



České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

PŘESNÝ ČAS A SYNCHRONIZACE PROCESŮ V PRŮMYSLOVÝCH DISTRIBUOVANÝCH SYSTÉMECH

Disertační práce

Vojtěch Vigner

Praha, srpen 2017

Doktorský studijní program: Elektronika a informatika (P 2612)

Studijní obor: Měřicí technika (2601V006)

Školitel: doc. Ing. Jaroslav Roztočil, CSc.

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mě v mé práci podporovali a věnovali mi čas při konzultacích. Především děkuji svému školiteli doc. Ing. J. Roztočilovi, CSc. za podporu a cenné rady, doc. Ing. J. Fischerovi, CSc. za odborné konzultace a Ing. J. Breuerovi Ph.D. za rozsáhlé rozpravy nad tématikou, které mně pomohly se lépe zorientovat. Dále bych chtěl poděkovat spolupracovníkům z Katedry měření za podporu formou rad, jmenovitě pak prof. Ing. V. Haaszovi, CSc. za podporu a trpělivost při konzultacích této práce. Neméně chci poděkovat svým blízkým a své rodině za poskytnutí zázemí a času věnovat se vědecké činnosti.

Vojtěch Vigner

Čestné prohlášení

Jméno a příjmení doktoranda: **Vojtěch Vigner**

Prohlašuji, že jsem svou disertační práci vypracoval samostatně a v předložené práci důsledně citoval použitou literaturu.

Specifikace autorského podílu:

Podíl na všech popisovaných experimentálních zařízeních je 50 %. Ostatní části předložené disertační práce a prezentovaných výsledků vznikly bez autorské spoluúčasti jiných osob.

Praha dne

.....

podpis

Abstrakt

Cílem této práce je zlepšení přesnosti synchronizace v distribuovaných průmyslových systémech s využitím levných GNSS přijímačů. Tyto přijímače mají nižší krátkodobou stabilitu a horší přesnost generování časové stupnice oproti specializovaným high-end zařízením. Práce se zabývá synchronizací zejména v rozsáhlých distribuovaných systémech, kde je finančně náročné nebo nemožné využít synchronizace pomocí metalických či optických spojů.

V rámci této práce byla navržena a realizována metoda pro distribuci a přesné měření času a časových intervalů pomocí GPS. Tato metoda staví na použití levného GPS přijímače LEA-6T od firmy uBlox. Výsledky měření získaných pomocí této metody byly použity pro návrh specializovaného zařízení umožňujícího distribuci časové stupnice GPS, resp. UTC. Toto zařízení dále umožňuje záznam událostí v podobě časových značek synchronních se stupnicí GPS. Součástí zařízení je i software pro jeho konfiguraci a sběr dat. Zařízení bylo dlouhodobě testováno a v rámci ověření přesnosti bylo provedeno porovnání s komerčním metrologickým GNSS přijímačem, a to v několika laboratořích času a frekvence v ČR.

Dále bylo provedeno ověření metody měřením s využitím přenosu času pomocí optických vláken. Zde bylo pro měření použito výše popsaných zařízení založených na přijímači LEA-6T a paralelně bylo prováděno srovnávací měření pomocí metrologických GNSS přijímačů GTR 50 a GTR 51 metodou Common View. Tato metoda se často využívá pro stanovení odchylky lokálních časových stupnic. Byly vytvořeny nástroje pro automatizovaný sběr dat potřebné pro vyhodnocení odchylky touto metodou. Tyto nástroje umožňují automatizovanou centralizaci měřených dat.

Přijímač LEA-6T byl spolu s rubidiovým časovým normálem FS725 využit pro generování časové stupnice synchronizované na stupnici GPS. Tato stupnice byla porovnána se stupnicí UTC(TP). Toto měření ukázalo, že takto konstruovanou časovou stupnicí je možné použít pro průmyslové systémy. Díky kombinaci dlouhodobě stabilního GPS přijímače a krátkodobě stabilního rubidiového normálu je výsledný systém přesný a je schopen překlenout krátkodobé výpadky GPS signálu.

Byly navrženy a implementovány metody pro měření stability interních časových základů měřicích přístrojů, zejména pak digitalizátorů. Tyto metody umožňují měření parametrů časové základny přístroje bez nutnosti externího hodinového výstupu. Metody byly otestovány na digitalizátorech LXI, PXI a osciloskopu LeCroy.

Pro potřeby zpracování dat z metrologických GNSS přijímačů používaných pro ověření funkčnosti navrženého zařízení byly navrženy a implementovány metody zpracování dat a byl proveden odhad nejistoty měření s těmito přijímači.

Klíčová slova: přesný čas, synchronizace, časová stupnice, GNSS, GPS, PPS, metoda Common View, transfer času.

Abstract

This work aims to improve the precision of synchronization in distributed industrial systems using low-cost GNSS receivers. Such receivers have worse short-term stability and accuracy of their time scale in comparison to high-end devices. This work deals primarily with synchronization in large distributed systems, where synchronization using metallic or optical cable connections is not available or too expensive.

A method for distribution and precise measurement of time and time intervals using GPS was developed. The implementation of this approach presented in this thesis utilizes the low-cost GPS receiver LEA-6T from uBlox. Results of the measurements using this method were used to develop the specialized device for distribution of the GPS time scale. This device can timestamp external events. The device is equipped with a custom software for configuration and data acquisition. The device has undergone long-term evaluation to determine its accuracy, during which it was compared with a high-end commercial metrological GNSS receiver. This test has been done in several laboratories of time and frequency in the Czech Republic.

Next, the method was compared to time transfer method via an optical fiber network. The described device based on the LEA-6T receiver was used for a comparison of several timescales. A comparison by the Common View method using metrological GNSS receivers GTR 50 or GTR 51 has been done in parallel. The Common View method is routinely used for comparison of two local time scales. The tools for an automated data acquisition were designed. These tools allow having measured data automatically centralized.

GPS receiver LEA-6T was used in combination with a rubidium time and frequency standard FS725 to generate a time scale synchronized with the GPS time scale. The generated time scale was compared to UTC(TP). This comparison has shown that combination of GPS receiver LEA-6T and rubidium frequency standard FS725 could produce time scale precise enough to be used in industrial systems. This precision is achievable thanks to the combination of excellent long-time stability of the GPS receiver and good short-time stability of the rubidium frequency standard which can overcome short time distortion of the GPS signal.

Methods were designed and implemented to measure the stability of internal time scales of measurement devices, namely digitizers. These methods allow measuring internal time scale without external clock output. The methods were tested on digitizer LXI, PXI, and on LeCroy oscilloscope.

The new methods were designed and implemented to process data from metrological GNSS receivers which were used to validate the accuracy of the tested device. Also, the uncertainty of this measurement was evaluated.

Keywords: precise time, synchronization, time scale, GNSS, GPS, PPS, Common View method, time transfer.

Obsah

1. Úvod	1
2. Současný stav problematiky	3
2.1. Oscilátor, základní prvek časové základny	4
2.2. Metriky pro stanovení časové a frekvenční stability	5
2.3. Vliv teploty na stabilitu oscilátorů	8
2.4. Typy používaných oscilátorů pro přesné měření	9
2.5. Časová stupnice	10
2.6. Základní princip synchronizace	13
2.7. Synchronizace pomocí radiového signálu	14
2.8. Specializované GNSS přijímače pro přenos času a frekvence	17
2.9. Shrnutí	21
3. Stanovení cílů práce	22
4. Řízení časové stupnice zařízení bez vlivu na jeho periferie	23
4.1. Realizace softwarově řízené stupnice	23
4.2. Hardwarové řízení stupnice	25
4.3. Zhodnocení výsledků	29
5. Využití levných GNSS přijímačů pro synchronizaci	30
5.1. Srovnání dostupných GPS modulů	30
5.2. Synchronizace rubidiového normálu pomocí GPS	33
5.3. Použití korekční hodnoty generovaného PPS signálu	38
5.4. Využití interního čítače LEA-6T	41
5.5. Zařízení pro přenos času a synchronizaci	42
5.6. Porovnání dvou GPS přijímačů	44
5.7. Dlouhodobé srovnání s high-end GNSS přijímačem	45
5.8. Ověření přenosu času po optickém vlákně	50
5.9. Zhodnocení výsledků	54
6. Měření parametrů časových základen měřicích přístrojů	56
6.1. Metody detekce průchodů nulou	57
6.2. Algoritmy pro stanovení frekvence časových základen digitalizátorů	58

6.3. Měřicí systém.....	59
6.4. Zhodnocení výsledků.....	60
7. Metody zpracování měřených dat a kalibrace.....	62
7.1. Sběr dat z GPS přijímačů uBlox.....	62
7.2. Sběr a zpracování dat pro použití metody Common View	64
7.3. Zrychlení výpočtu MTIE.....	71
7.4. Zhodnocení výsledků.....	72
8. Závěr	73
8.1. Porovnání výsledků práce se stanovenými cíli	73
8.2. Originální výsledky dosažené v této práci	74
8.3. Doporučení pro další rozvoj a realizace v praxi.....	75
9. Literatura	76
10. Seznam vlastních publikací	80
10.1. Publikace vztahující se k tématu této práce.....	80
10.2. Ostatní.....	83
11. Seznam symbolů a zkratk.....	85
12. Přílohy	87
12.1. GPS Parser	87
12.2. Modul hlavních hodin s GPS přijímačem pro distribuované systémy synchronizované pomocí protokolu IEEE 1588.....	90
12.3. ISPCS 2012 a Plugfest.....	93
12.4. Software pro měření a kalibraci časových stupnic	97
12.5. Sleepy Cat IDE	100
12.6. Sleepy Cat KIT	101

1. Úvod

Čas je definován mnoha způsoby. Z pohledu vědců a techniků je čas jednou z nedůležitějších fyzikálních veličin. Jednotka času je sekunda, která patří mezi základní jednotky SI. Měření času chápeme buď jako určení doby trvání časového intervalu, nebo jako identifikaci okamžiku události vůči definované časové stupnici generované příslušným fyzickým zařízením, hodinami (časovou základnou). Výčet základních časových stupnic je popsán v kapitole 2.5. Aby bylo možné využívat globální časovou stupnici např. UTC v rámci jednoho systému, je zapotřebí mít k dispozici metody umožňující její porovnání s časovou stupnicí konkrétního zařízení. Klíčovými metodami jsou synchronizace a transfer času.

Přesný čas je důležitou veličinou v průmyslových systémech. Průmyslové distribuované systémy se využívají k řízení a měření procesů. Provádějí vícekanálová měření a záznam signálů, které reprezentují elektrické a neelektrické veličiny. V těchto systémech je důležitá synchronizace časových okamžiků sběru dat (např. při monitorování chování soustavy reagující na podnět nebo chybový stav) nebo časových okamžiků jednotlivých akčních zásahů. Vzhledem ke vzdálenosti jednotlivých prvků v distribuovaném systému je toto složité realizovat řídicími impulsy distribuovanými z jedné centrály. Spoléhá se proto na lokální časové základny jednotlivých prvků nebo subsystémů. Každá z lokálních časových stupnic má však odlišnou interpretaci lišící se v závislosti na kvalitě použitého oscilátoru a přesnosti synchronizace. Toto pak vede k nepřesnosti odběru vzorků a nesynchronnosti akčních zásahů. Typickou aplikací, kde je zapotřebí udržovat přesný čas je například řízení elektrické rozvodné sítě [1].

Jednou z možností synchronizace v distribuovaných systémech je využití speciálních synchronizačních sběrnic, kterými bude distribuován přesný synchronizační signál např. Pulse Per Second (PPS) nebo 10MHz sinusový signál.

V síti Internet je pro účely synchronizace nejrozšířenější Network Time Protocol (NTP). S NTP protokolem je možné v lokální síti dosáhnout synchronizační chyby menší než 100 μ s. Pro průmyslové aplikace je vhodnější protokol IEEE 1588 známý jako Precise Time Protocol (PTP). Pomocí tohoto protokolu je možné dosáhnout synchronizační chyby menší než 1 μ s a zároveň automaticky kompenzovat délku přenosové cesty. Toto řešení ale není vhodné pro rozlehlé průmyslové distribuované systémy, kde není možné zajistit spojení pomocí takovéto sběrnice. V případě synchronizace s využitím stávající počítačové sítě, kdy je síť sdílena více zařízeními, dochází k degradaci kvality synchronizace, která se projevuje značným nárůstem chyby synchronizace.

