

**České vysoké učení technické v Praze**  
Fakulta elektrotechnická

Katedra měření



**Bakalářská práce**

Použití přijímačů GNSS pro měření času a frekvence

Jan Dittrich

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

Studijní program: Kybernetika a robotika

Obor: Senzory a přístrojová technika

2015

## **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**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce, panu doc. Ing. Jaroslavu Roztočilovi, CSc., za vedení této práce a za poskytnutí pravidelných konzultací a možnosti otestovat si program.

Dále děkuji pánům Ing. Petru Pánkovi, CSc. a Ing. Alexandru Kunovi, Ph.D. za poskytnutí konzultací.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická  
Katedra měření

Akademický rok 2014-15

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jan Dittrich**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**  
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **Použití přijímačů GNSS pro měření času a frekvence**

Název tématu anglicky: **Use of GNSS Receivers for Time and Frequency Measurement**

### Pokyny pro vypracování:

Navrhnete programové vybavení pro měřicí systém určený ke kalibraci přesných oscilátorů a čítačů. Systém založený na využití GPS přijímačů uBlox ověříte v laboratoři přesného času FEL ČVUT. Dále vytvoříte aplikaci pro zpracování dat z měřicí aparatury GTR 51 pro porovnávání časových stupnic. Aplikace bude provádět výpočet odchylek z naměřených dat metodou „společných pozorování“ ve formátech CGGTTs, RAW a L3P.

### Seznam odborné 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] GPS and Precision Timing Applications. Hewlett-Packard, App. Note 1272. Hewlett-Packard Company, 1996.
- [3] J. Levine: Introduction to Time and Frequency Metrology. REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, vol. 70, no. 6, pp. 2567 – 2596, 1999.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jaroslav Roztočil, CSc.  
Datum zadání bakalářské práce: 18. listopadu 2014  
Platnost zadání do<sup>1</sup>: 31. srpna 2016

Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.  
vedoucí katedry



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 30. 11. 2014

<sup>1</sup> Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

# Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje realizaci softwaru určeného pro laboratoř přesného času FEL ČVUT. Software je napsán v jazyce C v programu LabWindows/CVI a skládá se ze tří programů, které na sebe navazují. První program využívá metodiky společného pozorování „Common-View“ s použitím CGGTTS<sup>1</sup> či L3P dat. Druhý program zobrazuje data naměřená čítačem, na který lze připojit GPS přijímač u-Blox. Výstupní hodnoty těchto dvou programů slouží jako vstupní hodnoty pro třetí program, který vypočítává posun pulsů PPS<sup>2</sup> laboratoře FEL vůči jiné laboratoři. Dále je tato práce zaměřena na tematiku měření času a frekvence pomocí přijímačů GNSS<sup>3</sup> a na datové formáty CGGTTS, RAW a RINEX<sup>4</sup>. Pro odzkoušení byly použity soubory laboratoří FEL, PTB<sup>5</sup> a ÚFE<sup>6</sup>.

# Abstract

This bachelor project is about software realization designed for laboratory of precise time FEL ČVUT. Software is written in C language in LabWindows/CVI program. This software contains three programs, which are connected together. First program applies the common view method with use of CGGTTS or L3P data. Second program displays data measured by counter that we can connect with GPS receiver u-Blox. The output values from these two programs are used as the input values for third program, which computes a time difference of PPS pulses of laboratory FEL to another laboratory. This project is also mentioning time and frequency measurements using the GNSS receiver theme and CGGTTS, RAW and RINEX data formats. Program was tested with files from FEL, PTB and UFE laboratories.

---

<sup>1</sup> Consultative Committee for Time and Frequency Group on GNSS Time Transfer Standard

<sup>2</sup> Pulse Per Second

<sup>3</sup> Global Navigation Satellite System

<sup>4</sup> Receiver Independent Exchange Format

<sup>5</sup> Physikalisch-Technische Bundesanstalt

<sup>6</sup> Ústav fotoniky a elektroniky

## Obsah

1 Úvod.....	1
2 Metrologie času a frekvence .....	2
2.1 Definice času a frekvence .....	2
2.2 Cesiumový Standard .....	2
2.3 Rubidiový Standard.....	3
3 Metody měření .....	4
3.1 Měření One-Way.....	4
3.2 Měření Common View.....	4
3.3 Měření Carrier Phase.....	5
4 Formáty dat .....	7
4.1 CGGTTS formát.....	7
4.1.1 File header .....	7
4.1.2 Line header .....	8
4.1.3 Unit header .....	8
4.1.4 Data line.....	9
4.2 RAW formát.....	10
4.3 RINEX formát.....	12
5 Využité přístroje .....	13
5.1 GTR 51 .....	13
5.2 u-Blox LEA-6T .....	13
6 Software .....	14
6.1 Common View .....	14
6.1.1 Úvod .....	14
6.1.2 Program .....	15
6.2 Zobrazení časové odchylky .....	16
6.2.1 Úvod .....	16
6.2.2 Program .....	17
6.3 PPS posun.....	19
6.3.1 Úvod .....	19
6.3.2 Program .....	20
7 Zpracované výsledky .....	21
7.1 Common View výsledky.....	21

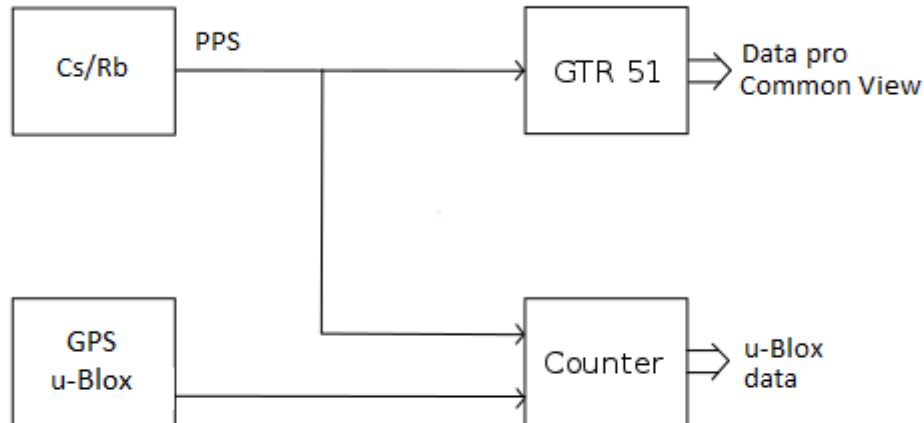
7.2 Výsledky odchylek.....	22
8 Závěr .....	24
9 Literatura.....	25

# 1 Úvod

Jistě každý z nás již někdy slyšel o nejnámějším globálním navigačním satelitním systému (GNSS), systému GPS<sup>7</sup>, který se používá zejména pro určení polohy objektů na Zemi. Ale GPS se také stal hlavním systémem pro distribuci času a frekvence. GPS přijímače umístěné v metrologických laboratořích času a frekvence slouží k porovnávání časových stupnic generovaných vysoce přesnými etalony času (cesiové a rubidiové etalony), synchronizaci a kalibraci přesných a stabilních oscilátorů.

Družice vysílají signál nejčastěji na dvou frekvencích značených L1 a L2 a to z výšky přibližně 20 000 km. To znamená, že je potřeba vzít v úvahu i zpoždění způsobené ionosférou a troposférou. Družice také vysílá dva různé kódy a to „coarse acquisition“ (C/A) kód s chipovací rychlostí 1023 chips/ms a „precision“ (P) kód s 10230 chips/ms. Každá družice má buďto rubidiový nebo cesiový oscilátor nebo kombinaci obou. Tento oscilátor zprostředkovává referenci pro nosné i kódové vysílání.

Existují různé typy GNSS přijímačů. V laboratoři přesného času FEL ČVUT se nachází GNSS přijímač GTR 51 řízený dříve rubidiovým, nyní dočasně cesiovým oscilátorem, který mimo jiné generuje CGGTTS data, které používá program pro metodu společného pozorování „Common View“ a oproti tomu jednodušší GPS přijímač u-Blox, který přes čítač řízený PPS pulsy již zmíněného oscilátoru, generuje data každou sekundu.



Obrázek 1.1: Schéma zapojení GTR51 a u-Blox přijímačů

Na rozdíl od GPS navigačních přijímačů, které vypočítávají polohy při pohybu, časové přijímače jsou umístěny na jednom stálém místě. Proto časové a frekvenční přijímače obvykle ukládají jednu fixní polohu a používají ji celou dobu měření.

---

<sup>7</sup> Global Positioning System



# 2 Metrologie času a frekvence

## 2.1 Definice času a frekvence

Čas je jedna ze základních veličin mezinárodního systému SI. Definice jedné sekundy je definována jako 9 192 631 770 násobek doby periody záření, která odpovídá době přechodu mezi dvěma hyper-jemnými hladinami základního stavu atomu cesia 133.

Tato definice lze použít k odvození jednotky frekvence (Hz). Vyjadřuje, kolik cyklických dějů se odehraje za jednu sekundu. Jednotka je pojmenována, podle fyzika Heinricha Hertze, který se pohyboval v oblasti elektromagnetických vln.

Udržování času zahrnuje porovnávání hodin umístěných v různých lokacích pomocí časových signálů. Z toho důvodu je potřeba jednotná souřadnicová soustava. Mezinárodní atomový čas (TAI) je definován pomocí atomových hodin. Údaje z těchto hodin přepočítává na rotující geoid a také na střední hladinu moře. Tento čas představuje nejpřesnější časovou stupnici, která není závislá na rotaci země. Rozdíl mezi TAI a UTC<sup>8</sup> se stále mění, kvůli potřebě občasného vložení sekundy („leap seconds“) jako kompenzaci nepravidelné rychlosti rotace země. Momentálně je to 35 sekund s tím, že v červnu 2015 se bude přidávat další.

