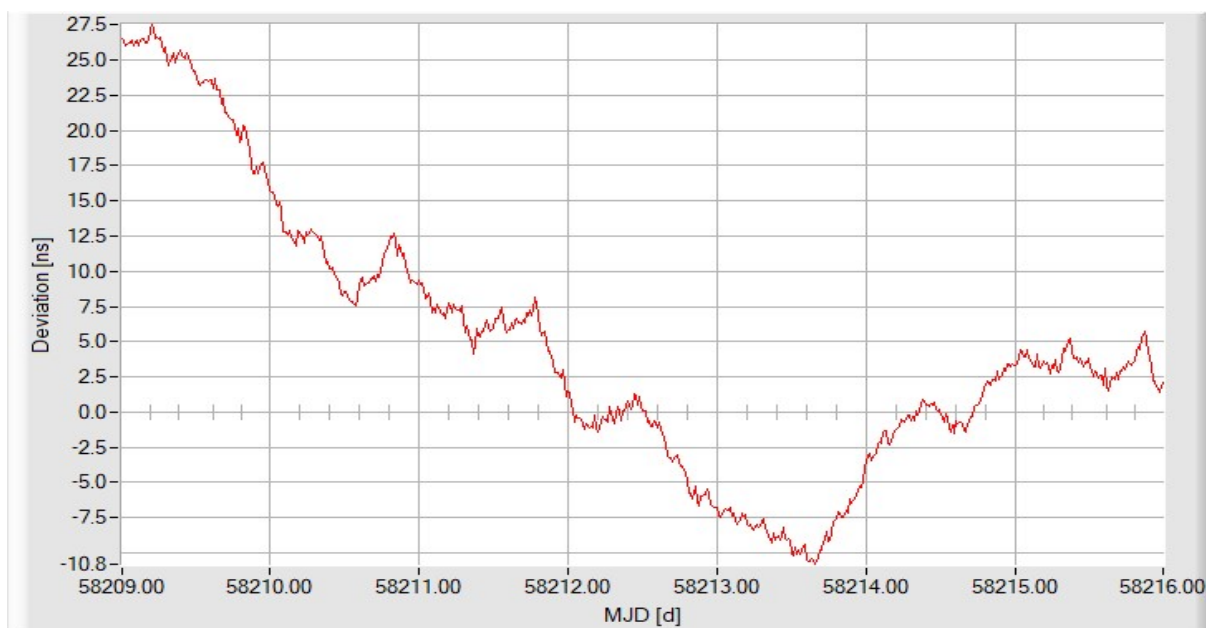
Modrá barva: L1P, směrodatná odchylka = 9,773 ns, střední hodnota = -37,865 ns

Zelená barva: L2C, směrodatná odchylka = 9,695 ns, střední hodnota = -34,371 ns

Růžová barva: L2P, směrodatná odchylka = 9,699 ns, střední hodnota = -33,960 ns



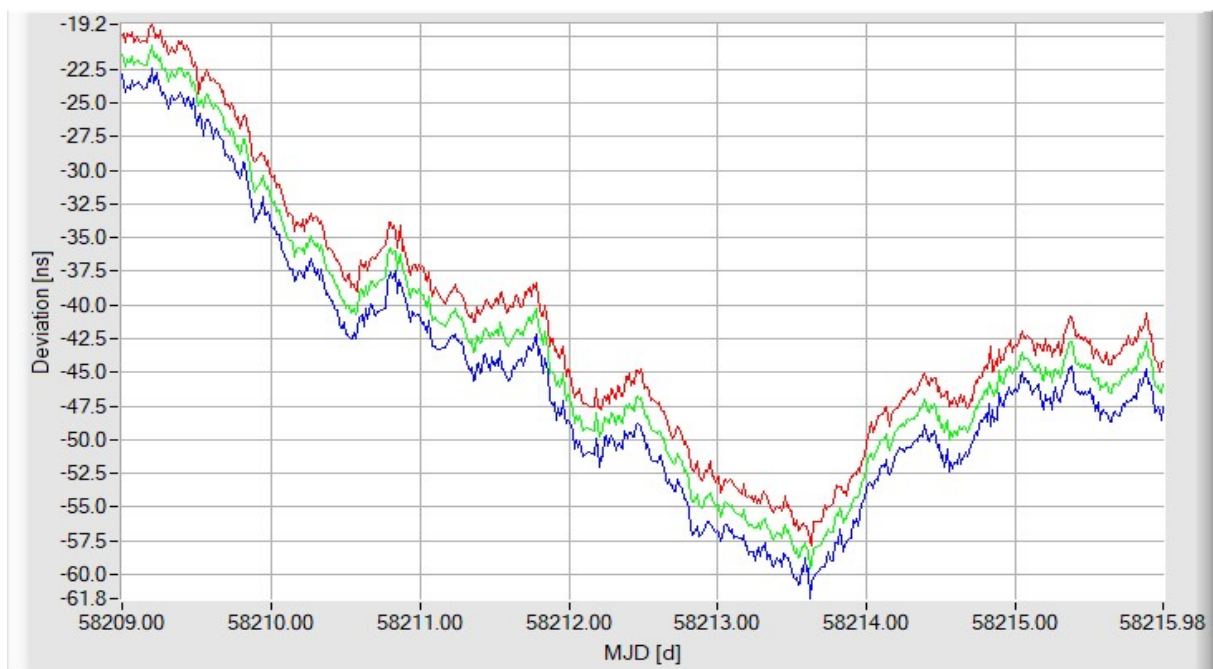
Obrázek 7.6: Výsledek porovnávání časové stupnice ČVUT FEL vůči časové stupnici LSEČF ÚFE pro období jednoho týdne od 1. do 8. dubna 2018 s využitím satelitního systému GLONASS a jeho frekvenčních kódů L1C, L1P, L2C, L2P. Směrodatná odchylka = 9,724 ns, střední hodnota = -36,018 ns.