Tato práce se zabývá přenosem času právě v takových průmyslových distribuovaných systémech. Tedy zejména v těch, kde není možné nebo je příliš nákladné provádět synchronizaci pomocí metalických či optických spojů. Jedná se především o rozsáhlé systémy (ve smyslu rozlohy) nebo systémy s více centralizovanými uzly, které jsou od sebe vzdáleny.

V takovýchto systémech se pro synchronizaci často využívají sítě satelitů GNSS (Global Navigation Satellite System). Díky vlastnostem a rozšíření GNSS je možné synchronizovat jednotlivá zařízení po celém světě.

Nejrozšířenějším a v současné době nejdostupnějším GNSS je Global Positioning System (GPS). Mezi jeho výhody patří zejména výborná dostupnost po celém světě, praxí ověřená funkčnost a velký výběr GPS přijímačů. Navíc díky celosvětovému rozšíření existují specializované GPS přijímače určené právě pro přenos přesného času a synchronizaci.

V případě synchronizace pomocí radiového systému jsme vázáni dostupností tohoto signálu. Díky tomu, že GPS je celosvětový satelitní systém je dostupnost signálu dostatečná. V případě, že není signál dostupný (např. pod zemí, v budovách, pod vodou) je možné využít připojení antény s integrovaným zesilovačem. Tuto anténu je pak možné umístit na střechu budovy nebo na jiné vyvýšené místo.

GPS přijímače standardně poskytují výstup PPS a některé i hodinový signál 10 MHz. Díky těmto signálům je možné jednoduše synchronizovat ostatní zařízení v distribuovaném systému.

Většina prací o přesné časové synchronizaci distribuovaných systémů je založena na použití průmyslových sběrnic nebo počítačových sítí, s využitím časových protokolů (např. PTP), případně využití finančně nákladných přijímačů. To vede ke zvýšení nákladů realizace. Tato práce se zabývá využitím levných GNSS přijímačů. Použití těchto přijímačů umožňuje přímo synchronizovat jednotlivé subsystemy nebo prvky v systému za zlomkovou cenu.

2. Současný stav problematiky

Synchronizace je v principu minimalizace fáze dvou a více nezávislých časových stupnic. V reálném prostředí je vždy maximální dosažitelná synchronnost omezena stabilitou synchronizovaných zařízení a synchronizačními metodami. Pro každou aplikaci je také specifikována potřebná přesnost synchronizace. V rámci této práce pojem přesnost synchronizace odpovídá metrice MTIE (viz kapitola 2.2). To je jeden z nejdůležitějších parametrů při návrhu systému.

Dále je potřeba se zamyslet nad tím, jakým způsobem se bude samotná synchronizace provádět. Jako přenosové médium lze použít metalický spoj, optický spoj anebo radiový signál. Pro lokální distribuovaný systém je možné využít přímého propojení jednotlivých zařízení. V tomto případě je možné rozvést potřebné signály do všech zařízení.

Existují také komunikační sběrnice přímo podporující synchronizaci jednotlivých zařízení. Jedná se například o Wired Trigger Bus u LXI systémů nebo SyncE.

Samotnou synchronizaci lze rozdělit podle směru přenosu synchronizačního signálu na jednosměrnou a obousměrnou. Při jednosměrné synchronizaci se odesílá časová informace z jednoho zařízení (master) do ostatních (slave). V tomto případě je nutné znát zpoždění přenosové cesty. Existuje i možnost měření tohoto zpoždění, například u optického přenosu nebo vícekanálového GPS, kdy je možné využít šíření dvou signálů o různých vlnových délkách.

Při obousměrné synchronizaci je možné zpoždění přenosové trasy změřit, čehož využívá například IEEE1588. Ovšem pouze za předpokladu, že je stejné v obou směrech.

Speciálním případem je takzvaná syntonizace, kdy není zapotřebí eliminovat fázové rozdíly jednotlivých časových stupnic ale pouze frekvenční odchylku. S tímto požadavkem je možné se setkat v telekomunikačních aplikacích, kde se používá syntonní frekvence pro generování nosné frekvence vysílaného signálu. V takovýchto aplikacích je informace o fázovém rozdílu časových stupnic nepotřebná.

2.1. Oscilátor, základní prvek časové základny

Pro plné porozumění termínu synchronizace je nejprve nutné definovat časovou stupnici. Základním prvkem časové základny je oscilátor.

Jak uvádí [2] oscilátory mohou být charakterizovány pouze porovnáním s referenčními oscilátory. Pokud je nejistota referenčního oscilátoru zanedbatelná v porovnání se stabilitou testovaného oscilátoru, pak výsledná chyba časové stupnice odvozené od testovaného oscilátoru může být popsána rovnicí

$$x(t) = x_0 + y_0 t + \frac{D}{2} t^2 + \frac{\varphi(t)}{2\pi f_{nom}} \quad (2.1)$$

Kde:

- $x(t)$ je odchylka časové stupnice oproti stupnici reprezentované referenčním oscilátorem v čase t ,
- x_0 je odchylka časová stupnice oproti stupnici reprezentované referenčním oscilátorem v čase 0 ,
- y_0 reprezentuje frekvenční odchylku měřeného oscilátoru oproti referenčnímu oscilátoru,
- D představuje lineární frekvenční drift měřeného oscilátoru,
- φ_t reprezentuje náhodný fázový šum měřeného oscilátoru,
- f_{nom} je nominální frekvence referenčního oscilátoru.

Lineární frekvenční drift D je dán jak oscilátorem samotným (zejména stárnutím), tak i prostředím ve kterém je tento oscilátor provozován. Základní parametry prostředí ovlivňující lineární frekvenční drift oscilátoru jsou:

- teplota,
- atmosférický tlak,
- napájecí napětí,
- vibrace.

2.2. Metriky pro stanovení časové a frekvenční stability

Při popisu parametrů oscilátoru např. v datovém listě, je zvykem uvádět zvlášť stárnutí a citlivost na změnu parametrů prostředí [3]. Náhodný fázový šum φ_t je uváděn u přesných oscilátorů, kde je vliv prostředí (zejména teploty) potlačen, jak popisuje kapitola 2.3. Pro popis náhodného fázového šumu jsou v závislosti na aplikaci používány tyto metriky [4]:

- Allanova odchylka,
- Modifikovaná Allanova odchylka,
- Time Deviation,
- Time Interval Error,
- TIE_{rms} ,
- Maximum Time Interval Error.

Allanova odchylka, Modifikovaná Allanova odchylka a Time Deviation jsou metriky nejčastěji používané pro popis oscilátorů ve stabilních časových základnách využívaných pro měřicí aplikace a metrologii času. Tyto metriky jsou užitečné právě v aplikacích, kde je kladen důraz na frekvenční stabilitu. Time Interval Error, TIE_{rms} a Maximum Time Interval Error se využívají pro charakterizaci oscilátorů a časových základen v průmyslových telekomunikačních systémech.

Níže uvedený popis jednotlivých metrik vychází ze standardů NIST (National Institute of Standards and Technology) [5], IEEE [6] a ITU (International Telecommunication Union) [7].

2.2.1. Allanova odchylka

Allanova odchylka se používá zejména pro statistický popis systémů založených na přesných krystalových oscilátorech a atomových hodinách. Její schopností je identifikovat a odhadnout typický fázový šum měřené časové stupnice. Její použití je doporučováno mezinárodními standardy [1].

Allanova odchylka, ADEV je definována jako:

$$ADEV(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2\tau^2} \langle [x(t+2\tau) - 2x(t+\tau) + x(t)]^2 \rangle} \quad (2.2)$$

kde symbol $\langle \dots \rangle$ značí průměr přes nekonečno, τ je doba pozorování a x jsou jednotlivá fázová data. Pro konečný počet měření N lze vytvořit odhad:

$$ADEV(n\tau_0) \cong \sqrt{\frac{1}{2n^2\tau_0^2(N-2n)} \sum_{i=1}^{N-2n} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i)^2} \quad (2.3)$$

kde τ_0 je měřicí interval a n je voleno z rozmezí $\langle 1, \frac{N-1}{2} \rangle$.

Allanova odchylka na rozdíl od standardní statistické směrodatné odchylky konverguje a je díky ní možné poznat různé druhy šumu. Podrobnější popis těchto šumů a jejich vlivu na výpočet odhadu Allanovy odchylky je popsán v [8], [9] a [10].

Odhad Allanovy odchylky lze také spočítat s překrýváním intervalů a tím získat více hodnot pro jednotlivá n , toto je výhodné zejména pro velké n . Tato varianta se pak nazývá Allanova odchylka s překrýváním intervalů, ODEV.

2.2.2. Modifikovaná Allanova odchylka

Modifikovaná Allanova odchylka, MDEV je definována jako:

$$MDEV(n\tau_0) = \sqrt{\frac{1}{2(n\tau_0)^2} \left\langle \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2 \right\rangle} \quad (2.4)$$

kde symbol $\langle \dots \rangle$ značí průměr přes nekonečno, τ_0 je doba pozorování a x jsou jednotlivá fázová data.

Pro konečný počet měření N lze vytvořit odhad:

$$MDEV(n\tau_0) \cong \sqrt{\frac{1}{2n^4\tau_0^2(N-3n+1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[\sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2} \quad (2.5)$$

kde τ_0 je měřicí interval a n je voleno z rozmezí $\langle 1, \frac{N}{3} \rangle$.

2.2.3. Time deviation

Time deviation, TDEV je definována jako:

$$TDEV(n\tau_0) = \sqrt{\frac{1}{6n^2} \left\langle \left[\sum_{i=1}^n (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2 \right\rangle} = \frac{n\tau_0}{\sqrt{3}} MDEV(n\tau_0) \quad (2.6)$$

Kde symbol $\langle \dots \rangle$ značí průměr přes nekonečno, τ_0 je doba pozorování a x jsou jednotlivá fázová data.

Pro konečný počet měření N lze vytvořit odhad:

$$TDEV(n\tau_0) \cong \sqrt{\frac{1}{6n^2(N-3n+1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[\sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2} \quad (2.7)$$

kde τ_0 je měřicí interval a n je voleno z rozmezí $\langle 1, \frac{N}{3} \rangle$.

2.2.4. Time Interval Error

Time Interval Error, TIE je definován jako:

$$TIE(t, \tau) = [x(t + \tau) - x(t)] \quad (2.8)$$

2.2.5. TIE RMS

TIE_{rms} je definován jako:

$$TIE_{rms}(t) = \sqrt{\langle [x(t + \tau) - x(t)]^2 \rangle} \quad (2.9)$$

kde symbol $\langle \dots \rangle$ značí průměr přes nekonečno, τ_0 je doba pozorování a x jsou jednotlivá fázová data.

Pro nulový frekvenční ofset je TIE_{rms} aproximací standardní odchylky s jednotlivými frekvenčními fluktuacemi přenásobenými počtem průměrů. Z toho vyplývá, že tato metrika má podobné vlastnosti jako TDEV ačkoli každá z nich lépe identifikuje jiný typ šumů.

2.2.6. Maximum time interval error

Maximum time interval error je metrika, která udává maximální chybu časové stupnice pro příslušný časový interval τ [11]. Je počítána pomocí pohybujícího se okna s n vzorky, kde $n = \tau / \tau_0$. Toto okno se pohybuje přes množinu odměrů a hledá se rozdíl mezi maximem a minimem v tomto okně. Tento postup se opakuje pro všechna okna. Z jednotlivých lokálních maxim je poté vybráno celkové maximum pro danou velikost okna.

Maximum time interval error, MTIE je definován jako:

$$MTIE(n\tau_0) = \max_{0 \leq t_0 \leq T - \tau} \left(\max_{t_0 \leq t \leq t_0 + \tau} [x(t)] - \min_{t_0 \leq t \leq t_0 + \tau} [x(t)] \right) \quad (2.10)$$

kde $n = 1, 2, \dots, N - 1$ a N je počet odměrů.

MTIE je velmi často používán v telekomunikačních aplikacích, protože popisuje nejhorší případ nestability, například chvilkový jitter. Tato informace může být skrytá v Allanově varianci a jejích variantách v důsledku průměrování vzorků [12].