Toto rozlišení má důležité následky. Perfektní cesiové hodiny, které obíhají kolem země, se budou jevit pozorovateli na zemi jako by měli frekvenční offset vůči TAI. S tímto rozdílem se musí počítat při používání korekce pro gravitační červený posun, Dopplerův posun atd. Tyto korekce jsou důležité při používání GNSS družic.

## 2.2 Cesiový Standard

Tento standard byl vybrán k definici sekundy z několika praktických důvodů. Jeden z nich je, že paprsky atomů cesia je lehké produkovat a detekovat. Frekvence hyper-jemného přechodu, který definuje sekundu je relativně vysoký a lze udělat celkem úzký. Zároveň je frekvence přechodu stále dostatečně nízká na to, aby šla manipulovat pomocí standardu mikrovlnných technik a obvodů.

Kvalitní komerční cesiový standard může projevovat částečný kolísání frekvence kolem  $2 * 10^{-14}$  přes jeden den. Frekvence stejného zařízení se může lišit od definice SI o  $1 * 10^{-13}$  občas i více a tento frekvenční offset se může časem pomalu měnit, jak přístroj stárne. Sestavení zařízení, jehož přesnost je porovnatelná k jeho stabilitě, je velmi složité a nákladné a existuje pouze několik takových standardů. Obvykle je nemožné redukovat systematický offset na dostatečně malé hodnoty a zbytkový offset musí být změřen a odstraněn. Operace tohoto standardu může být přerušena uprostřed vyhodnocování, to znamená, že mnoho frekvenčních standardů nemůže pracovat

---

<sup>8</sup> Coordinated Universal Time

kontinuálně jako hodiny. Systematický offset se také může pomalu časem měnit, takže vyhodnocování jejich magnitud je kontinuální a ne jen jednorázové.

Konvenční frekvenční standardy používají nehomogenní magnetické pole jako selektor stavu. Atomy vstupují do tohoto pole a jsou odraženy interakcí mezi nehomogenním magnetickým polem a magnetickým dipólem momentu atomu. Geometrie je nastavena tak, aby prošly jen atomy ve stavu  $F=3$ , ostatní atomy jsou zastaveny. Atomy, které projdou magnetem, vstupují do interagující oblasti, kde jsou ozářené mikrovlnnou radiací v přítomnosti konstantního magnetického pole, který rozdělí hyper-jemné úrovně díky Zeemanovu jevu<sup>9</sup>.

## 2.3 Rubidiový Standard

Cesium není jediný atom, který lze použít jako reference pro frekvenční standard. Dále se používá například rubidium a vodík. Abychom zjistili jejich frekvenci vztaženou k SI definici, musí být zařízení založená na rubidiu či vodíku kalibrovány s ohledem k hlavnímu zařízení založeném na cesiu, jestliže je jejich přesnost důležitá.

Rubidiové zařízení obvykle používá nízkotlaké rubidiové páry v buňce vyplněné vyrovnávacím plynem jako je helium nebo neon. Přenos hodin je mezi  $F=1, m_f=0$  a  $F=2, m_f=0$ . Tyto dva stavy přechodu hodin jsou v tepelné rovnováze. Výhody i nevýhody rubidiového zařízení spočívá v implementaci opticky čerpaných buněk s vyrovnávacím plynem spíše než samotný rozdíl mezi rubidiem a cesiem. Přestože má přechod rubidiových hodin nižší frekvenci, sekce kolize atomů ve studeném paprsku je podstatně menší než u cesia.

---

<sup>9</sup> Jedná se o rozštěpení spektrálních čar atomu, který je umístěn ve vnějším magnetickém poli.

## 3 Metody měření

Existuje několik odlišných způsobů GPS měření času a frekvence. Tyto způsoby lze rozdělit do tří hlavních kategorií: One-Way, Common View a Carrier Phase. Nejpoužívanější je metoda One-Way, protože je velmi jednoduše proveditelná a její nejistoty jsou přijatelné pro většinu kalibrací nebo testování. Common View a Carrier Phase už jsou složitější, protože je zde potřeba provést dodatečné offline zpracování naměřených dat, proto se obvykle používají spíše pro mezinárodní porovnávání mezi laboratořemi, kde je potřeba co nejmenších nejistot.

### 3.1 Měření One-Way

Tato metoda používá signál obdržený GPS přijímačem jako referenci pro kalibraci. Signál lze zachytávat v reálném čase, v tom případě není potřeba žádné dodatečné zpracování měření. Většinou se toto měření používá k synchronizaci časového pulsu nebo kalibraci zdroje frekvence.

Pro stanovení sledovatelnosti touto metodou potřebujeme takzvaný nepřerušovaný řetězec porovnávání. Řetězec může vypadat například takto:

Část řetězce	Reference	Porovnání
1.	SI jednotky	UTC (FEL)
2.	UTC (FEL)	Signály vysílaný GPS
3.	Signály vysílaný GPS	Signály přijímaný GPS
4.	Signály přijímaný GPS	Testované zařízení

Tabulka 3.1: Příklad řetězce porovnávání

Nejistoty 1. a 2. části řetězce jsou velmi malé a v podstatě nemají význam pro většinu měření, ale přesto musí být dokumentovány. Nejistota 3. části je nejistota daného přijímače určená vlastnostmi oscilátoru a kvalitou softwarového algoritmu přijímače. Nejistota 4. části je nejistota kalibračního procesu, která se může skládat například ze špatně umístěné antény nebo přijímacího zařízení, softwarových chyb, chyb kalibračních procedur nebo lidských chyb.

### 3.2 Měření Common View

Oproti metodě one-way, která porovnává hodiny nebo oscilátor vůči GNSS, tato metoda porovnává dva oscilátory umístěných v různých laboratořích. Tyto dva porovnávané oscilátory jsou měřeny vůči dvěma přijímačům, které zachytávají signály z jednotlivých GNSS družic. Rozlišují se dva typy common view a to takzvaný jednokanálový, při kterém přijímače postupují podle sledovacího rozpisu a přijímají údaje

pouze z jedné stejné družice a ty mezi sebou porovnávají, a vícekanálový, který nepoužívá žádný rozpis a přijímá údaje ze všech momentálně dostupných družic a porovnává jednotlivé družice mezi sebou a tuto diferenci pro jednotlivý časový úsek zprůměruje.

Přestože v dnešní době umí již drtivá většina přijímačů přijímat údaje z více družic, tak se jednobanální common view stále používá pro mezinárodní porovnávání. Jedna z výhod více kanálového common view je, že při dlouhodobém sledování nám nevypadne časová stopa (za předpokladu, že jsou oba přijímače na stejném kontinentu), protože by vždy měla být alespoň jedna družice viditelná oběma přijímači.

Data jsou přijímači sledovány v 13 minutových intervalech a další sledování se opakuje každých 16 minut. To přijímačům umožňuje zaměřit se na družici během 2 minut, 13 minut sledování družice a 1 minutu pro oddělení od dalšího sledování.

Nevýhoda common view je, že výsledky měření nejsou známy hned, ale až, když jsou data zpracována a porovnána, ale díky tomu, že laboratoře často vyvěšují výsledky jejich sledování družic na internet většinou následující den, lze zpracovávat tyto data s jednodenním zpožděním.

Common view pracuje nejlépe na vzdálenost mezi dvěma přijímači okolo stovek kilometrů a méně, protože to znamená, že přijímače vidí družice pod podobným úhlem, takže podmínky pro přijímání jsou podobné v obou laboratořích. Na delší vzdálenost, kde jsou podmínky odlišné, se vyruší méně chyb při odečítání dat. Tato metoda vyruší všechny chyby měření shodné pro obě porovnávané laboratoře. Chyby, které jsou odlišné, se vyruší jen částečně a omezují tak nejistoty měření. Mezi tyto faktory patří chyby efemeridu, zpoždění ionosféry a troposféry, chyby korekce, chyby nastavení přijímače a další zpoždění způsobené přijímacím zařízením (délka kabelů atd.). Čím méně chyb se vyruší, tím se nejistoty měření více blíží těm, při použití metody one-way. Pro co nejlepší výsledky je také vhodné použít stejné přijímací zařízení a vyměřit pozici antény co nejpřesněji to je možné. Nejistoty této metody by při správných podmínkách měly být menší než 10 ns přes jeden den.

### 3.3 Měření Carrier Phase

Tato metoda používaná převážně pro přenos frekvence. Používají se oba L1 i L2 nosný frekvence místo přeneseného kódu satelitem. Carrier Phase měření může být jak one-way v reálním čase, tak po procesu zpracované common view. Jelikož frekvence nosné je více jak 1000 krát vyšší než frekvence C/A kódu, dosažitelné rozlišení je mnohem větší. Toho lze ale využít pouze provedením korekce měření pomocí orbitálních dat a modelů ionosféry a troposféry. Také je potřeba korigovat sklouznutí cyklu.

Jelikož tato metoda potřebuje rozsáhlý zpracování dat po skončení procesu sbírání těchto dat, není vhodná pro všechna každodenní měření. Tato metoda je používána například pro mezinárodní porovnávání mezi frekvenčními standardy, když je potřeba, aby byly nejistoty co nejmenší.