Obrázek 7.7: Výsledek porovnávání časové stupnice ČVUT FEL vůči časové stupnici LSEČF ÚFE pro období jednoho týdne od 1. do 8. dubna 2018 s využitím satelitního systému GLONASS s kódem L3P. Směrodatná odchylka = 9,744 ns, střední hodnota = -37,839 ns.

7.4. Metoda „Common View“ s využitím Galilea

Následující měření proběhlo pomocí evropského satelitního systému Galileo, jenž je popsán v kapitole 4.3. Tento satelitní systém je na rozdíl od GPS a GLONASS určen primárně pro civilní účely. Měl by tedy být přesnější, ovšem tento satelitní systém stále není plně zprovozněn, a není tedy k dispozici všech 30 plánovaných družic. Systém Galileo by měl být plně funkční přibližně do dvou let.

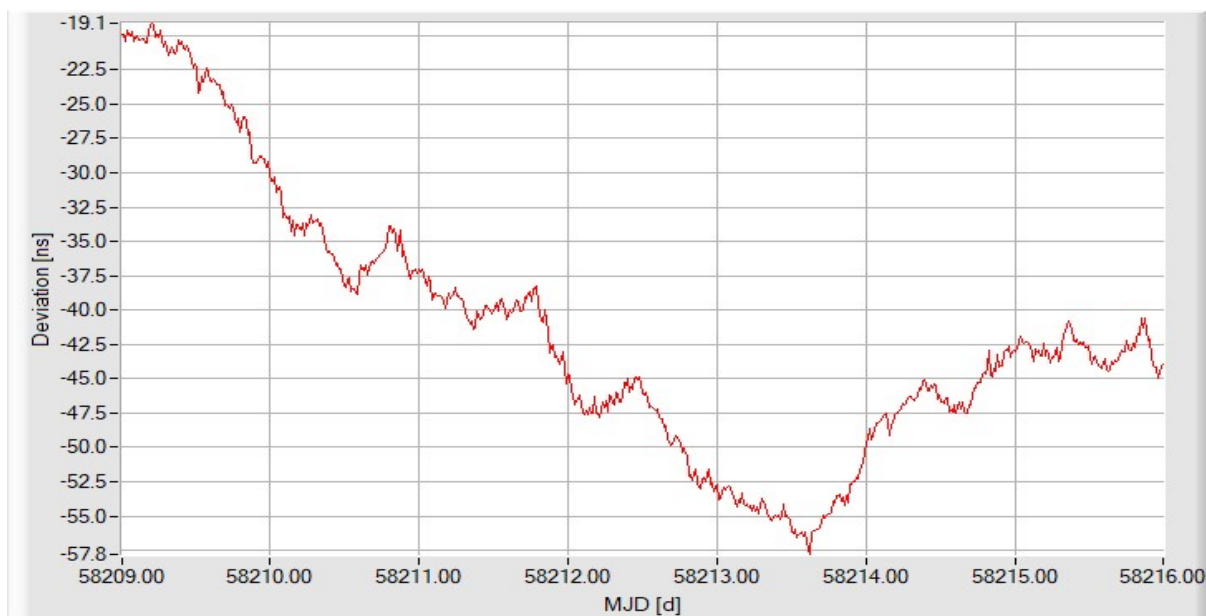


Obrázek 7.8: Výsledek porovnávání časové stupnice ČVUT FEL vůči časové stupnici LSEČF ÚFE pro období jednoho týdne od 1. do 8. dubna 2018 s využitím satelitního systému Galileo pro jednotlivé frekvenční kódy. Jednotlivé kódy jsou zobrazeny takto:

Červená barva: E1, směrodatná odchylka = 9,574 ns, střední hodnota = -41,415 ns

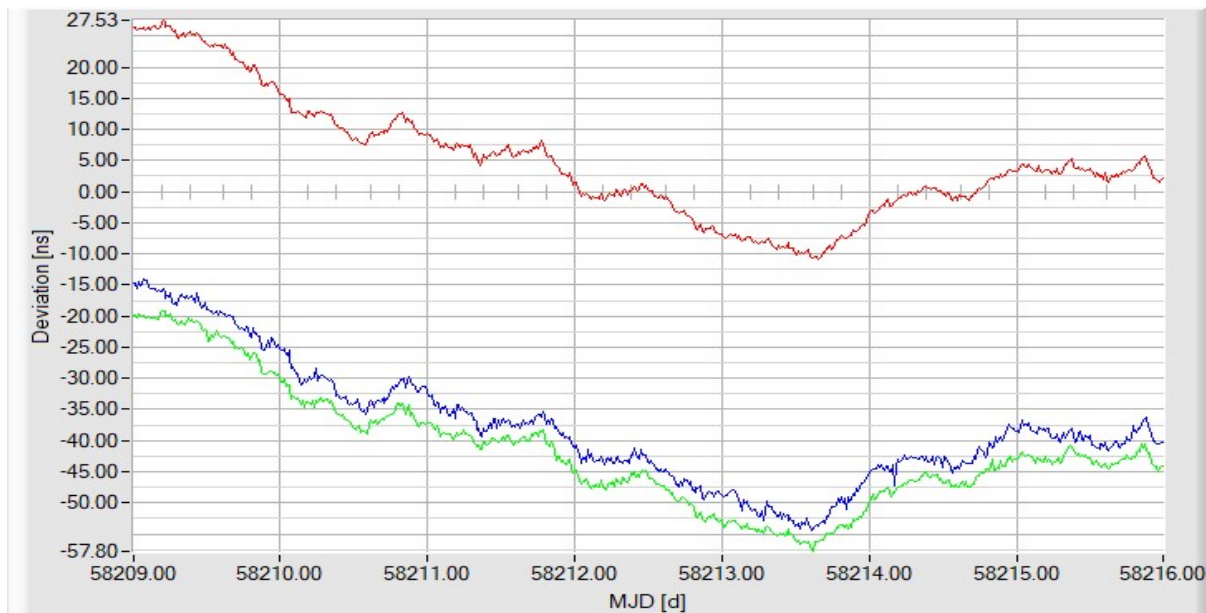
Modrá barva: E5a, směrodatná odchylka = 9,658 ns, střední hodnota = -45,287 ns