2.3. Vliv teploty na stabilitu oscilátorů

Frekvenční závislost piezoelektrického rezonátoru (krystalu) na teplotě se odvíjí od typu použitého řezu (AT nebo SC). Většinou je volena tak aby měla charakter paraboly se středem v okolí 25 °C, což je považováno za běžnou provozní teplotu [13]. Frekvence se tedy sníží při poklesu či zvýšení provozní teploty.

Vztah mezi nominální f_0 a výslednou f frekvencí popisuje následující rovnice:

$$f = f_0 [1 - K_{ST} \cdot (T - T_0)^2] \quad (2.11)$$

kde:

- T je provozní teplota,
- T_0 je teplota pro kterou je udávána nominální frekvence, většinou tedy 25 °C a
- K_{ST} je koeficient teplotní závislosti udávaný v ppm/K.

Pro příklad můžeme vzít standardní oscilátor s frekvencí 10 MHz a K_{ST} rovno 0,04 ppm/K. V tomto případě se časová stupnice založená na tomto oscilátoru odchýlí o 2 minuty za rok, pokud bude pracovat v teplotě o 10 °C vyšší nebo nižší, než je nominální. A o 8 minut za rok, pokud bude pracovní teplota vyšší nebo nižší o 20 °C.

2.3.1. Termostatovaný krystalový oscilátor (OCXO)

Termostatovaný krystalový oscilátor se využívá tam, kde by teplotní stabilita standardního krystalového oscilátoru nebyla dostačující. Jak název napovídá je tento oscilátor vybaven miniaturní píčkou s termostatem. V praxi je toto realizováno pomocí bloku kovu (hliník, měď), zdroje tepla (rezistor či tranzistor v lineárním režimu) a snímače teploty. Ve speciálních případech je možné se setkat s oscilátorem s dvojitým termostatem.

Pro tento typ aplikací se používají speciální krystaly s vyšší nominální pracovní teplotou, odpovídající teplotě vyhřátého termostatu. Takovéto krystaly pak mají mnohem větší spotřebu, větší rozměry a jsou drahé. Po zapnutí takového oscilátoru je nutné počkat výrobcem udaný čas, než dojde k ustálení teploty v termostatu. Nicméně dosahují stability frekvence v rozsahu od 10 ppm do 1 ppb, a to ve velkém teplotním rozsahu okolí, například od 0 do 50 °C.

2.3.2. Teplotně kompenzovaný krystalový oscilátor (TCXO)

Tento oscilátor je nezbytný pro použití v aplikacích, kde je vyžadována vyšší teplotní stabilita než u obyčejného krystalového oscilátoru. Jeho teplotní stabilita je 10 až 40krát vyšší než stabilita klasického oscilátoru bez zvýšení spotřeby a rozměrů jako je tomu například u OCXO. TCXO tím nabízí střední cestu ve smyslu rozměrů, spotřeby, ceny ale i stability mezi obyčejným krystalovým oscilátorem a OCXO. Teplotní stabilita TCXO se pohybuje od 5 ppm do 50 ppb. Oscilátor je standardně používán jako volně běžící bez jakékoli externí korekce podle teploty okolí. Tato korekce je už zabudovaná v interní konstrukci oscilátoru.

2.4. Typy používaných oscilátorů pro přesné měření

Základní typy přesných oscilátorů můžeme definovat podle dvou faktorů [14]. Tím prvním je činitel jakosti Q definovaný rovnicí (2.12) a druhým přesnost tak jak je definována v metrikách standardů NIST (National Institute of Standards and Technology) [5], IEEE [6].

$$Q \equiv \frac{f_r}{\Delta f} \quad (2.12)$$

Kde f_r je rezonanční frekvence oscilátoru a Δf je šířka pásma (pokles o 3 dB na obě strany od rezonanční frekvence).

Následující tabulka ukazuje srovnání přesných oscilátorů.

Typ	Q	Krátkodobá stabilita	Přesnost
Krystalový oscilátor	$10^5 - 10^6$	$1 \cdot 10^{-5}$	Nutná kalibrace
Rubidiové hodiny	10^6	$1 \cdot 10^{-11}$	Nutná kalibrace
Cesiové hodiny	$10^7 - 10^8$	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-13} - 5 \cdot 10^{-12}$
Vodíkový MASER [15]	10^9	$5 \cdot 10^{-15}$	$1 \cdot 10^{-12} - 5 \cdot 10^{-12}$
Optické hodiny [16]	$\approx 10^{15}$	$1,5 \cdot 10^{-16}$	$< 1 \cdot 10^{-17}$

Tabulka 2.1: Srovnání typů přesných oscilátorů

2.4.1. Speciální typy oscilátorů

Napětím řízený krystalový oscilátor (VCXO)

VCXO je krystalový oscilátor, který obsahuje varikap (polovodičová dioda s parazitní kapacitou, která je závislá na velikosti přiloženého napětí) a další příslušné obvody, čímž umožňuje plynule regulovat frekvenci oscilátoru přivedeným řídicím napětím. Tento princip ovládání může být spojen s dalším typem konstrukce jako je TCXO nebo OCXO.

MEMS oscilátory

MEMS oscilátory jsou oproti krystalovým oscilátorům jednodušeji vyrobitelné a jejich rozměry i cena jsou podstatně nižší. Nicméně tyto oscilátory mají mnohem větší teplotní závislost, proto se vyrábějí minimálně jako teplotně kompenzované. Tato kompenzace je složitější než u krystalových oscilátorů a bývá prováděna pomocí teplotního senzoru a mikrokontroléru umístěných v obvodu oscilátoru. V tomto provedení může MEMS oscilátor dosahovat stability od 50 ppm do 100 ppb.

BVA oscilátory

BVA oscilátory jsou nejvíce používané jako lokální oscilátory v atomových hodinách. Jejich hlavním výhodou oproti výše uvedeným oscilátorům je nižší úroveň fázového šumu. Jedná se o krystalové oscilátory s vylepšenou konstrukcí. Díky tomu mají také lepší teplotní stabilitu, odolnost proti vibracím a ionizujícímu záření.

2.5. Časová stupnice

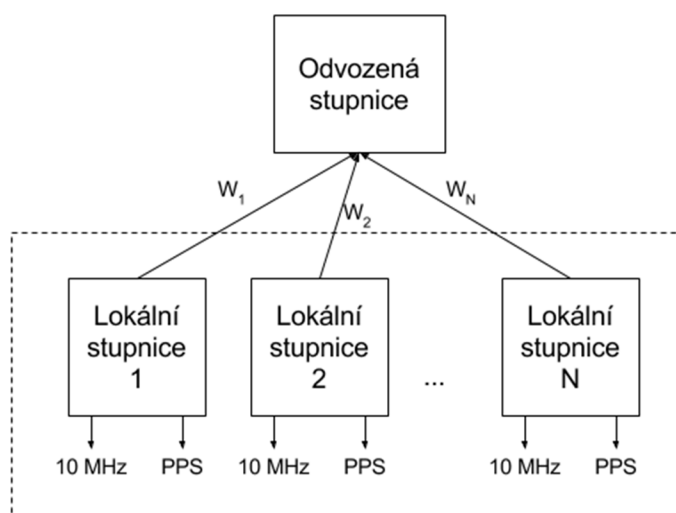
Nejdříve je třeba definovat dva pojmy [17] a to:

Lokální časová stupnice

Jedná se o stupnici odvozenou od konkrétního zdroje časového signálu (oscilátoru). V některých případech je možné tuto stupnici měřit přímo pomocí výstupních signálů generovaných zařízením. Standardně se jako výstup používá obdélníkový signál s úrovní TTL logiky nebo sinusový signál, oba o frekvenci 10 MHz nebo 5 MHz a TTL výstup o frekvenci 1 Hz. Signály o frekvenci 10 MHz a 5 MHz jsou standardní frekvence které se používají pro měření nebo pro distribuci. Výstup o frekvenci 1 Hz se nazývá PPS (Pulse Per Second) a jeho vzestupná hrana reprezentuje začátek sekundy lokální časové stupnice.

Odvozená časová stupnice

Je to taková stupnice, která jako celek nemusí mít fyzickou reprezentaci a odvozena od skupinového etalonu času a frekvence. Díky tomuto uspořádání je možné dosáhnout vysoké stability. Obrázek 2.1 popisuje toto uspořádání. Jednotlivé etalony jsou pak označovány jako lokální časové stupnice a přispívají váhou W do celkové stupnice. Tato váha je odvozena od stability dané lokální stupnice.



Obrázek 2.1 Příklad konstrukce odvozené časové stupnice

Pokud není možné provést měření jednotlivých odchylek lokálních stupnic v reálném čase, jak tomu je např. u UTC popsané v kapitole 2.5.3, je možné odvozenou stupnici využít pro měření pouze zpětně, což pro průmyslové systémy může představovat problém.

Pro online měření lze využít pouze lokálních stupnic nebo systémů založených na lokálních stupnicích. Nejjednodušším způsobem je měření stability je měření zpoždění PPS signálů dvou stupnic [18], které představuje aktuální ofset těchto stupnic. Vypočtením diference těchto změřených hodnot je možné spočítat rozdíl frekvencí interních stupnic.

Dále následuje přehled běžně používaných časových stupnic.

2.5.1. International Atomic Time (TAI)

TAI je mezinárodně uznávaná odvozená časová stupnice počítaná z váženého průměru více než 400 lokálních stupnic generovaných kvantovými etalony času a frekvence [19]. Tyto lokální stupnice jsou rozmístěny v metrologických laboratořích po celém světě. Nejstabilnější hodiny mají největší váhu při kalkulaci stupnice. Tímto je zajištěna dlouhodobá stabilita stupnice. TAI je spravována Mezinárodním úřadem pro míry a váhy (BIPM) nacházejícím se poblíž Paříže ve Francii.

2.5.2. Universal Time (UT1)

UT1 je rotační čas pro konkrétní místo pozorování, přepočítaný pomocí známé zeměpisné délky tohoto místa na Greenwichský poledník. Zeměpisné souřadnice jsou vztažené ke stanovenému pevnému bodu nazývanému kartografický bod, a to spolu s korekcí osy rotace Země vzhledem k zemskému povrchu, která se v čase mění. Jedná se tedy o speciální případ stupnice založený na astronomickém pozorování pozice Země vůči Slunci. Je zřejmé, že tato stupnice se pro průmyslové systémy nedá využít [20], nicméně je důležitá pro jednu z nejvíce používaných stupnic, a to UTC.

2.5.3. Coordinated Universal Time (UTC)

UTC je základní časový systémem pro celý svět, jednotlivá časová pásma po celém světě jsou definována svými odchylkami od UTC. Místní čas v České republice je dán jako UTC+1:00 a jako UTC+2:00 v období letního času.

Jelikož se rotace Země mírně zpomaluje, UT1 se oproti UTC postupně zpožďuje. Aby se UTC stupnice dala používat v praktickém životě, který je s rotací Země spjatý, je udržována v rozmezí +/-0,9 sekundy od UT1, pokud je tato odchylka překročena, je o půlnoci nejbližšího 30. června nebo 31. prosince přidána nebo (teoreticky) ubrána tzv. přestupná sekunda, takže tento den končí v čase 23.59:60, resp. 23.59:58 (na rozdíl od běžného 23.59:59). K tomuto dochází průměrně jednou za rok až rok a půl. Jelikož se rotace Země zpomaluje, jsou vždy přestupné sekundy přidávány, teoreticky se však počítá i s možností ubrané přestupné sekundy. O tom, zda bude v příslušném termínu přestupná sekunda použita, rozhoduje International Earth Rotation and Reference Systems Service podle měření rotace Země. Jedná se tedy o synchronizaci v rámci dvou stupnic. Začátek UTC sekundy je založen na stupnici TAI, nicméně absolutní čas se liší v závislosti na počtu přestupných sekund. Ke dni 26. 2. 2017 je UTC opožděna oproti TAI o 37 sekund.

Ačkoli je UTC odvozenou časovou stupnicí složenou z lokálních stupnic umístěných po celém světě je možné jí využít pro synchronizaci, a to z důvodu, že jednotlivé lokální stupnice (viz Obrázek 2.1) tvořící UTC mají díky své stabilitě maximální chybu v řádu jednotek

mikrosekund. Toto je akceptovatelné pro většinu zařízení, jako jsou například kancelářské PC, mobilní zařízení ale i většina centralizovaných průmyslových systémů.