Tyto porovnání většinou využívají techniku common view s fázovou nosnou. Signály obdržené z přijímače jsou porovnány se signály obdrženými z lokálního

frekvenčního standardu. Předtím než výsledky měření porovnáme s jinou laboratoří, jsou data přeloženy z jejich původního formátu do takzvaného RINEX<sup>10</sup> formátu.

Nejvhodnější by bylo, kdyby stačil k porovnávání pouze jeden přijímač na každém porovnávaném místě, ale kvůli velkým rozdílům v atmosférickém zpoždění mezi vzdálenějšími laboratořemi, je využita síť přijímačů pro zlepšení výsledků měření. Každý přijímač sbírá data, které jsou použity k odhadu atmosférického zpoždění. Tato data jsou dále zpracována pomocí přesných informací ohledně dráhy družic a detailního modelu ionosféry a troposféry.

---

<sup>10</sup> Receiver Independent Exchange

# 4 Formáty dat

## 4.1 CGGTTS formát

CGGTTS<sup>11</sup> standard definuje formát dat, který slouží k přesnému přenesení času a frekvence pomocí přijímačů GNSS. Tento standard byl postupem času vylepšen na verzi 2.0 (verze 1.0 byla pouze pro GPS), kterou využívá i tento software, proto se zde podrobně popisují tuto verzi. Standard obsahuje:

### 4.1.1 File header

Hlavička souboru neboli „File header“ ve formátu:

1. Řádek: “GGTTS\*GPS\*DATA\*FORMAT\*VERSION\*= \*” N
2. Řádek: “REV\*DATE\* = \*” YYYY” - “MM” - “DD” - datum se změní, když je změněn parametr v hlavičce. Y – Year, M – Month, D – Day.
3. Řádek: “RCVR\* = \*” MAKER”\*”TYPE”\*”SERIAL NUMBER”\*”YEAR”\*” SOFTWARE NUMBER
4. Řádek: “CH\* = \*” CHANNEL NUMBER
5. Řádek: “IMS\* = \*” MAKER” \* “TYPE” \* “SERIAL NUMBER” \* “YEAR” \* “ SOFTWARE NUMBER
6. Řádek: “LAB\* = \*” LABORATORY
7. Řádek: “X\* = \*” X COORDINATE “\*m” – X souřadnice GPS antény.
8. Řádek: “Y\* = \*” Y COORDINATE “\*m” – Y souřadnice GPS antény.
9. Řádek: “Z\* = \*” Z COORDINATE “\*m” – Z souřadnice GPS antény.
10. Řádek: “FRAME\* = \*” FRAME - Označení rámce os GPS antény???????
11. Řádek: “COMMENTS\* = \*” COMMENTS
12. Řádek: “INT\*DLY\* = \*” INTERNAL DELAY “\*ns” - Vnitřní zpoždění GPS přijímače.
13. Řádek: “CAB\*DLY\* = \*” CABLE DELAY “\*ns” - Zpoždění způsobené délkou kabelu vedoucího z GPS antény do hlavní jednotky vstupující do GPS přijímače.
14. Řádek: “REF\*DLY\* = \*” REFERENCE DELAY “\*ns” - Zpoždění způsobené délkou kabelu vedoucího z výstupu reference do hlavní jednotky vstupující do GPS přijímače.

---

<sup>11</sup> Consultative Committee for Time and Frequency Group on GNSS Time Transfer Standards

15. Řádek: "REF\* = \*" REFERENCE

16. Řádek: "CKSUM\* = \*" XX - Hexadecimální součet ASCII znaků přechozích řádků, modulo 256

17. Řádek: Prázdný řádek

#### 4.1.2 Line header

Hlavičkový řádek neboli „Line header“ ve formátu:

a) Bez naměřených ionosférických zpoždění

18. Řádek:

```
"PRN*CL**MJD**STTIME*TRKL*ELV*AZTH***REFSV*****SRSV***  
**REFSYS****SRSYS**DSG*IOE*MDTR*SMDT*MDIO*SMDI*FR*HC*F  
RC*CK"
```

b) S naměřeným ionosférickým zpožděním

18. Řádek:

```
"PRN*CL**MJD**STTIME*TRKL*ELV*AZTH***REFSV*****SRSV***  
**REFSYS****SRSYS**DSG*IOE*MDTR*SMDT*MDIO*SMDI*MSIO*S  
MSI*ISG*FR*HC*FRC*CK"
```

#### 4.1.3 Unit header

Hlavička jednotek neboli „Unit header“ ve tvaru:

a) Bez naměřených ionosférických zpoždění

19. Řádek:

```
"*****hmmss**s*.1dg*.1dg****.1ns*****.1ps/s*****.1ns****.1  
ps/s*.1ns*****.1ns.1ps/s.1ns.1ps/s**"
```

b) S naměřeným ionosférickým zpožděním

19. Řádek:

```
"*****hmmss**s*.1dg*.1dg****.1ns*****.1ps/s*****.1ns****.1  
ps/s*.1ns*****.1ns.1ps/s.1ns.1ps/s.1ns.1ps/s.1ns**"
```

#### 4.1.4 Data line

20. Řádek je datový řádek neboli „Data line“. Data mají následující význam:

**PRN:** číslo družice [-]

**CL:** hexadecimální číslo odpovídající třídě bytu společného pozorování [-]

**MJD:** modifikované Juliánské datum [d]

**STTIME:** čas začátku sledování ve formátu hhhmmss<sup>12</sup>

**TRKL:** délka sledování [s] (780 sekund pro úplné sledování)

**ELV:** průmět satelitu v polovině sledování [ $.1^\circ$ ]

**AZTH:** azimut satelitu v polovině sledování [ $.1^\circ$ ]

**REFSV:** časový rozdíl mezi laboratorní referencí a satelitním časem vztažen ke středu sledování [.1ns]

**SRSV:** sklon stanovený lineárním vyrovnáním k produkci REFSV [.1ps]

**REFSYS:** časový rozdíl mezi laboratorní referencí a systémovým časem GPS vztažen ke středu sledování [.1ns]

**SRSYS:** sklon stanovený lineárním vyrovnáním k produkci REFSYS [.1ps]

**DSG:** efektivní hodnota zbytků po lineárním vyrovnání změřené REFSYS [.1ns]

**IOE:** index efemeridu<sup>13</sup> použitého při zpracování měření [-]

**MDTR:** modelové troposférické zpoždění vztažené ke středu sledování [.1ns]

**SMDT:** sklon stanovený lineárním vyrovnáním k produkci MDTR [.1ps]

**MDIO:** modelové ionosférické zpoždění vztažené ke středu sledování [.1ns]

**SMDI:** sklon stanovený lineárním vyrovnáním k produkci MDIO [.1ps]

**MSIO:** měřené ionosférické zpoždění vztažené ke středu sledování [.1ns]

**SMSI:** sklon stanovený lineárním vyrovnáním k produkci MSIO [.1ps]

**ISG:** efektivní hodnota zbytků po lineárním vyrovnání změřené MSIO [.1ns]

**FR:** číslo kanálu přenosové frekvence pro GLONASS<sup>14</sup> (pro GPS nastaveno na 0) [-]

**HC:** číslo kanálu přijímače [-]

**FRC:** frekvence a typ kódu použitý pro pseudo-rozsahové měření, kde:

---

<sup>12</sup> Formát HourMinuteSecond dohromady bez mezer či dvojtečky

<sup>13</sup> Údaje o zdánlivé poloze družice

<sup>14</sup> Globální družicový polohový systém vyvinutý v SSSR



L1C – L1 C/A kód  
L1P – L1 P kód  
L2C – L2 C/A kód  
L2P – L2 P kód  
L5C - L5 C/A kód

**CK:** součet hodnot ASCII znaků předchozích řádků, modulo 256

## 4.2 RAW formát

Je to proprietární formát a stejně jako CGGTTS formát, má i tento formát dvě verze 1.0 a 2.0 a stejně tak je verze 2.0 rozšířená i pro jiné GNSS přijímače než pouze GPS. Na rozdíl od CGGTTS, kde jednotlivé kanály měly svůj vlastní řádek, zde jsou všechny kanály (L1C,L1P,L2C,L2P a L5C) zobrazeny za sebou. Oproti CGGTTS formátu, který generoval data po 16 minutách, RAW formát je generuje po 10 sekundách.