Zelená barva: Zprůměrovaný kódy E1 a E5a, směrodatná odchylka = 9,613 ns, střední hodnota = -43,351 ns



Obrázek 7.9: Výsledek porovnávání časové stupnice ČVUT FEL vůči časové stupnici LSEČF ÚFE pro období jednoho týdne od 1. do 8. dubna 2018 s využitím satelitního systému Galileo s frekvenčním kódem L3E. Směrodatná odchylka = 9,523 ns, Střední hodnota = -41,411 ns.

7.5. Porovnání jednotlivých satelitních systémů



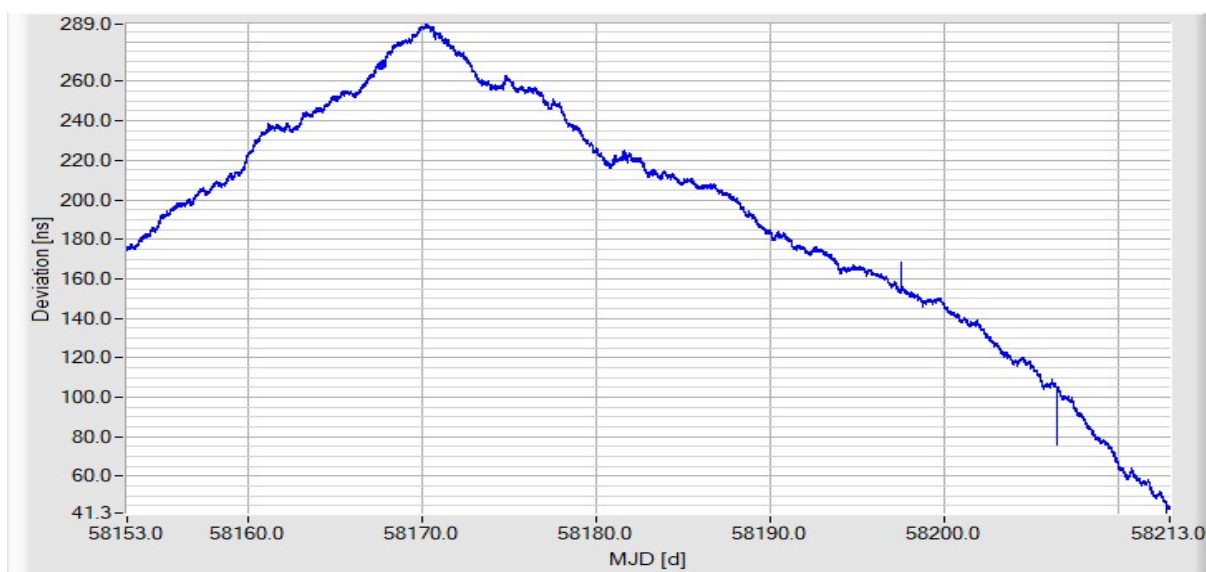
Obrázek 7.10: Porovnání výsledků metody „Common View“ pro satelitní systémy GPS, GLONASS a Galileo v období jednoho týdne od 1. do 8. dubna 2018 s využitím kódů L3P/E:

Červená barva: GPS, Směrodatná odchylka = 9,568 ns, Střední hodnota = 4,773 ns

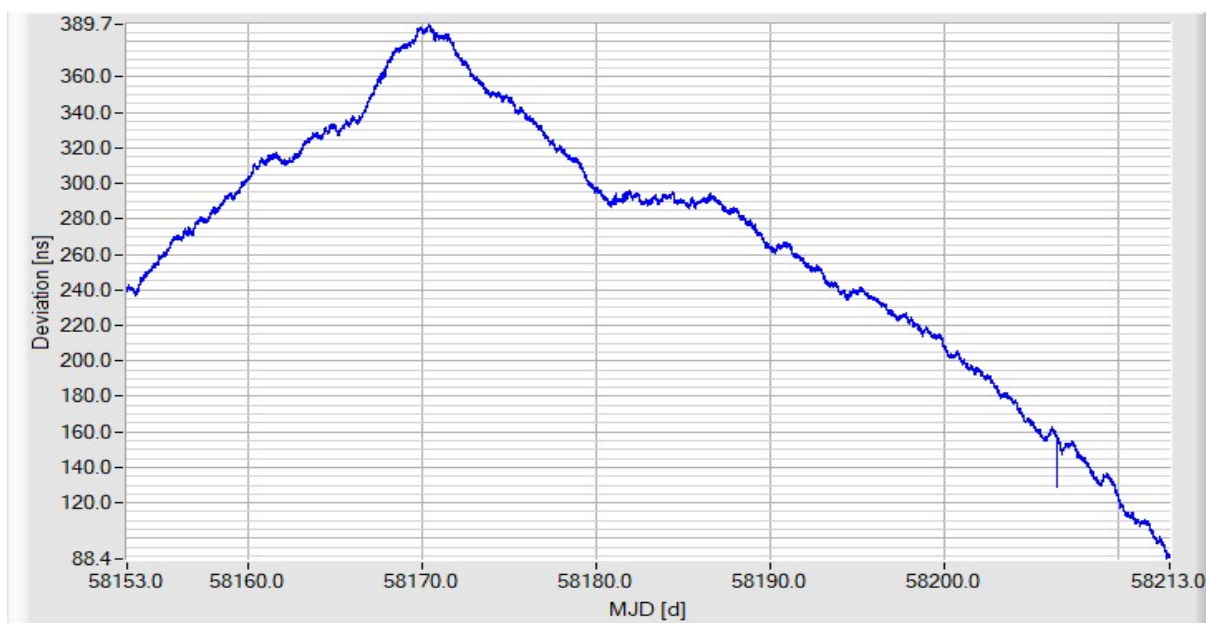
Modrá barva: GLONASS, Směrodatná odchylka = 9,724 ns, Střední hodnota = -37,839 ns

Zelená barva: Galileo, Směrodatná odchylka = 9,523 ns, Střední hodnota = -41,411 ns

7.6. Metoda dvoucestného přenosu času po optických vláknech



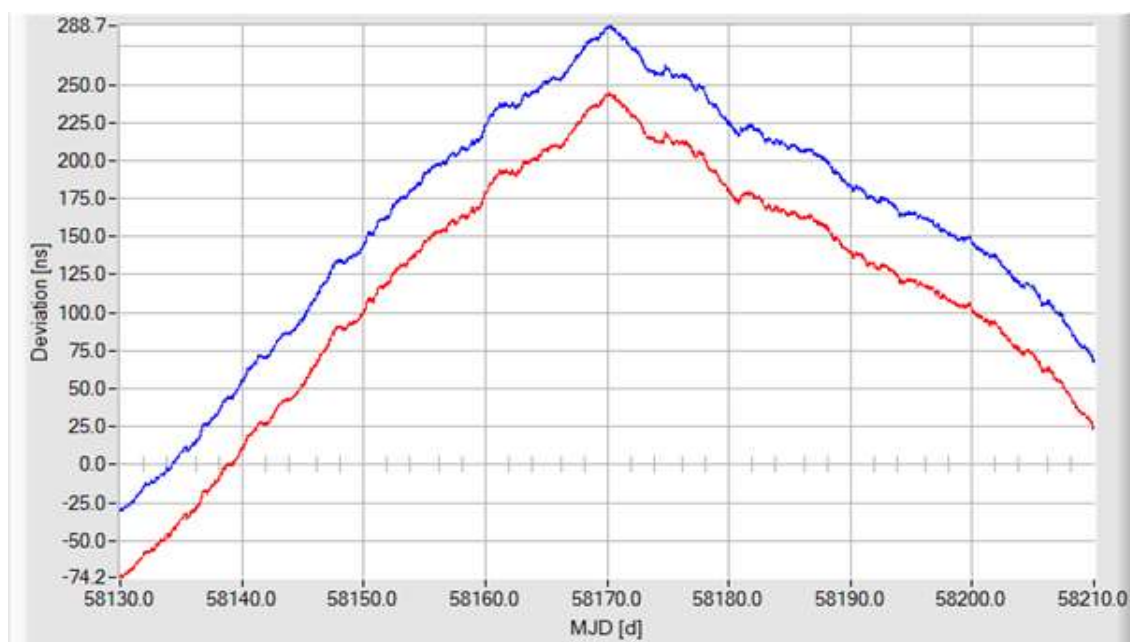
Obrázek 7.11: Výsledek porovnávání časové stupnice ČVUT FEL vůči časové stupnici LSEČF ÚFE pomocí metody dvoucestného přenosu času po optických vláknech pro období 60 dnů od 4. února do 5. dubna 2018. Směrodatná odchylka = 61,327 ns, Střední hodnota = 191,820 ns.



Obrázek 7.12: Výsledek porovnávání časové stupnice ČVUT FEL vůči časové stupnici CESNET pomocí metody dvoucestného přenosu času po optických vláknech pro období 60 dnů od 4. února do 5. dubna 2018. Směrodatná odchylka = 73,366 ns, Střední hodnota = 266,344 ns.

7.7. Porovnání obou metod

Jelikož metoda „Common View“ generuje zprůměrovaná data z 13minutového měřicího intervalu každých 16 minut, zatímco metoda dvoucestného přenosu času po optických vláknech generuje data každou sekundu, je třeba pro porovnání těchto dvou metod i tato data z optického vlákna zprůměrovat. Software tedy umí data z optického vlákna pro toto porovnání zprůměrovat a to tak, aby vše proběhlo kompatibilně s metodou „Common View“. Pro každých 16 minut se 3 minuty dat zahodí, protože v metodě „Common View“ se v každých 16 minutách měří pouze 13 minut, viz kapitola 5.4.1. Software musí brát v potaz i každodenní posun těchto intervalů o 4 minuty, aby vše sedělo a data těchto dvou metod byla plně kompatibilní k porovnání. Software umí jak zobrazit výsledky obou dvou metod do jednoho grafu viz obrázek 7.13, tak i vypočítat jejich vzájemnou diferenci, viz obrázek 7.14.