Jednotlivé lokální stupnice tvořící UTC jsou z pravidla označovány UTC(xx), kde xx značí zkratku laboratoře, kde je tato stupnice umístěna. Tyto stupnice mohou, ale nemusejí přispívat do celkové reprezentace UTC. Mezi nejdůležitější stupnice pro potřebu této práce patří:

UTC(USNO), je stupnice observatoře USNO (United States Naval Observatory). Tato observatoř se stará o synchronizaci GPS přijímačů, a proto také stupnice GPS Time je odvozena od UTC(USNO).

UTC(TP), UTC Tempus Pragense je lokální stupnice primárního cesiového etalonu České Republiky a je udržován v mikrosekundové shodě s UTC pracovníky časové laboratoře ÚFE AV ČR v Praze.

2.5.4. GPS Time

Všechny GPS satelity vytvářejí skupinový etalon času a frekvence, který je synchronizován na stupnici UTC(USNO). GPS stupnice je oproti TAI opožděna o 19 sekund, a to z historických důvodů. Tento posun byl totiž mezi UTC a TAI 1.1.1970, kdy GPS stupnice vznikla. Jednotlivé satelity systému GPS obsahují přesné cesiové hodiny spolu s relativistickými korekcemi. Rozdíl počátku sekund GPS a TAI není nulový, pohybuje se v řádu jednotek ns. Synchronizaci GPS satelitů provádí laboratoř USNO, ta má na starosti správu celého GPS. Vzhledem k těsné vazbě systémového času GPS na časovou stupnici UTC(USNO) lze systém GPS využít k přímé distribuci času UTC. Pro potřeby jednoduché konverze mezi stupnicemi je mezi zprávami od GPS satelitů i hodnota aktuálního počtu přestupných sekund. Tím je umožněna konverze z GPS na UTC.

2.5.5. UNIX Time

UNIX Time je časová stupnice využívaná v UNIXových systémech jako referenční stupnice. Začátek sekundy této stupnice je opět odvozován od TAI. Samotná hodnota se udává jako počet sekund od 1. 1. 1970 UTC. UNIX Time neobsahuje přestupné sekundy, a proto je od TAI zpožděn vždy o 10 s.

2.5.6. Modified Julien Date (MJD)

MJD se používá pro identifikaci konkrétního dne. Jedná se o počet dní od půlnoci dne 17. 11. 1858. MJD je možné použít i pro označení sekundy a to tak, že se použije v desetinném formátu, například 57754,5 UTC je 1.1.2017 12:00:00 UTC

2.6. Základní princip synchronizace

Synchronizace je minimalizace fáze (časový posun) jedné či více časových stupnic oproti referenční časové stupnici, jak definuje rovnice (2.1). Synchronizace může být provedena buď jednou, například ruční seřazení hodin, nebo opakovaně pro dosažení trvalé synchronnosti časových stupnic. Pro použití v této práci je pojmem synchronizace myšlena právě trvalá synchronizace. Té je možné dosáhnout dvěma způsoby, případně jejich kombinací [21]:

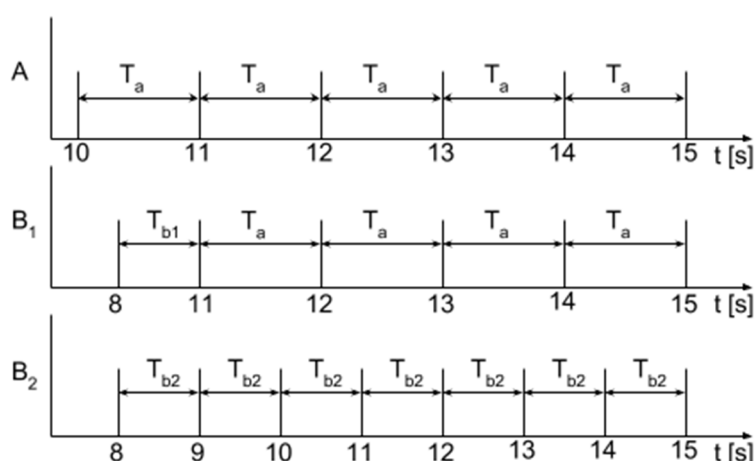
Kontinuální korekce fáze

Umožňuje jednoduše a rychle opravit rozdíl fází časových stupnic. Kompenzace fázového offsetu má ale několik nevýhod. Hodiny stále běží s jinou nominální frekvencí, protože není kompenzován frekvenční offset. Tento způsob synchronizace navíc způsobuje, že fáze není pouze rostoucí a její hodnota se může znovu opakovat.

Kontinuální korekce frekvence

Synchronizaci je možné provést i korekcí frekvenčního offsetu jednotlivých hodin. V tom případě bude výsledná časová osa zařízení vždy rostoucí. Navíc se díky kompenzaci frekvenčního offsetu může prodloužit perioda jednotlivých cyklů synchronizace pro zachování stejné chyby.

Obrázek 2.2 popisuje dva možné postupy synchronizace časových stupnic A, B₁ a B₂. Stupnice A má periodu T_a a je považovaná za referenční. Stupnice B₁ a B₂ mají časový posun který je potřeba vynulovat synchronizací. Jednotlivé úseky zobrazují periodu zařízení, která je reprezentována PPS. V případě stupnice B₁ dochází v prvním kroku ($t_{b1} = 8$ s) k okamžitému vynulování fáze změnou periody interní stupnice na T_{b1} po dobu jedné periody jedná se tedy o skokovou synchronizaci. Pro stupnici B₂ je provedena synchronizace pomocí změny periody interní stupnice na hodnotu T_{b2} , a to až do dosažení nulové fáze. V tomto případě se jedná o postupnou synchronizaci. Při postupné synchronizaci bývá omezena maximální možná změna periody, resp. frekvence, a to z důvodu vnitřní konstrukce zařízení.



Obrázek 2.2: Skoková a postupná synchronizace

Ačkoli se v případě skokové synchronizace dosáhne synchronního stavu mnohem rychleji je tento způsob v některých případech nepraktický. A to z důvodů ztráty posloupnosti časové stupnice. Představme si, že by distribuovaný systém pracoval na základě PPS generovaných stupnicemi B_1 a B_2 . V tom případě B_1 by byl mezi $t_{B1} = 8$ s a $t_{B1} = 12$ s vygenerován pouze jeden, PPS ačkoli by došlo k posunu stupnice o tři sekundy. Na druhou stranu, pokud by byla odchylka stupnic vysoká, například při zapnutí zařízení může být několik dní, pak by dosažení synchronního stavu v případě postupné synchronizace mohlo trvat velmi dlouho.

V praxi se většinou volí kombinace obou metod. Například skokově se srovná datum a čas až na jednotlivé sekundy a postupnou synchronizací se dorovná začátek sekundy. Po tomto zásahu se již provádí postupná synchronizace.

Situace na obrázku je ideální, v reálném prostředí se průběžně mění frekvence obou stupnic, a proto je potřeba synchronizaci provádět opakovaně. Periodu synchronizace je potřeba volit na základě stability obou lokálních stupnic. Snížením synchronizační periody je možné zvýšit přesnost synchronizace. Na druhou stranu v některých případech je tato perioda omezena konstrukcí zařízení. Například pokud máme k dispozici pouze 1 Hz puls, není možné měřit rozdíl fází stupnic častěji než jednou za sekundu.

2.7. Synchronizace pomocí radiového signálu

V distribuovaných systémech je někdy výhodné realizovat synchronizaci bezdrátovou metodou. Toto obzvláště platí pro rozsáhlé systémy, kde by nebylo možné zajistit fyzické propojení jednotlivých zařízení. Zde také odpadá možnost použití obousměrné synchronizace, jak tomu je například při použití bezdrátových sensorových sítí, a to právě z důvodů vzdálenosti jednotlivých bodů. Pro bezdrátovou jednosměrnou synchronizaci je vhodné využít jedné časové stupnice jako reference, pomocí které se ostatní zařízení synchronizují. V případě velkých vzdáleností je nezbytné kompenzovat zpoždění přenosové cesty radiového signálu. Toto zpoždění by se jinak projevilo v ofsetu časových stupnic. Jako možné zdroje synchronizace se nabízí běžně dostupné radiové systémy. Mezi nejznámější patří DCF77, GPS, GLONASS, Galileo a další [22].

2.7.1. DCF77

DCF 77 je německá stanice v Mainfligenu ($50^{\circ} 01''$ severní šířky, $09^{\circ} 00''$ východní délky), která vysílá v oblasti dlouhých vln na kmitočtu 77,5 kHz. Provoz zajišťují společně Spolková pošta, která provozuje vlastní vysílač a antény, a Spolkový fyzikálně-technický ústav PTB Braunschweig, který odpovídá za referenční signál odvozovaný od atomových hodin. Stanice začala vysílat v září roku 1970.

Vysílač má výkon 50 kW s odhadovaným vyzářeným výkonem (ERP) asi 30 kW. Dosah vysílače je dle údajů PTB kolem 2000 km. K vysílání je použita 150 m vysoká vertikální všesměrová paprsková anténa s kapacitním nástavce a dále pak záložní anténa vysoká 200 metrů.

2.7.2. Loran-C

Loran (LONg RANGE Navigation) varianta C je vylepšená varianta pozemního rádiového navigačního systému (oproti Loran-A a B). Tento systém je určený především pro leteckou a námořní navigaci. Umožňuje určit polohu a rychlost dopravního prostředku pomocí přijímání nízkofrekvenčních signálů ze synchronizovaných pozemních vysílačů [23]. Jedná se tak o předchůdce GNSS.

2.7.3. Global Navigation Satellite System

Standardně jsou GNSS (Global Navigation Satellite System) přijímače používány pro určení polohy. Nicméně vzhledem k vysoké přesnosti časové stupnice používané těmito satelitními systémy je možné přijímače využít jako zdroj přesného času. Mezi nejznámější GNSS patří GPS, GLONASS, Galileo a Beidou. Tato práce se primárně zabývá využitím GPS přijímačů.

Global Positioning System (GPS)

Běžné přijímače jsou většinou určeny pro určování polohy, nicméně existují i přijímače, které poskytují funkce pro přenos času. Výrobci těchto přijímačů uvádějí parametry přístrojů jako je dosažitelná přesnost v nestandardizovaných metrikách a opomíjejí definovat vliv prostředí, úroveň signálu a počet satelitů, ze kterých je signál přijímán. Z výše zmíněných důvodů je velmi obtížné zvolit přijímač pouze na základě katalogového listu výrobce.

Následující popis družic systému GPS vychází z článku [24]. Srdce každé takové družice tvoří velmi přesné atomové hodiny. Na palubě jsou troje až čtvery, s cesiovým nebo rubidiovým standardem. Starají se o dlouhodobou frekvenční stabilitu vysílaného signálu, jehož nejistota dosahuje 10^{-13} až 10^{-14} za 1 den. Z těchto hodin je odvozována základní frekvence L pásma $f_0 = 10,23$ MHz. Koherentně odvozeny jsou nosné frekvence signálů L1 a L2, které vznikají vynásobením základní frekvence hodnotami 154 a 120, což dává $L1 = 1\,575,42$ MHz a $L2 = 1\,227,60$ MHz. Nosná vlna je modulována fázovou modulací, tzn., že kdykoliv dojde ke změně vysílaného binárního kódu, posune se zároveň její fáze o jednu polovinu vlnové délky.

Pro modulaci nosné vlny se používá několik pseudonáhodných, tzv. PRN kódů, které jsou pro každou družici unikátní a zajišťují přijímači GPS jednoznačnou identifikaci družice vysílající daný kód.

PRN sekvence kódu jsou generovány pomocí kombinace výstupů z desetibitových posuvných registrů. Každý registr obsahuje deset buněk, z nichž každá představuje jeden bit. S každým pulsem atomových hodin se bity posunou doprava a hodnota bitu umístěného nejvíce vpravo je odečtena jako výstup z registru. Nová hodnota buňky umístěné nejvíce vlevo je určena binárním součtem hodnot dvou vybraných řídicích buněk – hodnoty 0 nabývá v případě, že údaje v obou buňkách jsou stejné, v ostatních případech má hodnotu 1. Použití různých kombinací řídicích buněk je rozhodujícím faktorem pro vytváření jedinečného PRN kódu každé družice.