Hlavička tohoto formátu je první řádek souboru a je v něm informace o verzi RAW formátu (pro verzi 2: „Raw Time GNSS Data V02“). Následuje jako 3. řádek, hlavičkový řádek, který obsahuje informace o datech, který jsou v souboru uloženy a v jakém pořadí. Jako 4. řádek je řádek pro jednotky, který informuje o tom, v jakých jednotkách jsou jednotlivá data. 5. Řádek již obsahuje přímo data a to v tomto pořadí:

**PRN:** číslo družice [-]

- GPS – „G“ následovaný číslem družice
- GLONASS – „R“ následovaný číslem okénka kalendáře
- GALILEO – „E“ následovaný číslem družice
- SBAS – „S“ následovaný číslem družice

**MJD:** modifikované Juliánské datum [d]

**UTC:** referenční čas ve formátu hhmmss<sup>15</sup>

**EL:** průmět satelitu v referenčním čase [°]

**AZ:** azimut satelitu v referenčním čase [°]

**IOE:** index efemeridu použitého při zpracování měření [-]

**C1code:** časový rozdíl mezi laboratorní referencí a satelitním časem vycházející z kódového měření [ns]

**C1carrier:** časový rozdíl mezi laboratorní referencí a satelitním časem vycházející z měření fáze nosné [ns]

**C1CNR:** síla signálu [dBHz]

Značení C1 znamená:

- GPS L1 C/A signál

---

<sup>15</sup> Formát HourMinuteSecond dohromady bez mezer či dvojtečky

- b) GLONASS L1OF signál
- c) GALILEO EI signál
- d) SBAS L1 signál

**P1code:** časový rozdíl mezi laboratorní referencí a satelitním časem vycházející z kódového měření [ns]

**P1carrier:** časový rozdíl mezi laboratorní referencí a satelitním časem vycházející z měření fáze nosné [ns]

**P1CNR:** síla signálu [dBHz]

Značení P1 znamená:

- a) GPS L1P signál
- b) GLONASS L1SF signál
- c) GALILEO E5 AltBOC signál

**L1IONO:** modelované ionosférické zpoždění GPS frekvence kanálu L1 [ns]

**C2code:** časový rozdíl mezi laboratorní referencí a satelitním časem vycházející z kódového měření [ns]

**C2carrier:** časový rozdíl mezi laboratorní referencí a satelitním časem vycházející z měření fáze nosné [ns]

**C2CNR:** síla signálu [dBHz]

Značení C1 znamená:

- a) GPS L2C signál
- b) GLONASS L2OF signál

**P2code:** časový rozdíl mezi laboratorní referencí a satelitním časem vycházející z kódového měření [ns]

**P2carrier:** časový rozdíl mezi laboratorní referencí a satelitním časem vycházející z měření fáze nosné [ns]

**P2CNR:** síla signálu [dBHz]

Značení P2 znamená:

- a) GPS L2P signál
- b) GLONASS L2SF signál

**L2IONO:** modelované ionosférické zpoždění GPS frekvence kanálu L2 [ns]

**L5code:** časový rozdíl mezi laboratorní referencí a satelitním časem vycházející z kódového měření [ns]

**L5carrier:** časový rozdíl mezi laboratorní referencí a satelitním časem vycházející z měření fáze nosné [ns]

**L5CNR:** síla signálu [dBHz]

Značení L5 znamená:

- a) GPS L2 signál
- b) GALILEO E5a signál
- c) SBAS L5 signál

**L5IONO:** modelované ionosférické zpoždění GPS frekvence kanálu L5 [ns]

**TROPO:** modelované troposférické zpoždění [ns]

**FR:** frekvenční kanál [-]

## 4.3 RINEX formát

RINEX neboli Receiver Independent Exchange Format je formát nezávislý na přijímači. Tento formát umožňuje uživateli po procesové zpracování dat k produkci přesnějších výsledků (metoda carrier-phase).

Formát 2.11 (spuštěný na GTR 51) obsahuje:

1. Soubor observačních dat
2. Soubor navigačních zpráv
3. Soubor meteorologických dat
4. Soubor GLONASS navigačních zpráv

Každý tento soubor obsahuje hlavičku a sekci dat. Hlavička obsahuje globální informace pro celý soubor a je na začátku souboru. Tento formát byl optimalizován, aby zabíral minimálně místa nezávisle na počtu pozorovacích typů. Jak observační soubor, tak meteorologický soubor obsahuje data z jedné sítě a jedné seance.

# 5 Využité přístroje

## 5.1 GTR 51

GTR 51 je více frekvenční GNSS přijímač používaný pro přenos času a frekvence. Přijímač podporuje jak kódové, tak fázové měření. Díky velké šířce pásma a vylepšenému zpracování signálu, poskytují i kódové měření s přesností větší než jednotky nanosekund. Přijímač je napojen na místní síť, takže lze data rovnou uploadovat.

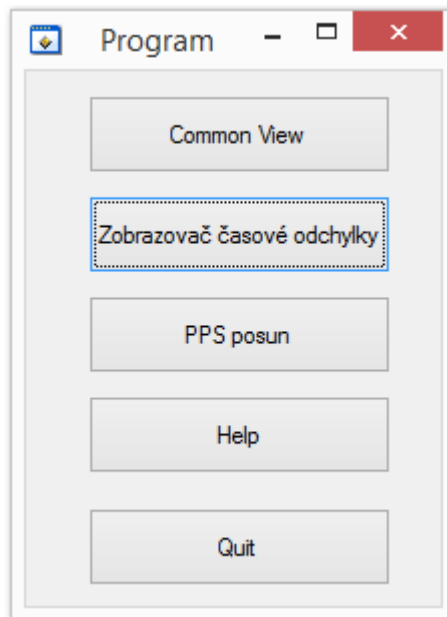
Přijímač lze ovládat z jakéhokoliv počítače připojeného do sítě a má přístup na stránku s uživatelským rozhraním. V tomto rozhraní lze, jak ovládat přijímač a sledovat probíhající operace na GTR 51, tak i stahovat měřená data.

Tento přijímač dokáže generovat data ve formátech: CGGTTS verze 01 i 02, RINEX verze 2.10, 2.11 a 3.01, RAW, L3P a další.

## 5.2 u-Blox LEA-6T

LEA-6T přijímá pouze GPS. Poskytuje precizní GPS časování pro náročné synchronizace. Tento modul představuje uživatelsky nastavitelné výstupy časových pulzů a frekvence. Lze dosáhnout přesnosti 15 ns při použití informace o chybě kvantování k vykompenzování zrnitosti časového pulsu. Měření je možné i s jenom jednou viditelnou družicí, to znamená, že čas lze udržovat i za špatných podmínek.

# 6 Software



Obrázek 6.1: Úvodní okno programu

Jak lze vidět na obrázku 6.1, program má jako úvodní okno rozcestník, kde si můžeme vybrat mezi programem pro Common View, zobrazovač čítače nebo program pro posun PPS pulsů.

Pro sekundové údaje se vyplatí používat unixový čas definovaný jako počet sekund od půlnoci na 1. 1. 1970. Pro lepší přehlednost v grafu se naopak hodí používat modifikované Juliánské datum (dále jen MJD), které je odvozeno od Juliánského data, což je počet dní, které uplynuly od poledne světového času 1. ledna roku 4713 př. n. l. Modifikované Juliánské datum je o 2 400 000,5 dnů menší než Juliánské datum, tedy je to počet dní od půlnoci na 17. 11. 1858. Z toho důvodu je jako součást druhého programu i převaděč těchto jednotek.

## 6.1 Common View

### 6.1.1 Úvod

První program tohoto softwaru slouží k porovnávání časových stupnic etalonů umístěných ve vzdálených laboratořích pomocí systému GPS. V obou laboratořích je umístěn přijímač signálu družic GNSS, který měří časový rozdíl mezi systémovým časem GPS a časem etalonu dané laboratoře. Tyto časové rozdíly poté odečteme a dostaneme časový rozdíl etalonů umístěných v daných laboratořích. Při metodě common view se obvykle používá jeden C/A kanál (v tomto programu získaného z CGGTTS formátu),

takže ionosférické zpoždění nelze úplně vyloučit, pouze částečně redukovat pomocí modelovaného ionosférického zpoždění. Proto se pro některá měření vyplatí použít L3P kód, kde je ionosférické zpoždění eliminováno lineární kombinací kanálů L1 a L2.

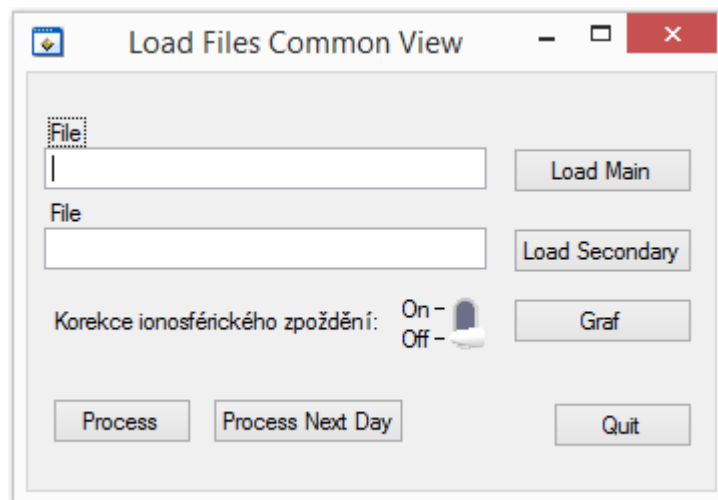
$$\Delta t_1 = refGPS_1 - refGPS_2 \quad (1)$$

Uživatel má možnost si zapnout či vypnout korekci ionosféry, jelikož není možné zjistit, jestli oba přijímače použily při výpočtu MDIO stejné parametry. Při porovnání na menší vzdálenosti (<500km) je vhodné korekci ze změřených dat vyloučit.