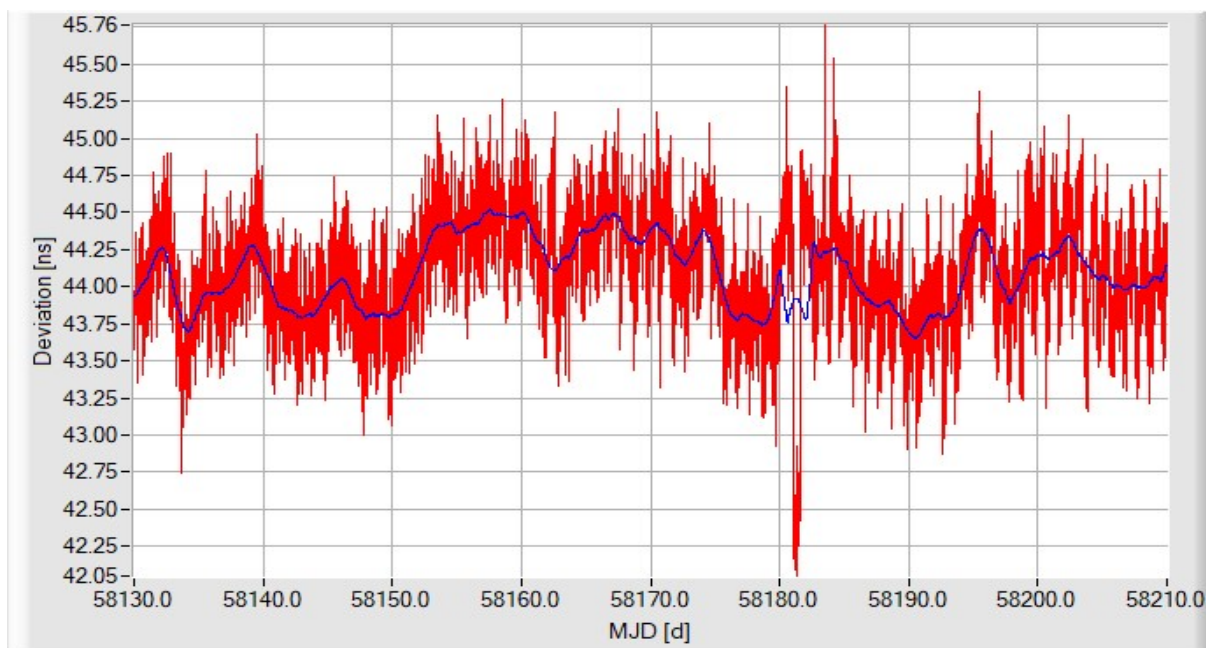


Obrázek 7.13: Výsledek porovnávání časové stupnice ČVUT FEL vůči časové stupnici LSEČF ÚFE pro období 80 dnů od 12. ledna do 2. dubna 2018. Metody jsou zobrazeny takto:

Červená barva: „Common View“ Směrodatná odchylka = 81,539 ns, Střední hodnota = 161,408 ns.

Modrá barva: „Optická vlákna“ Směrodatná odchylka = 81,511 ns, Střední hodnota = 117,407 ns.

Offset těchto dvou metod je tedy přibližně 44 ns. Tento offset zde vzniká, protože nebyla provedena korekce přívodních kabelů k přijímači GTR 51.

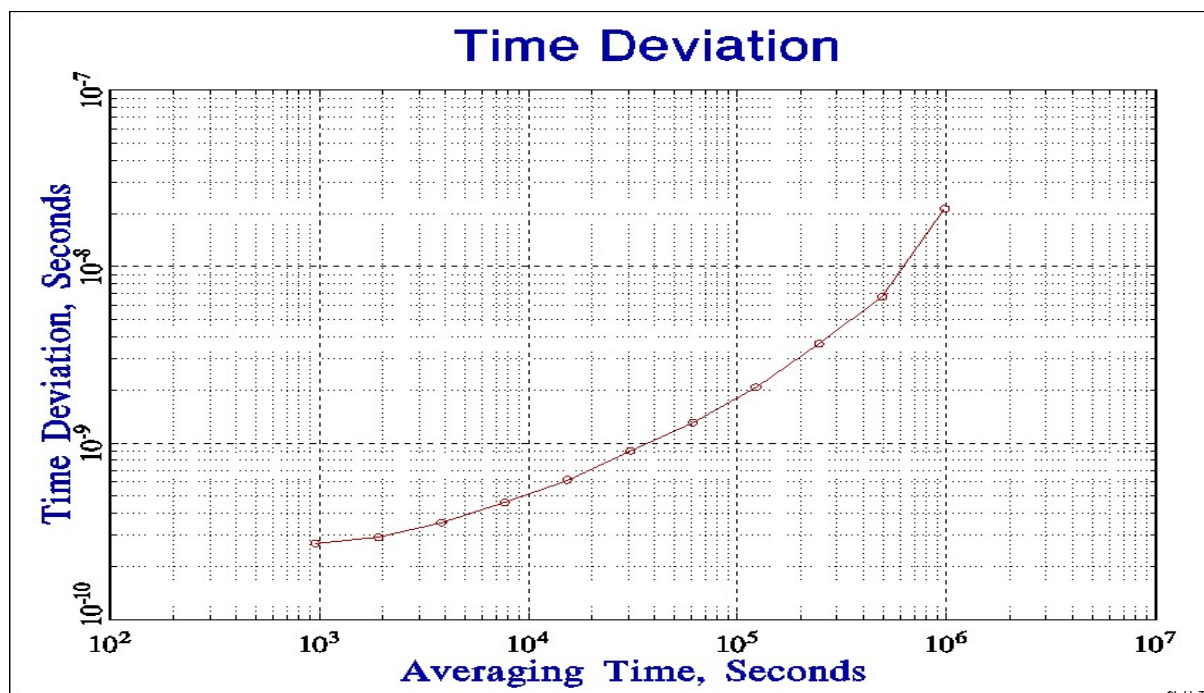


Obrázek 7.14: Pro porovnání byly použity výsledky metod z předchozího obrázku 7.13. Tedy z období od 12. ledna do 2. dubna 2018.