Základní frekvence	$f_0 = 10,23 \text{ MHz}$
Nosná frekvence L1	$154 f_0 = 1 575,42 \text{ MHz}$
Nosná frekvence L2	$120 f_0 = 1 227,60 \text{ MHz}$
P kód	$f_0 = 10,23 \text{ MHz}$
C/A kód	$f_0 / 10 = 1,023 \text{ MHz}$
W kód	$f_0 / 20 = 511,5 \text{ kHz}$
Navigační zpráva	$f_0 / 204600 = 50 \text{ Hz}$

Tabulka 2.2: Použité frekvence GPS [24]

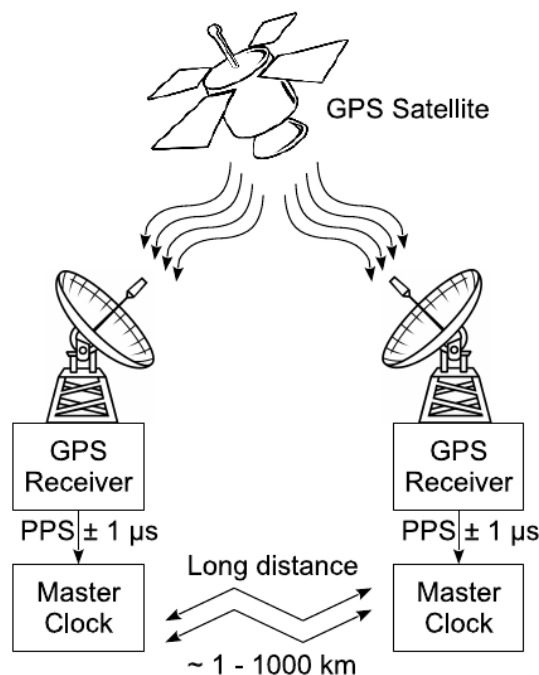
C/A kód vzniká kombinací výstupů ze dvou registrů tak, že výsledná hodnota je rovna jejich binárnímu součtu. Tento kód modulován pouze na nosné vlně L1 (viz tabulka 2.2) a není nikterak šifrován. Horizontální přesnost určení polohy pomocí C/A kódu se pohybuje v řádech jednotek metrů. C/A kód je 1023 bitů dlouhý a je vysílán frekvencí 1,023 MHz, tzn., že je opakován každou tisícinu sekundy.

P kód je modulován na obou nosných vlnách L1, L2. Dvě frekvence používané k měření umožňují odstranění ionosférických a troposférických refrakcí (změna rychlosti šíření rádiových vln při průchodu prostředím), což zajišťuje velmi přesné určení polohy – geodetické přístroje GPS pracují s přesností v řádech milimetrů. Stejně jako C/A není P kód šifrován. Je vytvářen kombinací bitových sekvencí dvou registrů. První sekvence je opakována každou 1,5 s a vzhledem k frekvenci 10,23 MHz, má délku $1,5345 \times 10^7$ bitů, druhá sekvence je o 37 bitů delší. Jejich kombinací vzniká kód o délce $2,3547 \times 10^{14}$ bitů. Celá délka kódu je rozdělena na 37 částí. Každé družici je na jeden týden přidělena jedna z částí P kódu, čímž je docíleno rozdílných PRN družic. Vždy o sobotní půlnoci, kdy pro GPS začíná nový týden, dochází zároveň i ke změně vysílané části kódu.

Posledním typem kódu vysílaného družicemi je navigační zpráva. Obsahuje informace o telemetrii, dráze jednotlivých družic a nejrůznější korekční data. Zpráva je vysílána 50x za sekundu, její délka je 1 500 bitů a skládá se z pěti částí, každá po 300 bitech. Jednotlivé části zprávy jsou tvořeny desítkou třicetibitových slov. První v každé části zprávy je telemetrické slovo TLM, nesoucí synchronizační vzor a diagnostické zprávy. Za ním následuje slovo HOW (Hand-Over Word), které kromě identifikačních údajů části zprávy a nejrůznějších indikátorů nese i časovou hodnotu TOW (Time Of Week) platnou pro začátek další části zprávy. Hodnota TOW představuje počet časových úseků dlouhých 1,5 sekund uplynulých od začátku týdne GPS. Další slova jsou určena především pro navigační data, ale najdeme zde i nejrůznější vojenská data, kontrolní údaje, data o stavu družic, informace o stavu ionosféry a další údaje.

2.8. Specializované GNSS přijímače pro přenos času a frekvence

V současné době existují specializované GNSS přijímače, které jsou určeny pro transfer času a frekvence. Podporují kódová i fázová měření (viz kapitola 2.7.3) s využitím signálů z různých satelitních systémů v několika frekvenčních kanálech najednou. Pro porovnání časových normálů metrologických laboratoří se využívají právě tyto specializované GNSS přijímače, které umožňují měření odchylky časových stupnic s vysokou přesností. Princip porovnání dvou časových stupnic je zobrazen na obrázku 2.3.

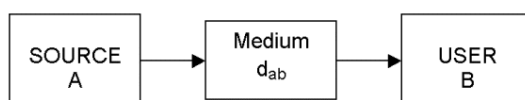


Obrázek 2.3: Měření odchylky časových stupnic pomocí dvou GPS přijímačů

Existuje několik metod synchronizace pomocí GNSS. Mezi nejpoužívanější patří:

Jednosměrný přenos času (One Way)

Jednosměrný přenos je nejpoužívanějším způsobem přenosu času pomocí radiového signálu, využívají ho běžné GPS přijímače. Princip takového přenosu je zobrazený na obrázku 2.4. GNSS satelit vysílá časový signál fázově modulovaný na nosné spolu s informací označující absolutní hodnotu času, dále pozici satelitu a informaci o aktuální odchylce GNSS stupnice od UTC.

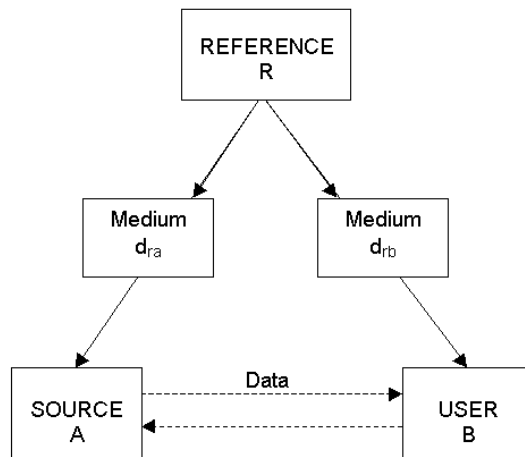


Obrázek 2.4: Jednosměrný přenos času (One Way)

Přenos času pomocí Common View

Common View je přístup, který rozšiřuje metodu jednosměrného přenosu. Tato technika umožňuje přímé porovnání dvou lokálních časových stupnic v rozsáhlém distribuovaném systému.

Obecné schéma Common View metody je znázorněno na obrázku 2.5. Při použití této metody, dvě stanice označené jako **A** a **B** přijímají jednosměrný signál, postupně vždy od jednoho satelitu a měří zpoždění mezi přijatým časovým signálem a lokální časovou stupnicí. Toto měření opakují pro všechny dostupné satelity systému. Změřená data se pak musí mezi stanicemi předat pomocí libovolné metody (e-mail, FTP atd.), následně je možné tato data zpracovat a zpětně vypočítat rozdíl měřených časových stupnic.



Obrázek 2.5: Metoda Common View

Rozdíl časových stupnic **A** a **B** je vypočítán z rozdílů diferencí (**R-A** a **R-B**) pro konkrétní satelit a čas. Kolísání zpoždění mezi jedním vysílačem a dvěma přijímači se vyruší, pokud jsou trasy signálu identické. Tohoto ideálního stavu však v praxi není možné dosáhnout.

Nicméně, tato metoda funguje dostatečně přesně i v případě, že obě přenosové trasy nejsou shodné. Vzhledem k tomu, že zpoždění trasy je obvykle ovlivněno různými vlivy okolního prostředí (jako je např. teplota, stav ionosféry, troposféry a další). Tento způsob měření obecně funguje nejlépe, je-li vzdálenost přijímačů malá v porovnání se vzdáleností mezi přijímačem a vysílačem. Toto rozložení má za následek to, že kolísání zpoždění v obou trasách bude vysoce korelované.

Přenos času a frekvence s využitím fáze nosné (Carrier-Phase)

Ačkoli většina GNSS přijímačů využívá časové kódy, které jsou posílány od satelitů, pro zjištění polohy, pro časovou synchronizaci je možné použít nosnou frekvenci. Jelikož frekvence nosné je zhruba 1000krát vyšší, než frekvence časových kódů má tato metoda mnohem větší rozlišení. Ovšem pro takovéto měření je zapotřebí získat almanachy (seznamy pozic a dalších parametrů satelitů) z GNSS satelitů a detailní model ionosféry a troposféry. Tyto hodnoty je pak nutné zpětně zpracovat do vyhodnocení měřených zpoždění.

Následující tabulka obsahuje porovnání nejistot výše popsaných metod přenosu času [25].

Způsob	Nejistota času, 24 hod., 2σ	Nejistota frekvence, 24 hod., 2σ
One Way	< 20 ns	< $2 \cdot 10^{-13}$
Single-Channel Common-View	≈ 10 ns	$\approx 1 \cdot 10^{-13}$
Multi-Channel Common-View	< 5 ns	< $5 \cdot 10^{-14}$
Carrier-Phase Common-View	< 500 ps	< $5 \cdot 10^{-15}$

Tabulka 2.3: Nejistoty metod přenosu času pomocí GNSS

2.8.1. Metrologické GNSS přijímače

Specializované metrologické přijímače se používají zejména v metrologických laboratořích času a frekvence pro měření stability lokálních etalonů času a frekvence. Jedním z takových zařízení je GNSS přijímač GTR51 zobrazený na obrázku 2.6 od firmy MESIT defence s.r.o.



Obrázek 2.6: GNSS přijímač GTR51 [26]

2.8.2. Levné GPS moduly pro časové aplikace

Pro potřeby synchronizace existují specializované moduly GNSS přijímačů. Tyto přijímače mají speciální digitální vstupy a výstupy pro aplikace přesného času. Mezi tyto signály patří Pulse Per Second (PPS) o frekvenci 1 Hz, který je standardně používán jako hlavní synchronizační signál. GNSS přijímače navíc mnohdy umožňují zvolit jinou frekvenci výstupního signálu, a to až do jednotek MHz.

Další užitečnou funkcionalitou bývá vstup, který umožňuje přesnou časovou identifikaci události reprezentovanou hranou impulsu (timestamp). Tento vstup může být použit pro měření externích zdrojů PPS signálu a pro jejich kalibraci.

PPS signál získaný s těmito GNSS přijímači poskytuje velice přesnou a dlouhodobě stabilní časovou stupnici. Nicméně krátkodobá stabilita tohoto signálu je pro přesné měření většinou nedostatečná. Proto se můžeme setkat s přesnými oscilátory synchronizovanými pomocí GPS přijímačů (GPS disciplined oscillator). V této kombinaci se projeví dobrá krátkodobá stabilita oscilátoru a dlouhodobá stabilita GPS, resp. GPS přijímače. Ovšem pro konstrukci takového zařízení je nutné znát parametry GPS přijímače.

Další specifická vlastnost GNSS přijímačů pro přenos času a frekvence je možnost fungovat ve fixním režimu. To znamená, že anténa přijímače bude vždy ve fixní pozici. Tato konfigurace pak zlepšuje kvalitu synchronizace.

Pro zjištění přesné polohy je pak možné využít tzv. Survey mód. V tomto módu je možné určit přesnou pozici GNSS přijímače. Doba potřebná ke kvalitnímu určení polohy se pohybuje od 15 minut do 24 hodin. A to v závislosti na požadované přesnosti a kvalitě signálu přijímaného z GNSS satelitů.