$$\Delta t_1 = (refGPS_1 + MDIO_1) - (refGPS_2 + MDIO_2) \quad (2)$$

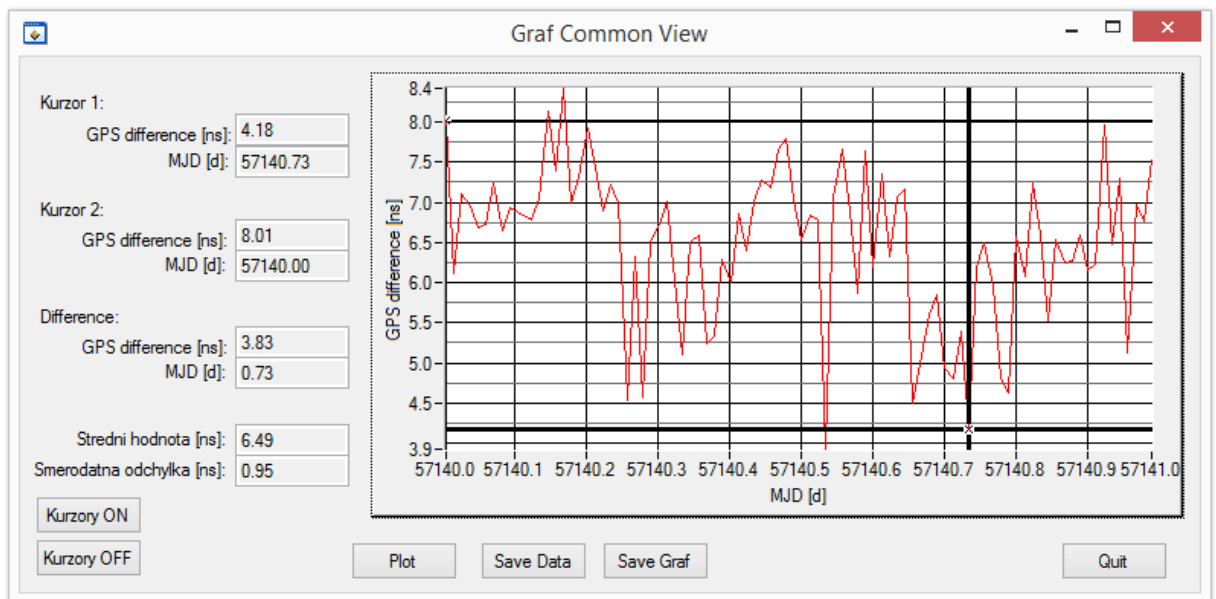
Protože máme pro jeden časový úsek hodnoty z více družic, tak výsledné hodnoty ze všech pozorovaných družic obou laboratoří zprůměrujeme. Do měření jsou zahrnuty všechny družice, které lze v dané laboratoři v daný čas přijímat.

## 6.1.2 Program



Obrázek 6.2: Loadovací okno programu pro Common View

Tento program funguje tak, že si vybereme CGGTTS soubory dvou laboratoří, které chceme porovnávat a určíme si, která laboratoř je hlavní a kterou k ní porovnáváme. Podle toho nahrajeme soubor do správné kolonky buď tlačítkem „Load Main“ nebo tlačítkem „Load Secondary“. Dále si lze vybrat, jestli chceme vypnout či zapnout korekci ionosférického zpoždění. Máme-li soubory nahrané v kolonkách, tak lze spustit samotný proces porovnávání tlačítkem „Process“. Poté máme možnost nahrát následující den pro zobrazení více dnů najednou tlačítkem „Process Next Day“ nebo si otevřít okno grafu tlačítkem „Graf“.



Obrázek 6.3: Okno s grafem programu pro Common View

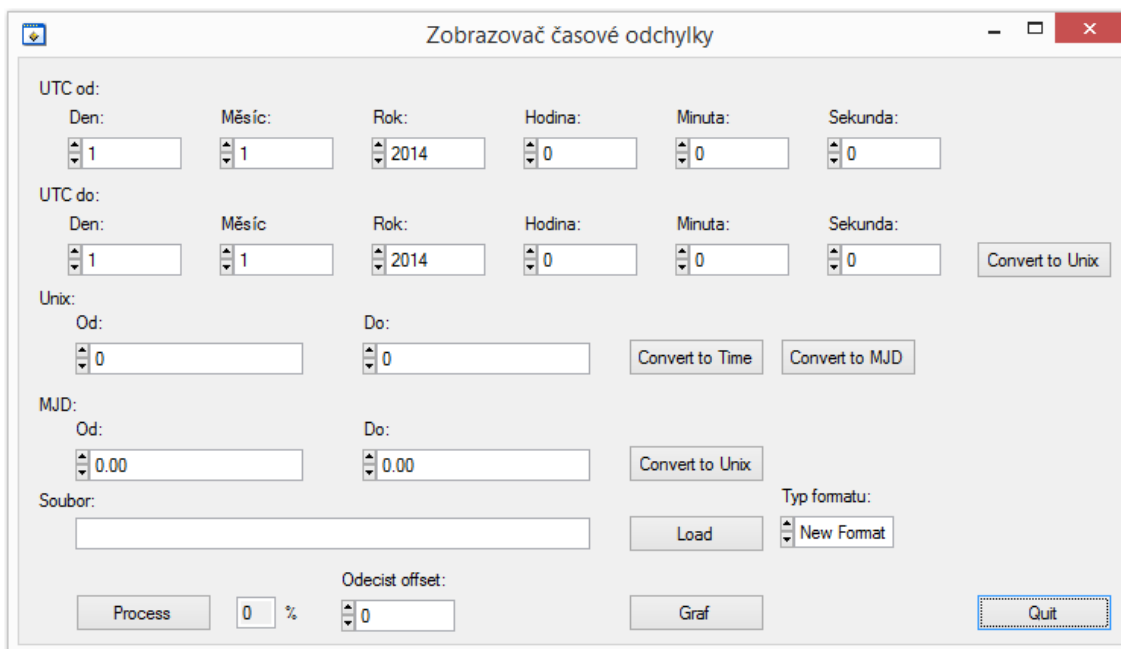
Máme-li otevřené okno grafu, pak si lze graf zpracovaných dnů jednoduše zobrazit tlačítkem „Plot“. Pro lepší orientaci v grafu máme k dispozici dva kurzory, které lze zapnout popřípadě vypnout tlačítka „Kurzory ON“ a „Kurzory OFF“. Kurzory lze snadno zjistit přesnou hodnotu v grafu, která se zobrazí v části nalevo od grafu, kde je také hodnota, která ukazuje vzdálenost obou os grafu mezi dvěma kurzory, takže lze snadno zobrazit např. hodnotu „špička-špička“. Dále se nám v levé části po vykreslení grafu zobrazí jeho Střední hodnota a Směrodatná odchylka. Pokud si chceme hodnoty daného grafu uložit, stačí kliknout na tlačítko „Save Data“ nebo si lze uložit celý graf jako obrázek ve formátu png a vybrat si kam si chceme ukládat. Tyto uložená data zároveň slouží jako vstup třetího programu zabývajícího se posunu pulsů PPS.

## 6.2 Zobrazení časové odchylky

### 6.2.1 Úvod

Druhý program slouží jako zobrazovač časové odchylky dvou pulsů přivedených na čítač, na který může být připojený u-Blox GPS přijímač. Čítač zachytává data z GPS přijímače a je řízen PPS pulsy cesiových či rubidiových hodin. V ideálním případě máme tedy pro každou sekundu údaj z čítače. To je jeden z důvodů proč je vhodné pro data používat Unixový čas, který se taktéž navyšuje po sekundách.

## 6.2.2 Program



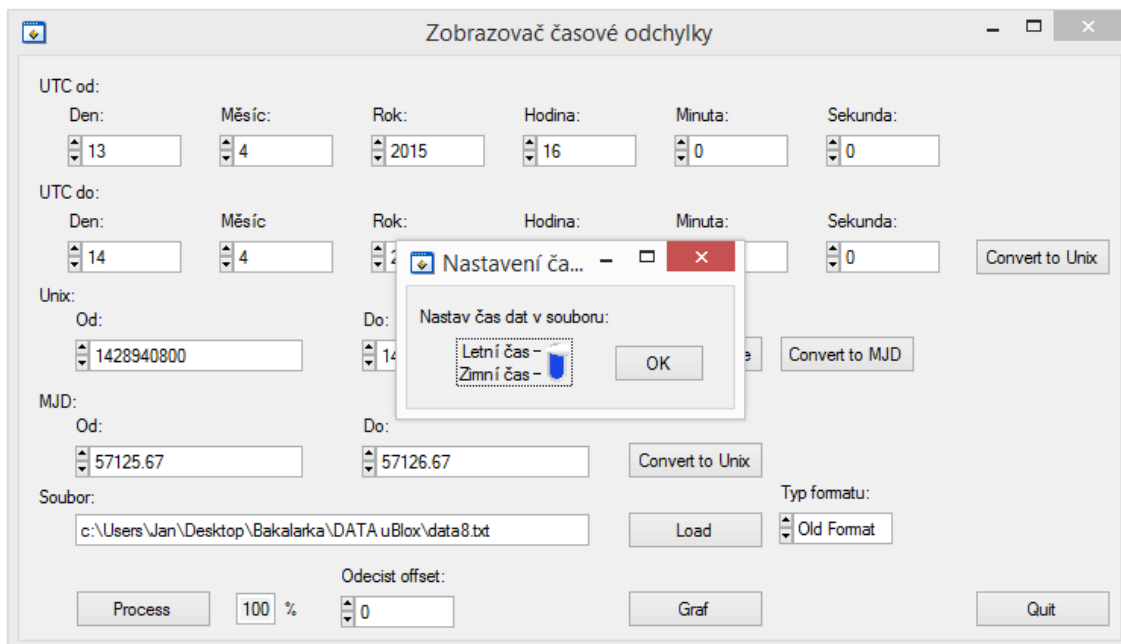
Obrázek 6.4: Úvodní okno programu pro Zobrazení časové odchylky

Jelikož tento program pracuje se soubory obsahující data často i za celý měsíc, je vhodné v těchto datech vyhledávat jen datový záznam, který nás zajímá (např. jeden konkrétní den). Pro tento účel bylo potřeba do programu přidat vyhledávání podle Unixového času a také převaděč, který nám převede časový údaj navzájem mezi formáty ddmmyyhhmmss<sup>16</sup>, Unix časem a MJD formátem. Pro převedení mezi formáty stačí vyplnit příslušné pole a převést tlačítka „Convert to Unix“, „Convert to Time“ a „Convert to MJD“.