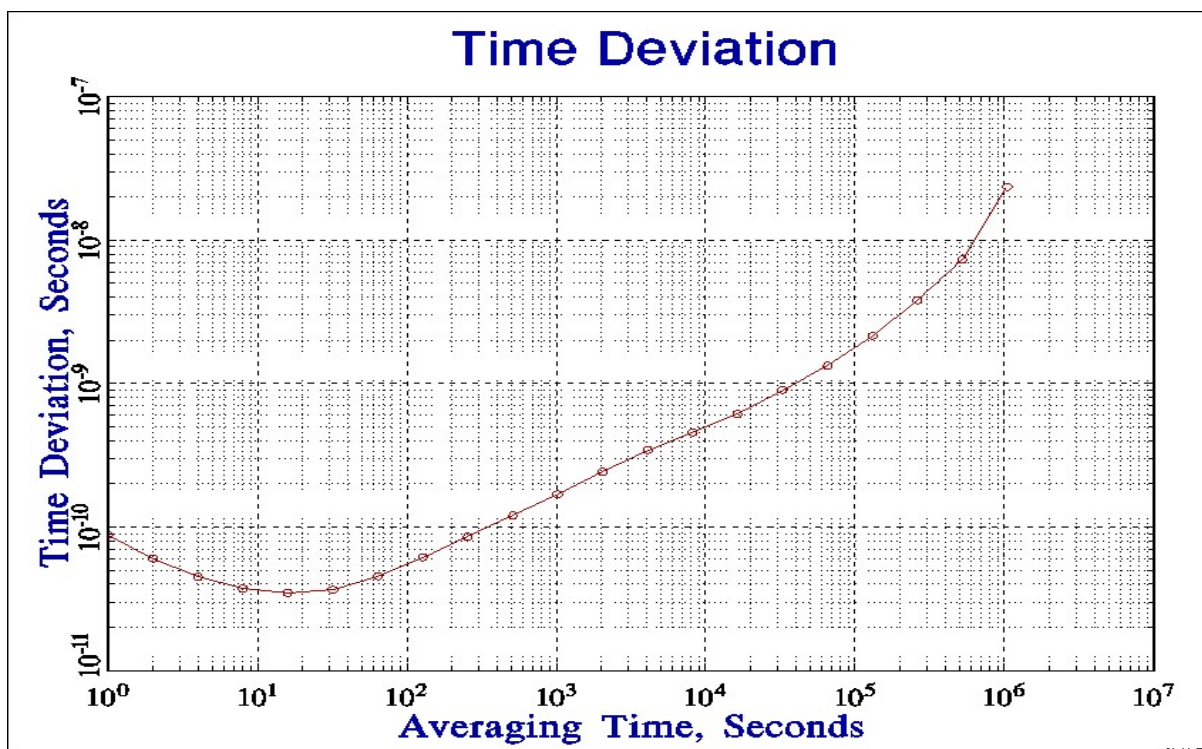
Červená barva: Diference mezi metodou „Common View“ a metodou dvoucestného přenosu času po optických vláknech. Směrodatná odchylka = 0,404 ns, Střední hodnota = 44,093 ns.

Modrá barva: Klouzavý průměr této diference pro 90 vzorků. Směrodatná odchylka = 0,227 ns.