2.8.3. Výrobci specializovaných GNSS modulů

V současné době existují výrobci, kteří se zabývají výrobou specializovaných GNSS modulů. Jedná se jak o levné moduly (do 100 USD), tak i o dražší GNSS přijímače se speciálními metrologickými funkcionalitami. Mezi tyto funkcionality patří například měření fázového posunu signálů z jednotlivých satelitů, což zlepšuje kvalitu synchronizace nebo měření v režimu Common View (viz kapitola 2.7.3), kterým je možné porovnávat lokální časové stupnice na různých místech. Zde je seznam výrobců, kteří vyrábí specializované GNSS přijímače:

- uBlox
- Trimble
- Furuno Electric Co.
- Javad Navigation Systems
- Precitel
- Precise Time and Frequency, Inc.
- Zyfer
- iLotus
- Brandywine Communications
- hopf Elektronik GmbH
- Magellan
- Garmin

2.9. Shrnutí

Jak vyplývá z kapitoly 2.2, je v některých případech pro dosažení kvalitní synchronizace nutné měnit frekvenci interního oscilátoru. A to i v případě, kdy je frekvence oscilátoru správná, ale je zapotřebí změnit posun časové stupnice. To může v některých případech způsobovat problémy ostatním periferiím zařízení, které vyžadují neměnnou frekvenci. Jedná se zejména o periferie obsluhující komunikační rozhraní, jako je například Ethernet nebo USB. Pro tyto periferie je jako zdroj pracovního kmitočtu využíván právě interní oscilátor. Samotná změna nutná pro synchronizaci pak může způsobit selhání periferie.

Pokud by měl být pro synchronizaci lokální stupnice použit některý z levných GNSS přijímačů, popsaných v kapitole 2.3, je nutné ověřit jeho dosažitelnou přesnost. Výrobci levných přijímačů ale ve spoustě případů uvádějí tento parametr v nestandardizovaných metrikách a opomíjí definovat parametry provozu zařízení, jako je například minimální počet a úroveň signálu satelitů. V takovýchto případech je nemožné srovnat různé typy GNSS přijímačů pouze na základě datových listů.

Pokud by byl zvolen vhodný způsob synchronizace lokální stupnice a vhodný GNSS přijímač, bylo by možné jednotlivé prvky distribuovaného systému synchronizovat na referenční stupnici tohoto GNSS.

Problém ale nastává, pokud některé prvky systému nemají možnost synchronizace nebo možnost přímého měření frekvence lokálního oscilátoru, jak zmiňuje kapitola 2.1. V takovýchto případech není možné tyto prvky běžně využít, i když se může jednat o jinak vhodné přístroje pro danou aplikaci. Z tohoto důvodu je nutné hledat nové cesty, jak takový přístroj do synchronizovaného distribuovaného systému integrovat.

Jak vyplývá z kapitoly 2.4, problémy mohou nastat i v případě dlouhodobého měření stability časových stupnic pomocí GNSS přijímačů, kde je výstupem velké množství dat. Tato data je nutné shromáždit a předzpracovat pro pozdější vyhodnocení. Toto platí obzvláště pro měření pomocí metody Common View, kde je vzájemná výměna dat nepostradatelná. Pokud se měřicí přijímače nenacházejí ve stejné lokální komunikační síti, je možnost přenosu dat komplikovaná. Jelikož se jedná o dlouhodobé měření, je vhodné tento proces navíc automatizovat, což umožní snazší detekci výpadků dlouhodobých měření popsaných v kapitole 2.6.

3. Stanovení cílů práce

Hlavním cílem této práce je zlepšení přesnosti synchronizace v distribuovaných systémech pomocí levných GNSS přijímačů. Tyto přijímače mají nižší krátkodobou frekvenční stabilitu a horší přesnost generování časové stupnice oproti specializovaným zařízením. Toto je ale možné zlepšit s využitím pokročilých metod postprocessingu.

K úspěšnému dosažení tohoto cíle je zapotřebí splnění dílčích cílů definovaných v níže uvedených bodech:

Návrh a implementace metod řízení lokálních stupnic v distribuovaném systému

Je nutné navrhnout a realizovat metody řízení lokálních stupnic bez ovlivnění ostatních periférií zařízení. Tato stupnice musí mít fyzickou realizaci např. v podobě signálu PPS (viz kapitola 2.5). Nebude se tedy jednat o zpětně dopočítávanou stupnici, ale přímo generovanou.

Analýza využití levných GNSS přijímačů pro synchronizaci a transfer času

Pro splnění toho bodu je nutné popsat zdroje chyb při synchronizaci s využitím levných GNSS přijímačů a navrhnout možnosti jejich potlačení. Dále je nutné provést srovnání výsledků synchronizace pomocí levných přijímačů a s použitím navržených metod oproti specializovaným zařízením. Při znalosti dosažitelné přesnosti konkrétního přijímače je pak možné vyhodnotit vhodnost jeho použití pro konkrétní aplikaci. Použitím levného GNSS přijímače lze výrazně snížit celkovou cenu systému.

Návrh a implementace metody měření lokálních stupnic zařízení bez přímého výstupu signálu časové základny

Zde je potřeba vyřešit způsob měření v případě, že prvky distribuovaného systému nedisponují externím výstupem své časové základny.

Návrh a implementace metod pro automatizovaný sběr a zpracování dat

Pro kontinuální měření v laboratořích času a frekvence je nutné navrhnout nejenom metody pro nepřetržitý sběr dat, ale i metody pro jejich průběžné zpracování a spolehlivou archivaci. V rámci provozování metody měření Common View je dále nutné zajistit výměnu dat mezi jednotlivými laboratořemi, a to co nejefektivněji. Navržené metody musí být robustní a musí umožňovat zpracování dat v různých formátech specifikovaných běžně používanými metrologickými standardy.

Pokud budou výše uvedené body splněny, mělo by být možné i s využitím levných GNSS přijímačů řádově zlepšit přesnost synchronizace distribuovaných průmyslových systémů.

4. Řízení časové stupnice zařízení bez vlivu na jeho periferie

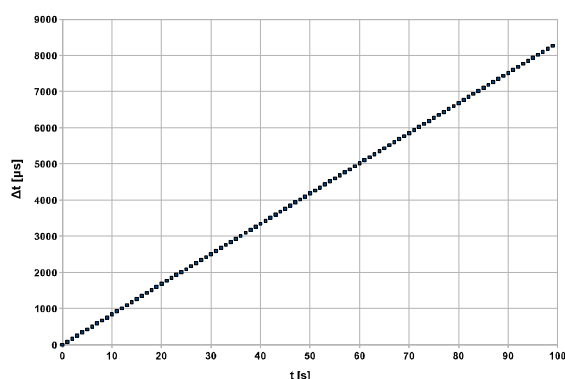
Pro potřeby synchronizace je v některých případech nutné měnit frekvenci interního oscilátoru, a to i v případě, kdy je samotná frekvence správná, ale je zapotřebí změnit posun časové stupnice. To ale v některých případech může způsobovat problémy ostatním periferiím zařízení, které vyžadují neměnnou frekvenci. V této kapitole je popsána implementace takové lokální stupnice, a to jednak pomocí softwarové realizace na běžném PC se standardním operačním systémem. A také za pomoci hardwarového řešení integrovaného do FPGA.

4.1. Realizace softwarově řízené stupnice

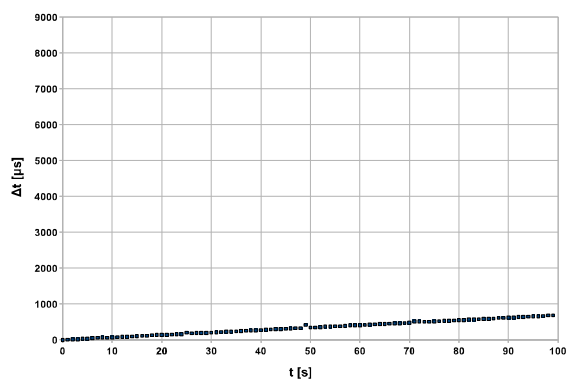
Realizace softwarově řízené stupnice využívá jako zdroj hodinového signálu pracovní kmitočet PC. Vstupy a výstupy byly realizovány pomocí sériového portu a zásuvné karty PCI6023E s digitálním rozhraním. Posléze byl pro konstrukci použit i průmyslový počítač se sběrnici ISA.

Jako operační systém byl použit nejprve Windows XP a nakonec MS-DOS. A to zejména kvůli tomu, že i při vysoké nastavené prioritě programu pro generování časových značek ve Windows XP, byla kvalita časové stupnice závislá na ostatních procesech. S použitím zásuvné karty PCI6023E od firmy National Instruments byl vytvořen program pro PC, který se choval jako zdroj referenčního signálu. Jeho výstupem byl PPS signál generovaný pomocí vnitřních čítačů v procesoru. Na začátku programu se čeká na spouštěcí impuls, v tomto případě PPS signál z GPS přijímače. Poté je periodicky načítán aktuální čas. Na začátku nové sekundy je vygenerován impuls, program je na 500 ms uspán, a nakonec se opět vrátí k čekání na novou sekundu.

Na obrázku 4.1 jsou změřené hodnoty odchylky PPS pulsu GPS přijímače a PPS pulsu generovaného pomocí PC. Z obrázku 4.1 je dále patrné, že posun časové stupnice se zvětšuje o 85 μs každou sekundu, to odpovídá zejména driftu D popsanému v kapitole 2.1. Díky tomuto zjištění bylo možné provést korekci časové stupnice přímo v programu. Díky této korekci se povedlo snížit odchylku téměř desetkrát, jak ukazuje obrázek 4.2.



Obrázek 4.1: Drift časové stupnice PC

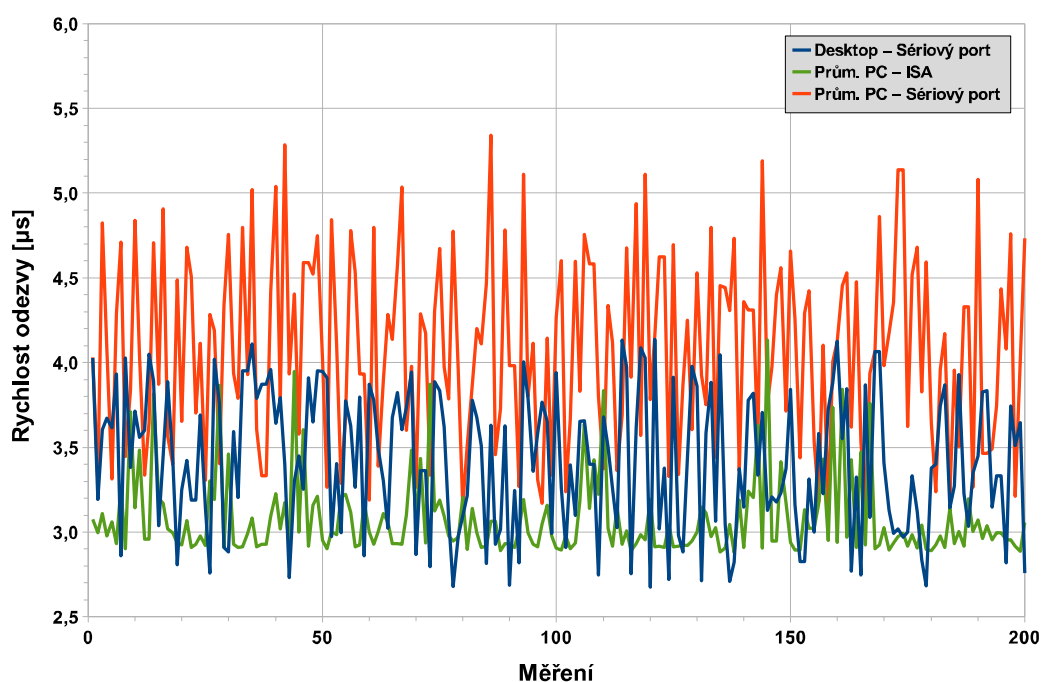


Obrázek 4.2: Drift časové stupnice PC po provedené korekci

Výsledná strmost odchylky se pohybovala kolem deseti mikrosekund za sekundu. Nicméně korekce je platná pouze pro dané zařízení. Takovéto řešení je pro dlouhodobý provoz nevhodné. Je proto potřeba provádět korekce časové stupnice za běhu. Z tohoto důvodu je podstatné, aby zařízení provádělo korekce samo bez nutnosti zasahovat do běhu programu.