Nahrávání příslušných souborů funguje stejně jako v předchozím programu tlačítkem „Load“, ale protože se používají dva různé formáty dat, je třeba vybrat si, jaký formát chceme zpracovávat. Dále si lze nastavit hodnotu offsetu, který chceme odečíst. Jestli máme nahraný soubor a vybrán formát, pak můžeme spustit proces zpracování dat tlačítkem „Process“. Jelikož starý 4 sloupcový formát neuvádí přímo unixový čas, ale pouze systémový čas, je třeba zadat, jestli jsou data v souboru v letním či zimním čase. Proto se nám při vybrání starého formátu zobrazí tabulka (obrázek 6.5), kde tuto informaci upřesníme.

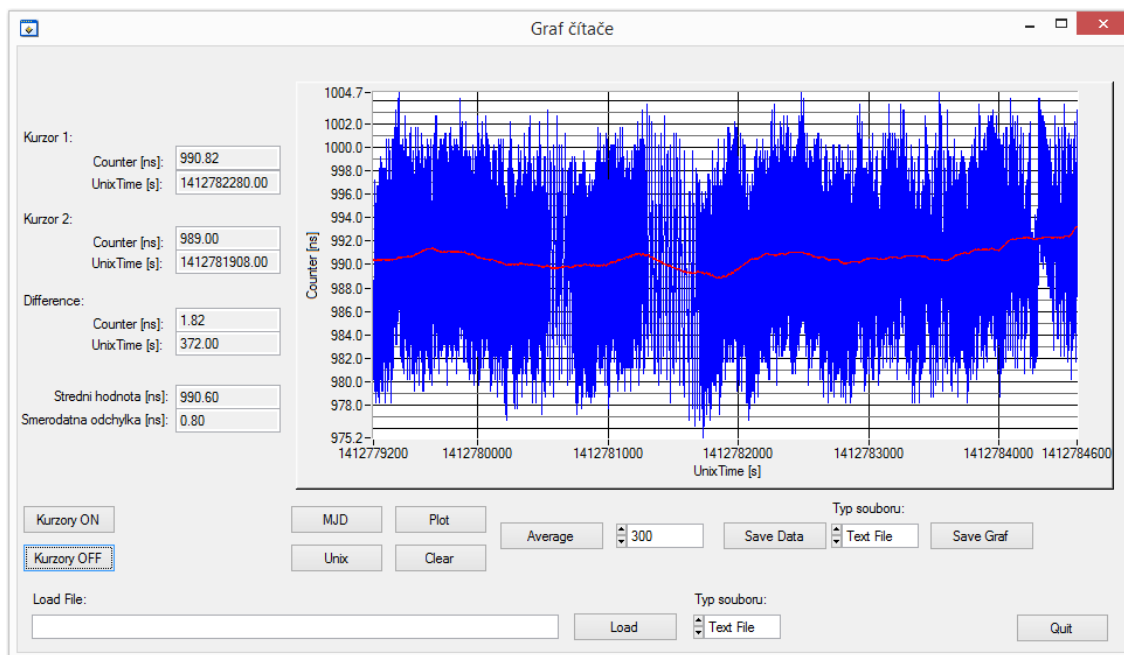
<sup>16</sup> Časový údaj ve tvaru den měsíc rok hodina minuta sekunda





Obrázek 6.5: Okno s nastavením času dat v souboru

Pro oba dva formáty se vyhledává v souboru podle zadaného rozmezí unixového času (u starého formátu se systémový čas v souboru přepočítává na unixový čas). Přestože se předpokládá, že o nahraném souboru máme nějaké informace, tak pro jistotu program kontroluje, jestli se vyhledávané rozmezí v souboru nachází, pokud uživatel zadá špatné rozmezí, program ho upozorní a popřípadě mu nastaví minimální unixový časový údaj. Dále si lze zobrazit okno grafu tlačítkem „Graf“.



Obrázek 6.6: Okno Grafu čítače

Okno grafu čítače má stejně jako okno grafu předchozího programu možnost zobrazit střední hodnotu a směrodatnou odchylku grafu, zapnout/vypnout kurzory grafu či zoomovat s pomocí přidržené klávesy ctrl. Tlačítkem „Plot“ si zobrazíme hodnoty čítače (modrá barva). Dále máme však možnost přepínat x-osu mezi formáty MJD [d] tlačítkem „MJD“ a UnixTime [s] tlačítkem „Unix“, která se hodí, protože data jsou ve formátu Unix času, ale ve formátu MJD se dá lépe orientovat a porovnávat s grafy Common View, kde se používá MJD. Také máme možnost zobrazit si klouzavý průměr tlačítkem „Average“ a nastavit si počet vzorku z obou stran od daného bodu, z kterých se tento průměr vypočítává. Automaticky je nastaven průměr z 300 sekundových vzorků v obou směrech tzn. průměr přes 10 minut, ale tento počet si lze přenastavit. Pro zobrazení samostatného průměru (červená barva) stačí vyčistit graf tlačítkem „Clear“ a zobrazit si pouze tento průměr. Po proběhnutí zpracování dat, si lze data uložit tlačítkem „Save Data“ a nastavit jestli je chceme uložit jako textová data či jako binární data. Tyto data slouží jako druhý vstup třetího programu. Dále si lze tyto uložená data znovu nahrát do grafu tlačítkem „Load“ a znovu si vybrat jaké data chceme nahrávat, jestli textová či binární. Program umí uložit graf jako obrázek formátu png tlačítkem „Save Graf“.

## 6.3 PPS posun

### 6.3.1 Úvod

Třetí program zobrazuje posun PPS pulsů mezi dvěma laboratořemi po korekci rozsahu (je-li korekce k dispozici) a to tak, že používá jako vstup výstupy z prvního a druhého programu viz následující rovnice.

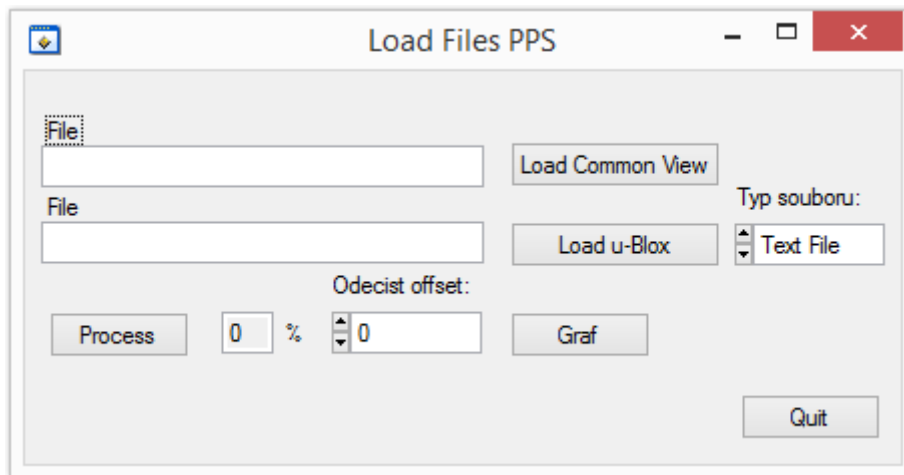
$$\Delta t_1 = refGPS_1 - refGPS_2 \quad (3)$$

$$\Delta t_2 = ref\mu Blox - refGPS_1 - correction - offset \quad (4)$$

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = ref\mu Blox - refGPS_2 - correction - offset \quad (5)$$

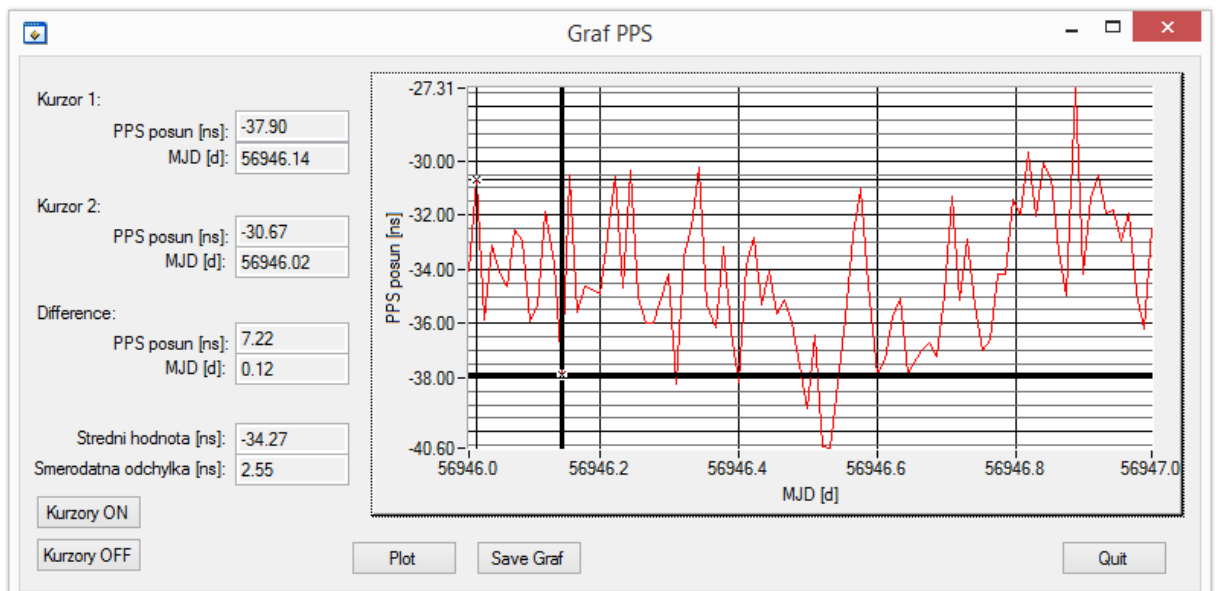
Program musí hlídat čas záznamu jednotlivých dat a porovnávat mezi sebou jen údaje naměřené ve stejný čas. To znamená, že z druhého souboru, kde jsou záznamy po každé sekundě lze vybrat jen údaje se shodnou sekundou k údajům z prvního souboru.