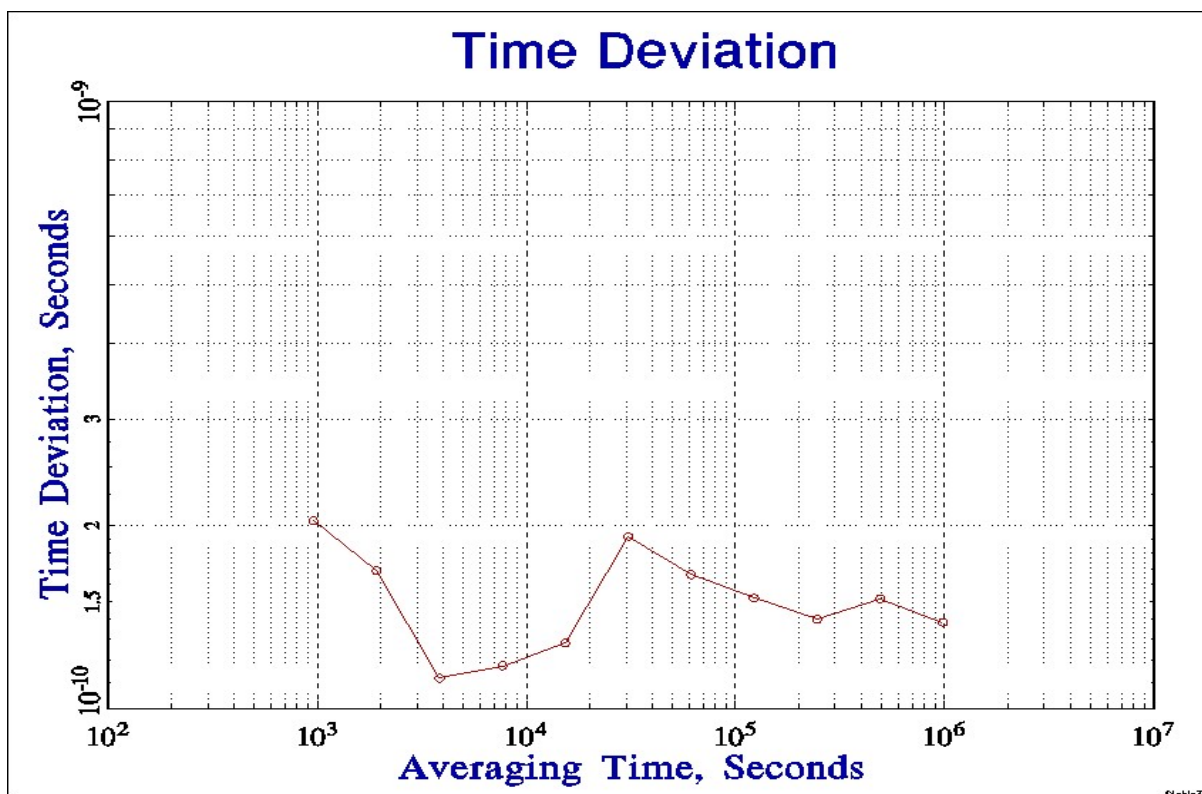
Parametr TDEV byl vypočítán pomocí softwaru Stable32.



Obrázek 7.15: Parametr TDEV pro data zpracovaná metodou „Common View“. Porovnávána je zde časová stupnice ČVUT FEL vůči časové stupnici LSEČF ÚFE pro období od 12. ledna do 2. dubna 2018.



Obrázek 7.16: Parametr TDEV pro data zpracovaná pomocí metody dvoucestného přenosu času po optických vláknech. Porovnávána je zde časová stupnice ČVUT FEL vůči časové stupnici LSEČF ÚFE pro období od 12. ledna do 2. dubna 2018.



Obrázek 7.17: Parametr TDEV pro diferenci výsledků předchozích dvou metod.

8. Závěr

V rámci vypracování této diplomové práce byla vytvořena softwarová aplikace určená ke zpracování dat poskytnutých Laboratoří přesného času a frekvence FEL ČVUT. Účel této aplikace je porovnávat vysoce přesné etalony času, které generují lokální časovou stupnici. Jako médium pro přenos času mezi těmito etalony byly zvoleny jednak satelitní systémy, ale také optická vlákna, kterými jsou porovnávány laboratoře propojeny.

Pro satelitní systémy byla zvolena metoda společného pozorování „Common View“ s více kanály. Ta byla následně odzkoušena na americkém satelitním systému GPS, na ruském satelitním systému GLONASS a na evropském Galileu. Výsledky těchto měření reflektují fakt, že pro satelitní systémy GLONASS a Galileo neproběhly potřebné kalibrace na GNSS přijímači naší laboratoře. V rámci GPS systému je nejlépe zkalibrován frekvenční kód L1C. Pro tato měření byla lokální časová stupnice naší laboratoře porovnávána s časovou stupnicí Laboratoře Státního etalonu času a frekvence, která reprezentuje národní aproximaci časové stupnice UTC.

Pro optická vlákna byla zvolena metoda dvoucestného přenosu času po optických vláknech. I zde byla časová stupnice ČVUT FEL porovnávána s časovou stupnicí Laboratoře Státního etalonu času a frekvence. Tyto laboratoře využívají propojení pomocí jednoho obousměrného vlákna, využívajícího vlnového multiplexu. Dále bylo měření provedeno i pro porovnávání s časovou stupnicí CESNET, kde se využívá dvou jednosměrných optických vláken.

Z provedené analýzy těchto metod vyplývá, že výsledky porovnávání metodou dvoucestného přenosu času po optických vláknech jsou až o řád přesnější oproti výsledkům porovnávání metodou „Common View“. Zde se projevuje především fakt, že nejistoty zpoždění vzniklé průchodem signálu optickým vláknem jsou výrazně menší oproti nejistotám zpoždění vzniklých průchodem signálu atmosférou.