Předchozí výsledky poukazují na důležitost periodických korekcí driftu časové stupnice. Z tohoto důvodu bylo třeba změřit rychlost a latenci s jakou je zařízení schopné zpracovat příchozí impuls. A to také z důvodů synchronizace s referenčním signálem (v tomto případě PPS) a přesnému zaznamenání časové události. Proto byl navržen systém pro ověření rychlosti odezvy.

Pro realizaci systému byl využit počítač typu IBM PC s architekturou x86. Jako operační systém byl použit MS DOS. K měření byly použity dva PC, první byl průmyslový se sběrnici ISA a druhý klasický desktopový počítač. Nejprve bylo nutné zjistit rychlost s jakou je PC schopno komunikovat pomocí svých vstupů a výstupů. Měření probíhalo tak, že na vstupy byl přiveden puls a PC na tuto událost odpověděl pulsem na výstupu. Z obrázku 4.3 je patrné, že odezva se pohybuje v řádech jednotek mikrosekund. Tato hodnota je dostačující pro přesnost synchronizace v řádu 1 ms.



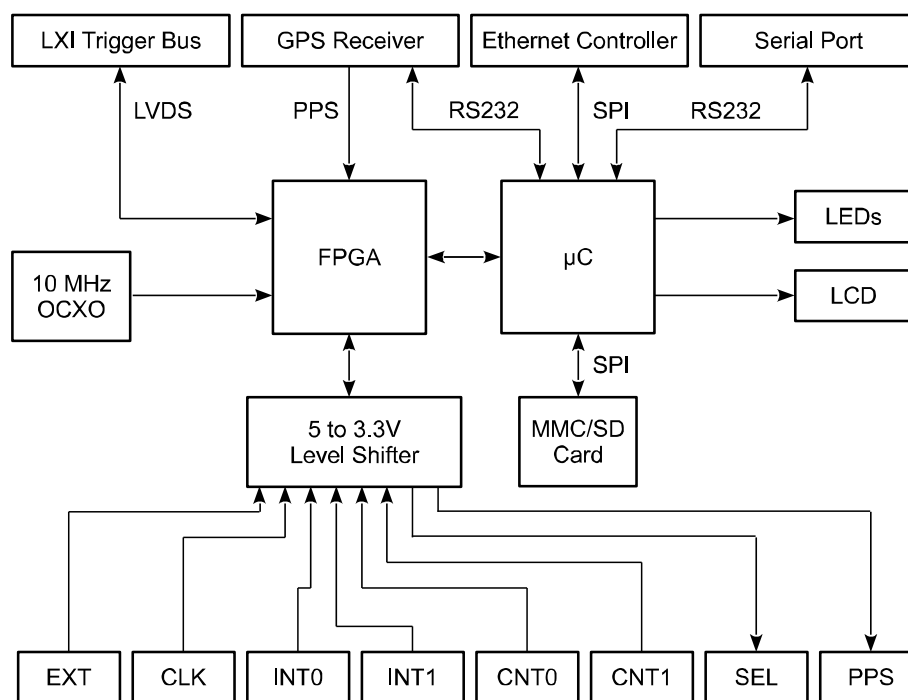
Obrázek 4.3: Doba odezvy systému na synchronizační puls

4.2. Hardwarové řízení stupnice

Na základě požadavků na přesnější synchronizaci bylo navrženo zařízení na bázi FPGA. Toto zařízení slouží jako přesná časová stupnice synchronizovaná s UTC (resp. GPS Time) viz kapitola 2.5.3. S jeho pomocí je možné zaznamenávat a generovat asynchronní časové události [27]. Tyto události jsou generovány a zaznamenávány pomocí signálů logické úrovně TTL přivedených na BNC konektory (viz obrázek 4.4). Pomocí sériové linky je pak možné tyto události monitorovat. Případně je možné ukládat záznam na SD kartu.

Zařízení bylo navrženo univerzálně, proto k němu možné připojit, pomocí BNC konektorů, zdroj externích hodin nebo synchronizační PPS signál. Nebo je možné využít integrovaného OCXO a GPS [28].

Na obrázku 4.4 je znázorněno blokové schéma modulu. Hlavními prvky jsou hradlové pole (obsahující časovou stupnici), mikroprocesor (ten umožňuje komunikaci s ostatními zařízeními), GPS přijímač (zdroj referenční UTC stupnice), ethernetový řadič a 10MHz OCXO.



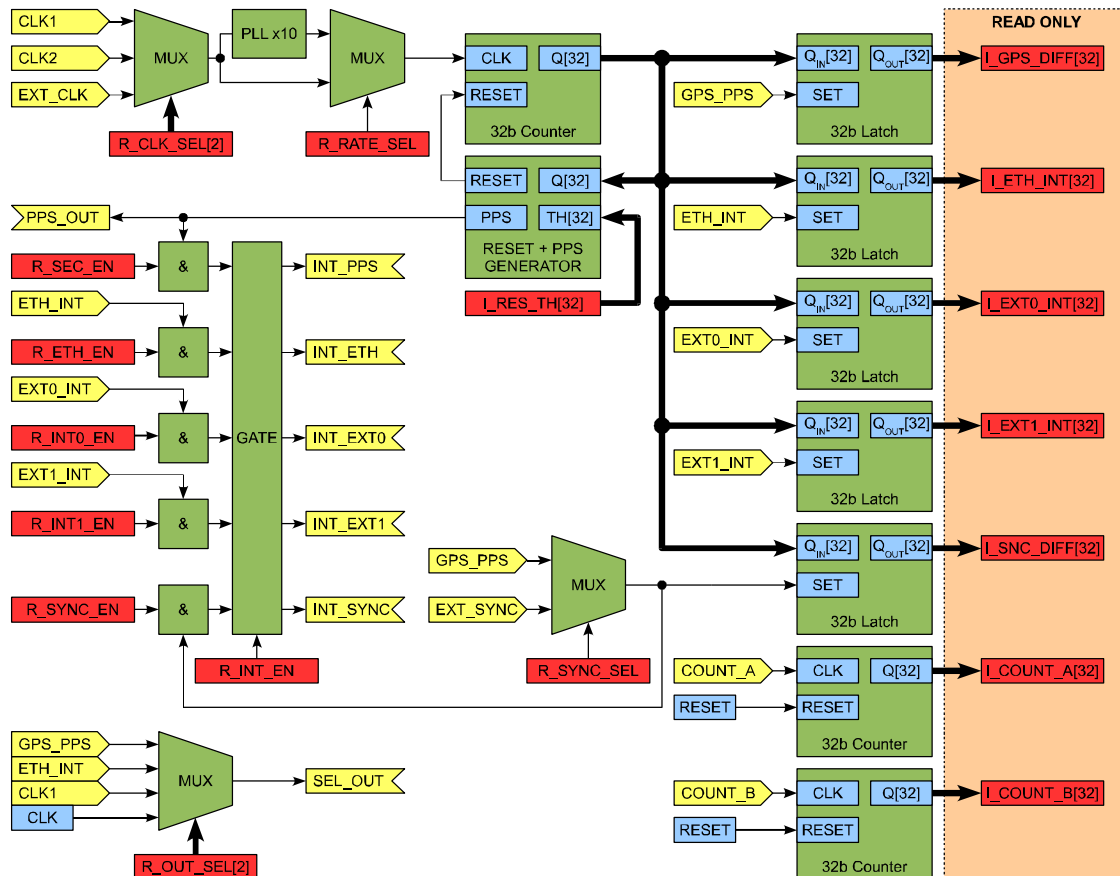
Obrázek 4.4: Blokové schéma zařízení

Komunikace mezi mikrokontrolérem a hradlovým polem probíhá pomocí společné sběrnice. Mikrokontrolér má k sobě připojeno několik periferií, kromě komunikace s hradlovým polem a ethernetovým řadičem zprostředkovává také výměnu dat mezi GPS přijímačem.

O kvalitu časové stupnice se stará OCXO (MTI 210 od firmy MTI Miliren), který poskytuje dobrý základ pro krátkodobou stabilitu systému. Druhým dílčím prvkem je GPS přijímač LEA-6T od firmy uBlox. Tento GPS přijímač je speciálně navržen pro aplikace s přesným časem. Tím pádem zajišťuje dlouhodobě stabilní časovou referenci pro celý systém.

Díky možnosti definovat vlastnosti jednotlivých vstupně/výstupních portů bylo možné na výslednou desku zakomponovat LXI Trigger Bus [29]. LXI Trigger Bus využívá LVDS (Low-Voltage Differential Signaling) pinů hradlového pole. Tato sběrnice sice není v současnosti využita, ale do budoucna je možné ji použít pro synchronizaci externího zařízení.

Obrázek 4.5 zobrazuje interní strukturu kódu FPGA. Pro konfiguraci zařízení je možné využít interních registrů. K vyčítání naměřených hodnot slouží READ ONLY registry. Všechny registry zařízení jsou externímu mikrokontroléru přístupné přes rozhraní simulující SRAM.



Vysvětlivky

	Vstup do FPGA		Blok pouze pro čtení
	Výstup z FPGA		VHDL komponenta (funkční blok)
	Registr		Signál
	Pomocný signál		Sběrnice

Obrázek 4.5: Schéma interní konfigurace FPGA

Hlavní čítače zařízení jsou 32bitové. Tyto čítače slouží pro záznam subsekundové hodnoty časové události. O záznam času v řádu sekund se stará mikrokontrolér, k tomuto řešení bylo přistoupeno z důvodu jednoduššího převodu na interní stupnice na absolutní (např. UTC) stupnici, kterou udržuje právě mikrokontrolér.

Zařízení umožňuje zvolit použitý synchronizační signál. Tím může být PPS signál z GPS přijímače, signál z ethernetového rozhraní (pro použití PTP) nebo externí signál. Zařízení dále poskytuje výstupní PPS signál, jelikož tento signál nemusí být identický se vstupním signálem. Tato skutečnost je závislá na použitém synchronizačním algoritmu.

Přístup k jednotlivým registrům systému je realizovaný pomocí rozhraní identického s SRAM. Interní registry FPGA se tak ze strany mikrokontroléru tváří jako adresa v paměti, to umožňuje jednoduchý a rychlý přístup k těmto registrům z programu mikrokontroléru.

Tabulka 4.1 ukazuje rozložení jednotlivých registrů v simulované paměti.

Název	Adresa	Velikost [b]	Pouze pro čtení	Popis
I_SYNC_DIFF	0x00	32	A	Odchylka od synchronizačního signálu
I_GPS_DIFF	0x04	32	A	Odchylka od GPS PPS pulsu
I_INT0	0x08	32	A	Čas události na vstupu INT0
I_INT1	0x0C	32	A	Čas události na vstupu INT1
I_ETH_INT	0x10	32	A	Čas události od ethernetového řadiče
I_COUNT_A	0x14	32	A	Hodnota čítače pro vstup CNTA
I_COUNT_B	0x18	32	A	Hodnota čítače pro vstup CNTB
B_LXI_IN	0x1C	8	A	LXI rozhraní
B_LXI_OUT	0x1D	8	N	LXI rozhraní
B_LXI_DIR	0x1E	8	N	LXI rozhraní
R_CLK_SEL	0x1F [0 – 1]	2	N	Výběr zdroje hodinového signálu
R_RATE_SEL	0x1F [2]	1	N	Násobení hodinového signálu 10x
R_SYNC_SEL	0x1F [3]	1	N	Volba synchronizačního signálu
R_OUT_SEL	0x1F [4 – 5]	2	N	Nastavení volitelného výstupu
RESERVED	0x1F [6]	1	N	Rezervováno
R_SYNC_ON	0x1F [7]	1	N	Povolení synchronizace
R_INT_EN	0x20 [0]	1	N	Povolení přerušení pro MCU
R_SEC_EN	0x20 [1]	1	N	Přerušení od časové stupnice
RESERVED	0x20 [2]	1	N	Rezervováno
RESERVED	0x20 [3]	1	N	Rezervováno
R_ETH_EN	0x20 [4]	1	N	Přerušení od ethernetového řadiče
R_INT0_EN	0x20 [5]	1	N	Přerušení od vstupu INT0
R_INT1_EN	0x20 [6]	1	N	Přerušení od vstupu INT1
R_SYNC_EN	0x20 [7]	1	N	Přerušení od synchronizačního signálu
I_RES_TH	0x21	32	N	Ruční ladění časové stupnice
I_OFFSET	0x25	32	N	Offset generovaného PPS

Tabulka 4.1: Mapování registrů FPGA do simulované SRAM

Mikrokontrolér, v závislosti na přítomnosti synchronizačního pulsu, periodicky vyčítá jeho odchylku od interní časové stupnice FPGA. Na základě této odchylky vyhodnotí regulační zásah a provede úpravu korekční hodnoty frekvence. V případě vyhodnoceném na obrázku 4.6 byl pro výpočet akčního zásahu použit jednoduchý PID regulátor.