## 6.3.2 Program



Obrázek 6.7: Loadovací okno programu pro PPS posun

Nahrávání souborů funguje stejně jako v programu pro Common View s tím, že jako první vstup programu je soubor dat zpracovaných z prvního programu a jako druhý vstup je soubor dat zpracovaných druhým programem pro u-Blox, kde je možnost si data uložit i binárně, takže je potřeba si při nahrávání vybrat jestli jsou binární či textové. Dále si zde lze nastavit offset. Zpracování dat spustíme tlačítkem „Process“ a po zpracování si lze zobrazit graf tlačítkem „Graf“.



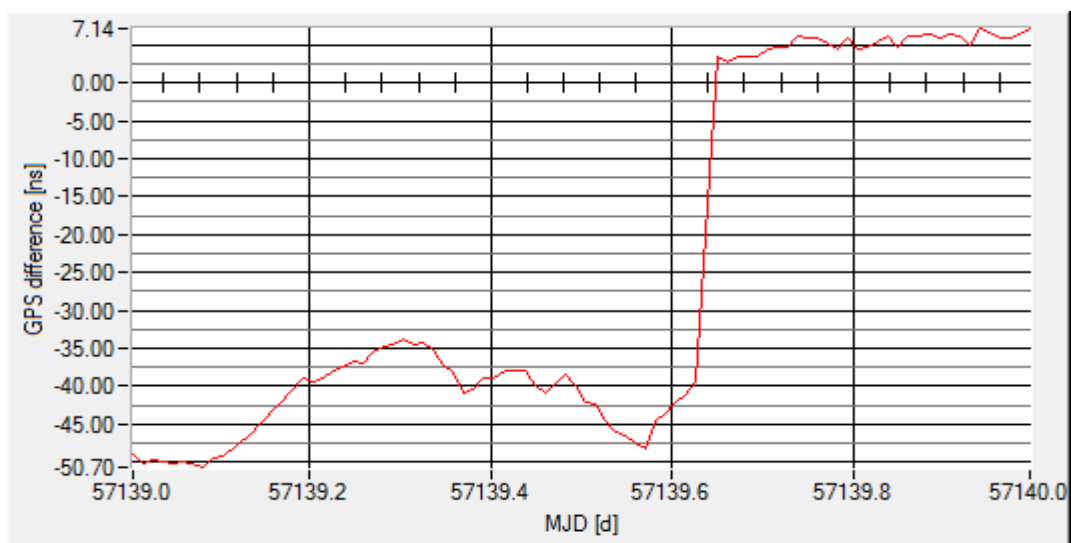
Obrázek 6.8: Okno Grafu pro PPS posun

Okno grafu funguje stejně jako u okna grafu pro common view. Jsou tu tedy k dispozici funkce pro vypnutí/zapnutí kurzorů a uložení grafu jako obrázek ve formátu png.

# 7 Zpracované výsledky

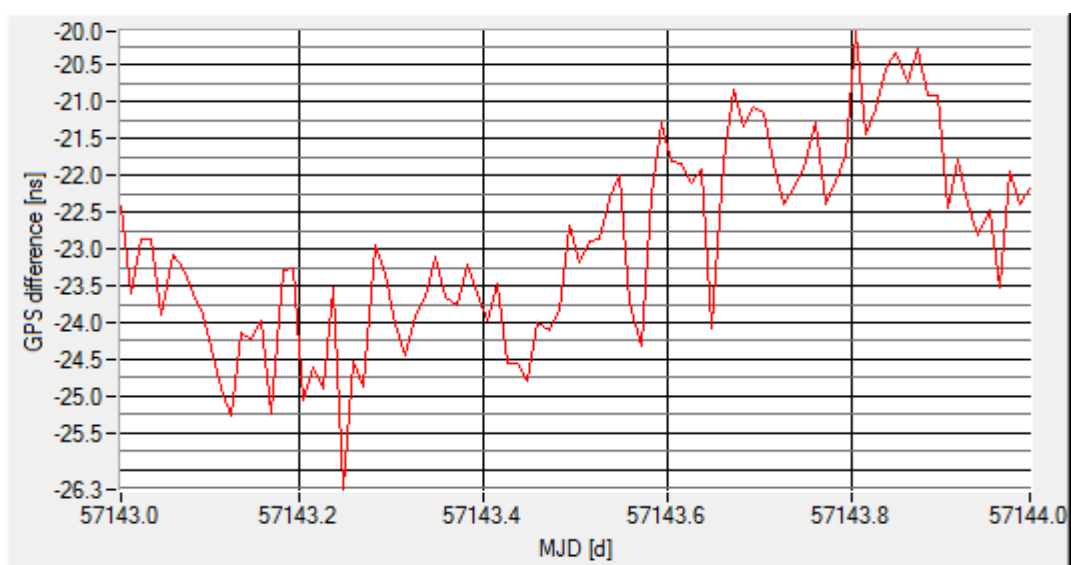
## 7.1 Common View výsledky

Během dne 27. 4. 2015 byly v laboratoři pro přístroj GTR-51 vyměněny rubidiové hodiny za cesiové hodiny. Tuto změnu v odchylce znázorňuje následující graf.



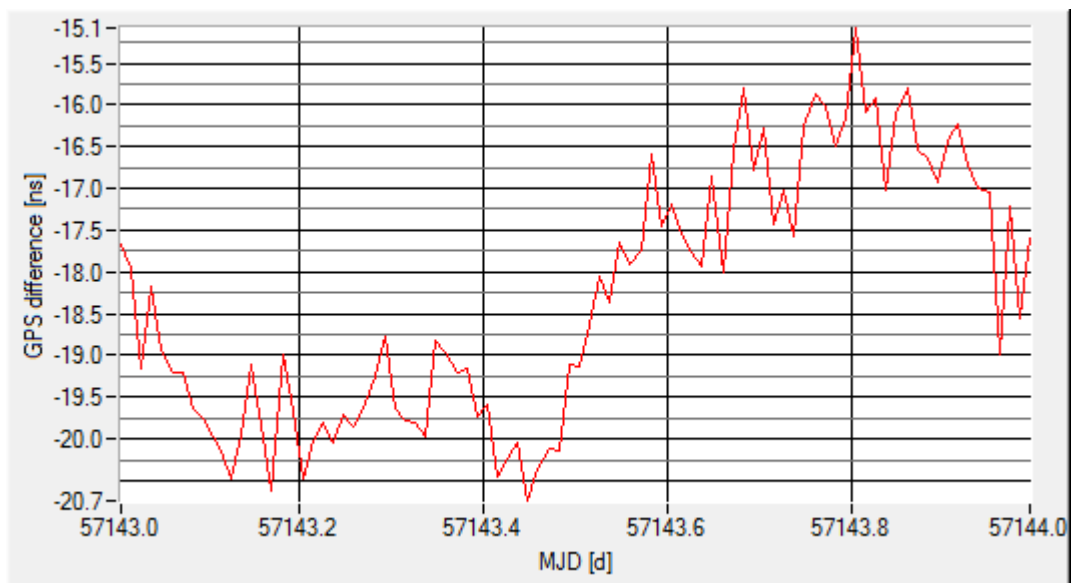
Obrázek 7.1: Graf zaznamenávající přechod z rubidia na cesium

Na následujícím grafu lze vidět odchylku FEL vůči ÚFE s porovnáním kanálů LIC ze dne 1. 5. 2015. Korekce ionosféry je vypnuta. Směrodatná odchylka vypočtena programem je 1,33 ns a střední hodnota je -22,92 ns.



Obrázek 7.2: Graf common view CGGTTS ze dne 1. 5. 2015

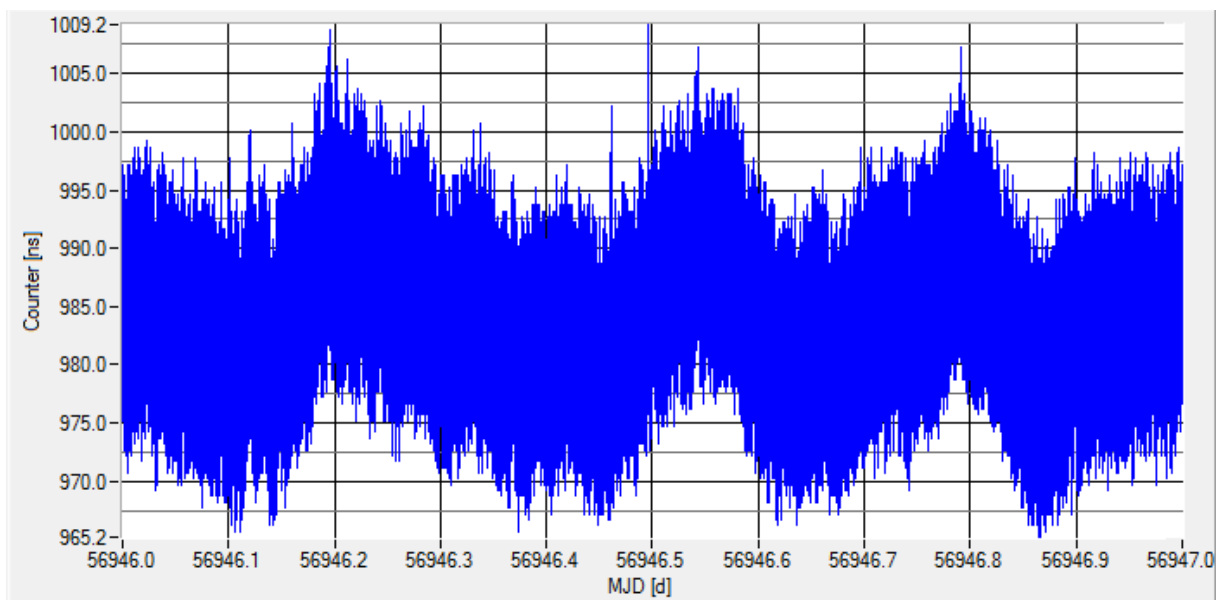
Zde oproti tomu máme grafu odchytku FEL vůči ÚFE s porovnáním kanálů L3P ze dne 1. 5. 2015. Směrodatná odchytky vypočtena programem je 1,51 ns a střední hodnota je -18,3 ns.