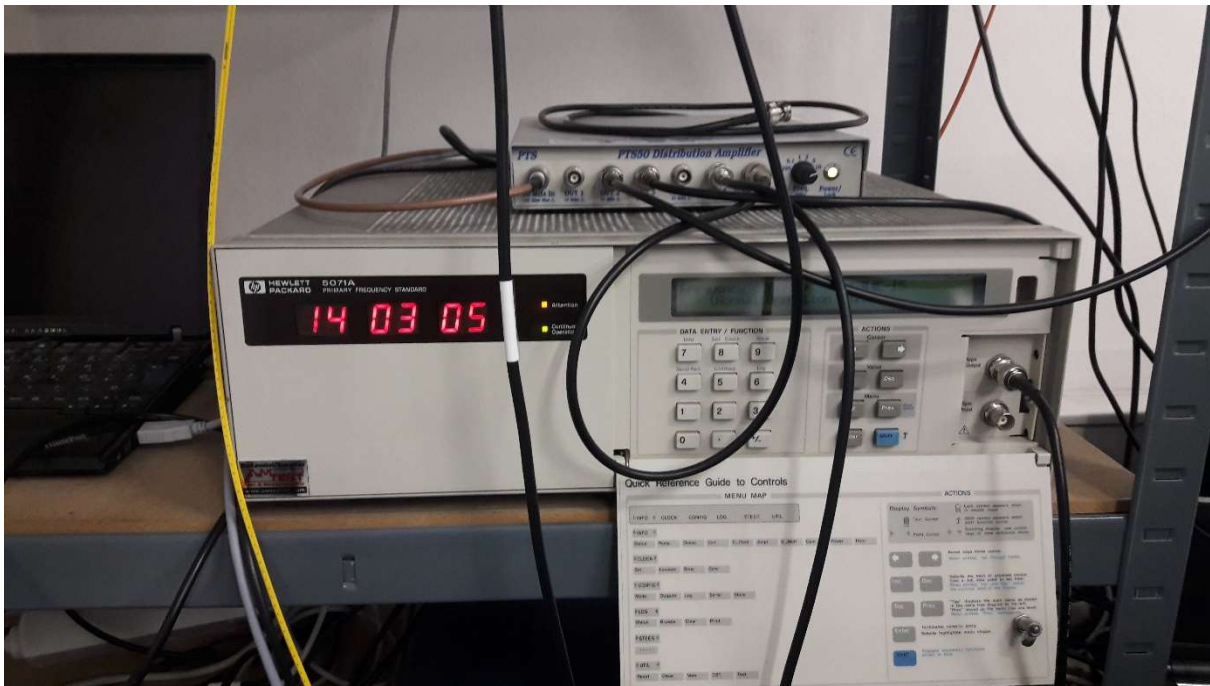
Software také porovnává tyto dvě metody mezi sebou. V rámci měření této difference byl zjištěn offset přibližně 44 ns. Ten je způsoben především tím, že nebyla provedena potřebná kalibrace přívodních kabelů GNSS přijímače. Pro lepší vyhodnocení výsledků měření pomocí těchto metod byl pro obě metody i pro jejich diferenci vypočítán parametr TDEV.

Pro tato měření byla použita data z období od ledna do dubna letošního roku. Potřebná data i přístroje byly poskytnuty Laboratoří Přesného času a frekvence FEL ČVUT, Laboratoří Státního Etalonu času a frekvence LSEČF a Laboratoří CESNET.

9.Literatura

- [1] Ebenhag, S. C.: Frequency Transfer Techniques and Applications in Fiber Optic Communication Systems. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy. Photonics Laboratory, Department of Microtechnology and Nanoscience, Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden, 2013.
- [2] Feldmann T.: Advances in GPS based Time and Frequency Comparisons for Metrological Use. Dissertation. Leibniz Universität Hannover, Fakultät für Mathematik und Physik. Hannover, 2011.
- [3] Lombardi M.A., Nelson L.M., Novick A.N. and Zhang V.S.: Time and Frequency Measurements Using the Global Positioning System. The International Journal of Metrology, 2001.
- [4] Dittrich J.: Použití přijímačů GNSS pro měření času a frekvence. Bakalářská Práce. České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta Elektrotechnická, Katedra Měření. Praha, 2015.
- [5] Hájek M., Holomeček P.: Měření chromatické a polarizační vidové disperze jednovidových optických tras, CABLEX, České Budějovice, 2002.
- [6] Hájek M., Holomeček P.: Chromatická disperze jednovidových optických vláken a její měření. Webové stránky Mikromkom [online]. <<http://www.mikromkom.eu/cz/pdf/chrom-disperze.pdf>>.
- [7] Smotlacha V., Vojtěch J.: Accurate Time Distribution Using Optical Fiber. International Association of Institutes of Navigation World Congress. Prague, 2015.
- [8] Roztočil J.: Navázání časové stupnice FEL Time na UTC(TP) pomocí optického přenosu. Zpráva pro závěrečnou oponenturu k úkolu PRM 2017 č. VIII/1/17. ČVUT FEL, Praha 2017.
- [9] Mai T.: Global Positioning System. National Aeronautics and Space Administration. [online]. <<https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS.html>>.
- [10] Ávila Rodríguez J.A.: GLONASS Signal Plan. Universit FAF Munich, Germany. Munich, 2011. [online]. <http://www.navipedia.net/index.php/GLONASS_Signal_Plan>
- [11] Horiai K.: Accuracy of time comparison derived from reception of LORAN-C and Global Positioning System time signals. Radio Science, 1992.
- [12] Šíma J.: Technologie CWDM v optických sítích. RLC Praha a.s. [online]. <http://www.rlc.cz/downloads/technologie_cwdm.pdf>.
- [13] Weiss M.: Getting Accurate Time from GNSS Receivers, Considerations to Approach Nanosecond Time. Conference Monterey, CA, USA, 2017. ISSN 1949-0313.
- [14] Cibiel G., Dantepal J., de Latour A., Dutrey J.-F., Brunet M., Ries L., Issler J.-L.: Dual frequency absolute calibration of GPS receiver for time transfer. Proc. European Frequency and Time Forum, 2005.
- [15] Smotlacha V., Kuna A.: Remote Atomic Clock Contribution to UTC(TP), Prague.

10. Příloha



Obrázek 10.1: Cesiové hodiny 5071A provozované Laboratoří přesného času a frekvence FEL ČVUT



Obrázek 10.2: GNSS přijímač GTR 51 provozovaný Laboratoří přesného času a frekvence FEL ČVUT.



Obrázek 10.3: Adaptér pro porovnávání dvoucestnou metodou přenosu času po optických vláknech provozovaný Laboratoří přesného času a frekvence FEL ČVUT. Zapůjčeno sdružením CESNET.