Obrázek 7.3: Graf common view L3P ze dne 1. 5. 2015

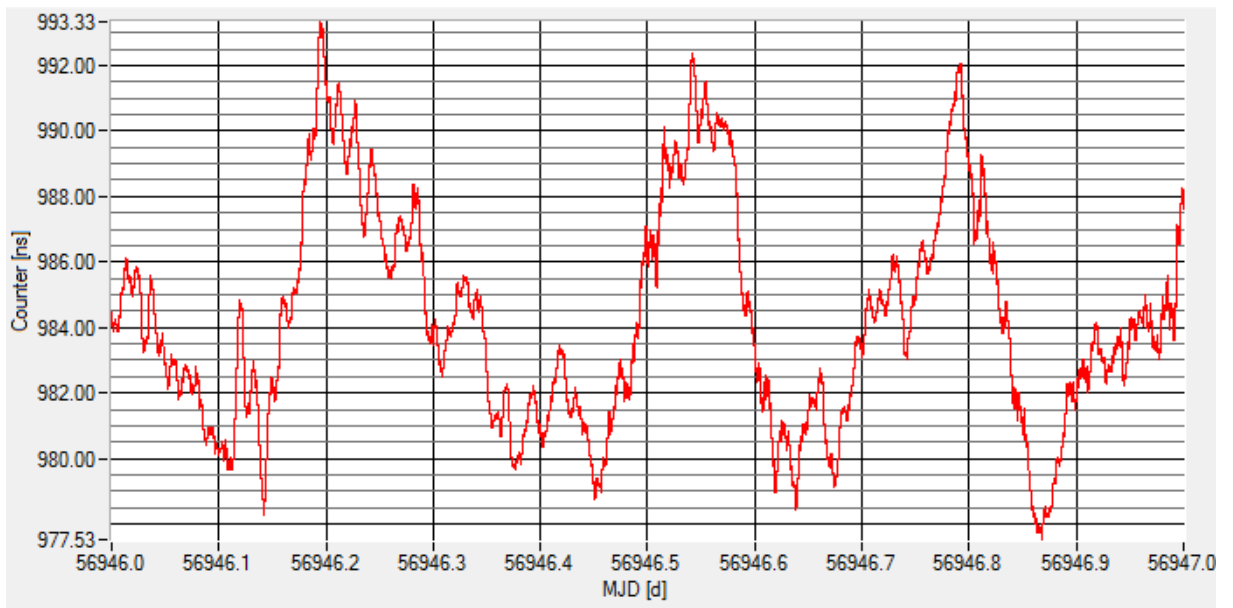
## 7.2 Výsledky odchylek

Na následujícím grafu lze vidět časovou odchylku přijímače u-Blox od signálu PPS generovaného rubidiovým etalonem přes jeden den (16. 10. 2014)



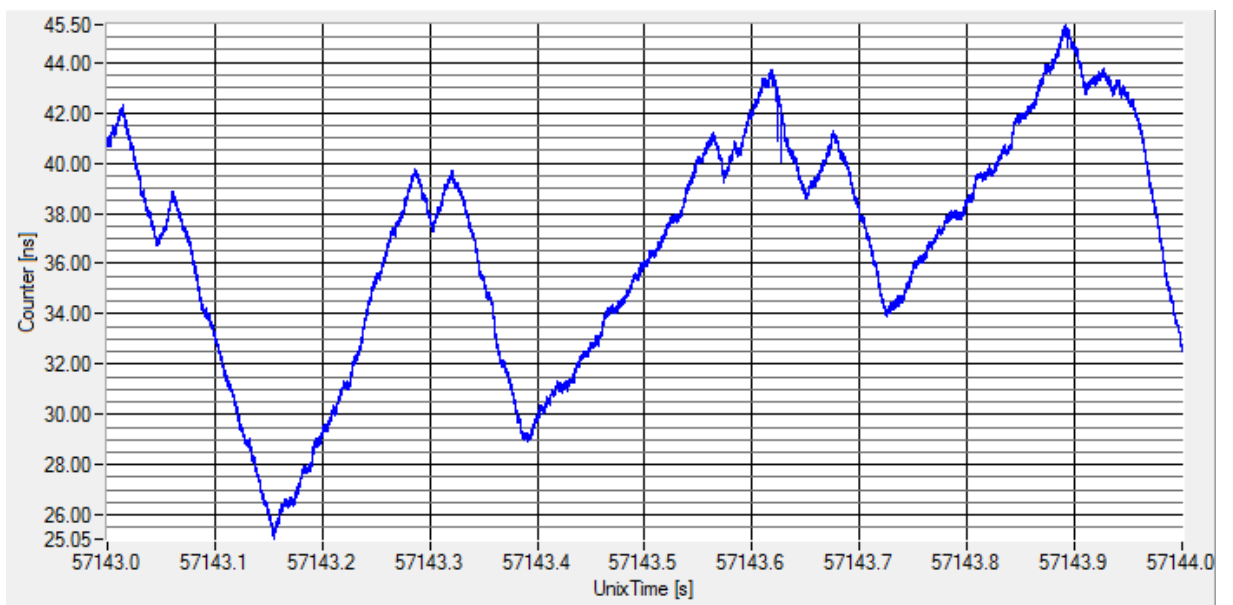
Obrázek 7.4: Graf časové odchylky signálu PPS z přijímače u-Blox od UTC (FEL), MJD 56946

Ten samý průběh zprůměrovaný centrovaným klouzavým průměrem přes 10 minut. Vypočítaná směrodatná odchylka je 3,35 ns a střední hodnota je 984,23 ns.



Obrázek 7.4: Graf klouzavého průměru přes 10 minut odchylky u-Blox od UTC (FEL) ze dne 16. 10. 2014

Na dalším grafu je zobrazena hodnota čítače, jestliže na něj přivedeme jako start puls cesiové hodiny a jako stop puls rubidiové.



Obrázek 7.5: Graf odchylky cesiové vůči rubidiové časové stupnici ze dne 1. 5. 2015

## 8 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo realizovat programové vybavení s grafickým uživatelským prostředím pro zpracování měřených dat v laboratoři přesného času FEL ČVUT. Toto programové vybavení jsem zrealizoval a odzkoušel na souborech naměřených dat v období od října 2014 až po aktuální datum (květen 2015). V tomto období nastala výrazná změna, když byly v laboratoři ke konci dubna uvedeny do provozu cesiové hodiny, ze kterých je v současnosti odvozena časová stupnice FEL. Tento přechod z „rubidia“ na „cesium“ lze vidět ve výsledcích měření zpracovaných tímto programem.

Rubidiový etalon zůstává i nadále v provozu, je tedy možné porovnávat časové stupnice generované na výstupech obou etalonů. (odchylka pro jeden konkrétní den je zobrazena na grafu 7.5).

Program zabývající se metodou common view umí zpracovávat jak CGGTTS data, kde porovnává kanály L1C, tak i L3P data. Rozdíly odchylek těchto dat si lze opět prohlédnout ve zpracovaných výsledcích. Korekce ionosféry je v těchto grafech vypnuta, protože na vzdálenosti menší než 500 km nemá moc význam, ale je tu možnost ji zapnout.

Jelikož se vyskytly problémy s generováním RAW dat na přístroji GTR-51 umístěném v laboratoři přesného času FEL, bude zpracování dat ve formátu RAW, po dohodě s vedoucím práce, do programu implementováno v navazující práci.

## 9 Literatura

- [1] M.A. Lombardi, L.M. Nelson, A.N. Novick and V.S. Zhang. Time and Frequency Measurements Using the Global Positioning System. The International Journal of Metrology, 2001.
- [2] GPS and Precision Timing Applications. Hewlett-Packard, App. Note 1272. Hewlett-Packard Company, 2006.
- [3] J.Levine. Introduction to Time and Frequency Metrology. Review of Scientific Instruments, vol. 70, no. 6, pp. 2567 – 2596, 1999.
- [4] D.W. Allan, C. Thomas. Technical Directives for Standardization of GPS Time Receiver Software. Metrologia, 1994.
- [5] GTR51 – Time and frequency transfer GNSS receiver. DICOM.
- [6] NEO-6T / LEA-6T, u-blox 6 timing GPS modules, ublox.
- [7] W. Gurtner. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2. Astronomical Institute University of Berne, 1998.
- [8] H.M. Peng, C.S. Liao. GPS SMOOTHED P3 CODE FOR TIME TRANSFER. National Standard Time and Frequency Lab.