Celé zařízení využívá jako zdroj hodinového signálu oscilátor o frekvenci 10 MHz (je možné využít i 5 MHz oscilátor). Tato frekvence je interně vynásobena pomocí bloku fázového závěsu na 250 MHz. Vynásobená frekvence je využita pro generování interní časové stupnice. Díky tomu je možné provádět záznam událostí a jejich generování s rozlišením 4 ns.

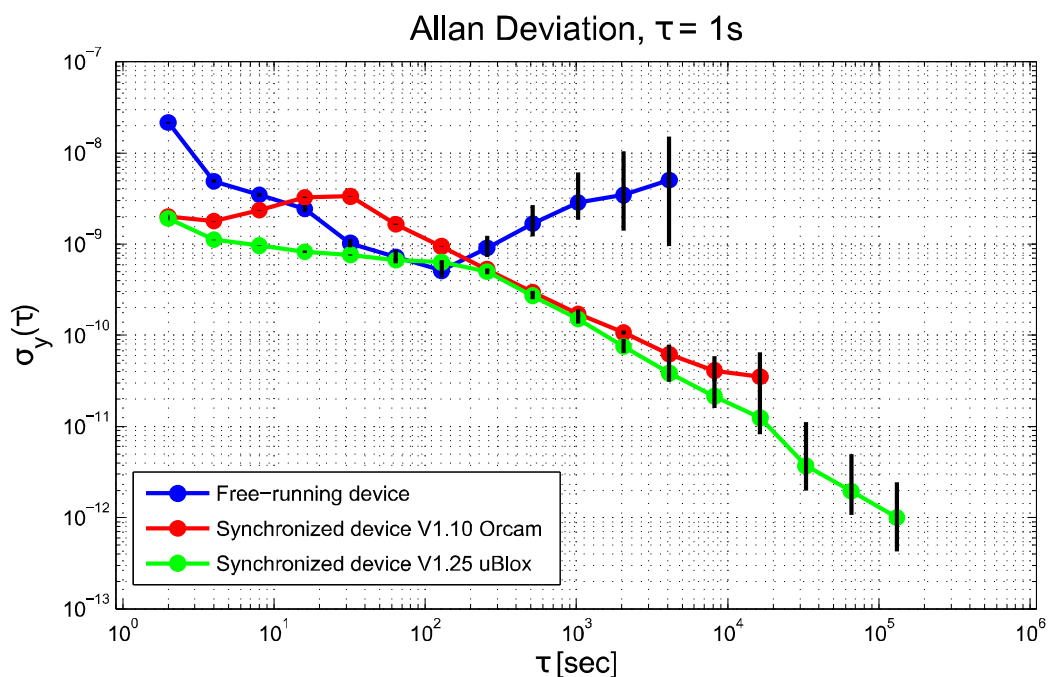
Každý ze zaznamenávaných vstupů má k dispozici vlastní 32bitový čítač. Díky navržené struktuře je možné pomocí linky přerušování rychle informovat mikrokontrolér o nově změřené události. Díky tomu je možné zaznamenávat události s frekvencí až 1 kHz.

Zařízení bylo dlouhodobě testováno v laboratoři státního etalonu času a frekvence (LSEČF) ÚFE AV ČR. Byla měřena jeho stabilita v porovnání s cesiovým normálem, a to v několika variantách konfigurace.

Na obrázku 4.6 je spočtená Allanova odchylka pro tři různé situace. **Modře** je zobrazeno zařízení bez synchronizace tzn. volně běžící. Je patrné, že v tomto případě se projevuje dlouhodobá nestabilita použitého oscilátoru.

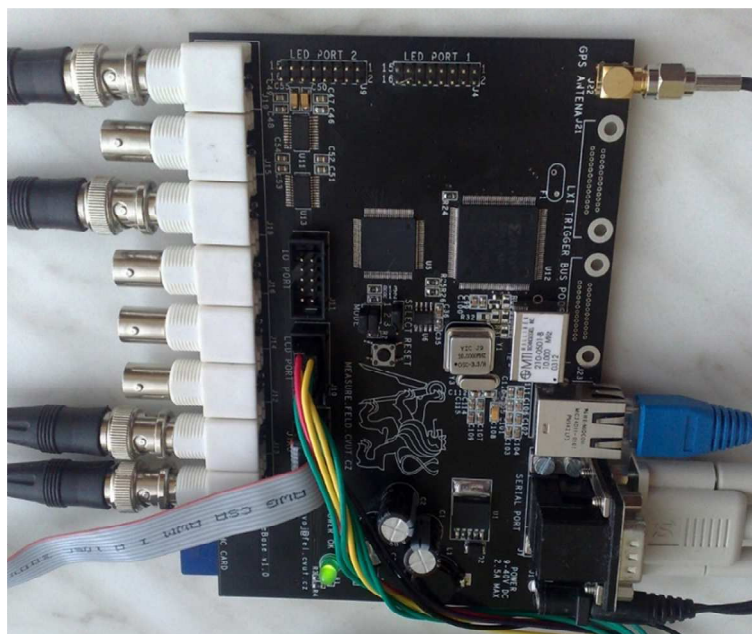
V případě **červeného** průběhu byl pro synchronizaci použit GPS přijímač Orcam. Tento přijímač není určený pro přenos času a frekvence, jedná se o běžný GPS přijímač pro určování polohy. Pro τ 10 až 100 sekund je patrné zhoršení oproti volně běžícímu oscilátoru. To bylo pravděpodobně způsobeno špatnou volbou konstant regulátoru a „rozkmítáním“ synchronizace.

Zelený průběh reprezentuje variantu, kde byl pro synchronizaci použit přijímač uBlox LEA-6T (viz kapitola 5.1.1). V tomto případě je patrné, že došlo ke zlepšení dlouhodobé stability zařízení bez negativního ovlivnění stability krátkodobé. Zařízení tedy dosahuje požadované přesnosti 1 μ s.



Obrázek 4.6: Porovnání kvality synchronizace s využitím dvou rozdílných GPS přijímačů

Na obrázku 4.7 je fotografie celého zařízení v provozu.



Obrázek 4.7: Fotografie celého zařízení

4.3. Zhodnocení výsledků

V rámci řešení popsaného v této kapitole se povedlo realizovat softwarovou stupnici s běžným PC a standardním operačním systémem. Tato softwarová stupnice umožňuje synchronizovat zařízení bez ovlivnění systémového oscilátoru tak, jak bylo požadováno. Vzhledem k latenci systému a nestabilitě oscilátoru PC tato stupnice dosahuje přesnosti do 1 ms (ve smyslu MTIE). Ačkoli tím není dosaženo cílové přesnosti 1 μ s, může být tato realizace pro některé průmyslové systémy dostačující. Výhodou je snadnost realizace, v již existujícím systému. Stačí využít sériovou linku PC či přidat IO kartu.

V druhé fázi řešení bylo přistoupeno k realizaci přesné časové stupnice pomocí hardwarového modulu. Aby bylo možné stupnici jednoduše integrovat do existujícího systému byla časová stupnice realizována pomocí VHDL kódu pro FPGA. Tato stupnice byla otestována v laboratoři státního etalonu času a frekvence (LSEČF) ÚFE AV ČR. Na základě výsledků těchto testů byla zvolena optimální hardwarová konfigurace v podobě kombinace OCXO oscilátoru s dobrou krátkodobou stabilitou a GPS přijímačem s vynikající dlouhodobou stabilitou (viz kapitola 5.1.1). Toto řešení má dostačující přesnost pro vytvoření časové stupnice s přesností 1 μ s. A ačkoli se jedná o hardwarové řešení, je možné ho integrovat do systému obsahující FPGA.

5. Využití levných GNSS přijímačů pro synchronizaci

Pro další postup bylo nutné vybrat a otestovat vhodné GNSS přijímače. Jako hlavní parametr byla volena cena modulu do 100 USD. V rámci této kategorie byly vybrány dva GPS přijímače a to LEA-6T od firmy uBlox a ICM SMT GPS od firmy Trimble. Jedná se o přijímače navržené speciálně pro časové aplikace [30]. Třetí použitý GPS přijímač byl Orcam GPS30, tento přijímač byl původně volen pro konstrukci zařízení popsané v kapitole 4.2, posléze byl ale nahrazen právě GPS přijímačem LEA-6T.

GPS přijímače z oblasti časových aplikací LEA-6T a ICM SMT GPS byly voleny záměrně. Každý totiž funguje na jiném principu synchronizace interní časové stupnice. LEA-6T využívá volně běžícího TCXO a synchronizaci provádí v diskretních krocích. Pro kompenzaci diskretizovaného rozlišení časové stupnice pak poskytuje korekční informaci popsanou v kapitole 5.3. Přijímač ICM SMT GPS naproti tomu provádí synchronizaci pomocí ladění frekvence interního VCXO, čímž odpadá nutnost korekcí a změna fáze PPS je plynulá.

5.1. Srovnání dostupných GPS modulů

Tato kapitola obsahuje popis navržené metodiky a výsledky provedených testů levných GPS přijímačů. Pro test byly zvoleny přijímače LEA-6T, ICM SMT GPS a Orcam GPS30.

5.1.1. Testované GPS přijímače

GPS přijímač LEA-6T od firmy uBlox je určený primárně pro aplikace s přesným časem. Tomu má také přizpůsobeny vstupy a výstupy. Umožňuje komunikaci pomocí rozhraní RS232 a USB s využitím komunikačního protokolu NMEA a UBX [31]. Přijímač má vlastnosti důležité pro časové aplikace, jako je možnost nastavení zpoždění výstupních pulsů v jednotkách nanosekund a možnost záznamu časové události. Dále poskytuje korekce pro generovaný signál PPS (z důvodu granularity interní stupnice).

ICM SMT GPS Disciplined Clock od firmy Trimble je také určený primárně na aplikace s přesným časem. Umožňuje komunikaci pomocí RS232 využitím NMEA a TRIMBLE komunikačního protokolu (viz příloha 12.1). Přijímač má stejně jako předchozí možnost nastavení zpoždění výstupních pulsů v jednotkách nanosekund.

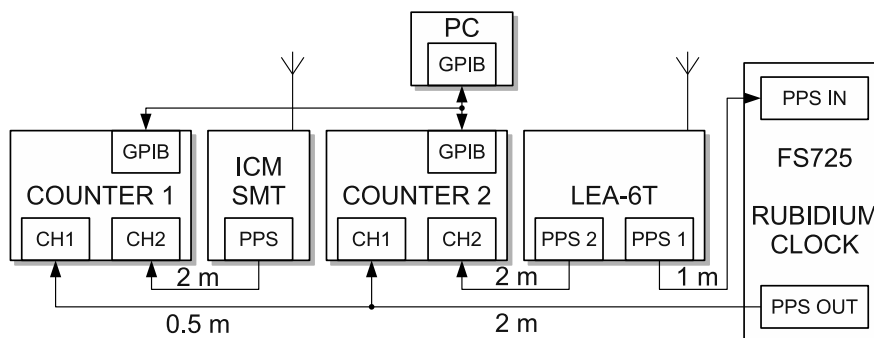
GPS30 od firmy Orcam představuje klasický GPS přijímač. Tento přijímač není určený pro časové aplikace. Přijímač byl zvolen pouze pro přehled parametrů. Tabulka 5.1 obsahuje porovnání výrobcem udávaných parametrů PPS signálu přijímačů.

	LEA-6T	ICM SMT GPS	GPS30
RMS	30 ns	15 ns	---
99,00 %	< 60 ns	< 50 ns	< 1000 ns
Granularita	21 ns	10 ns	---
RMS s použitím korekcí	15 ns	---	---

Tabulka 5.1. Parametry PPS signálu GPS přijímačů udávané výrobcem

5.1.2. Testovací metodika

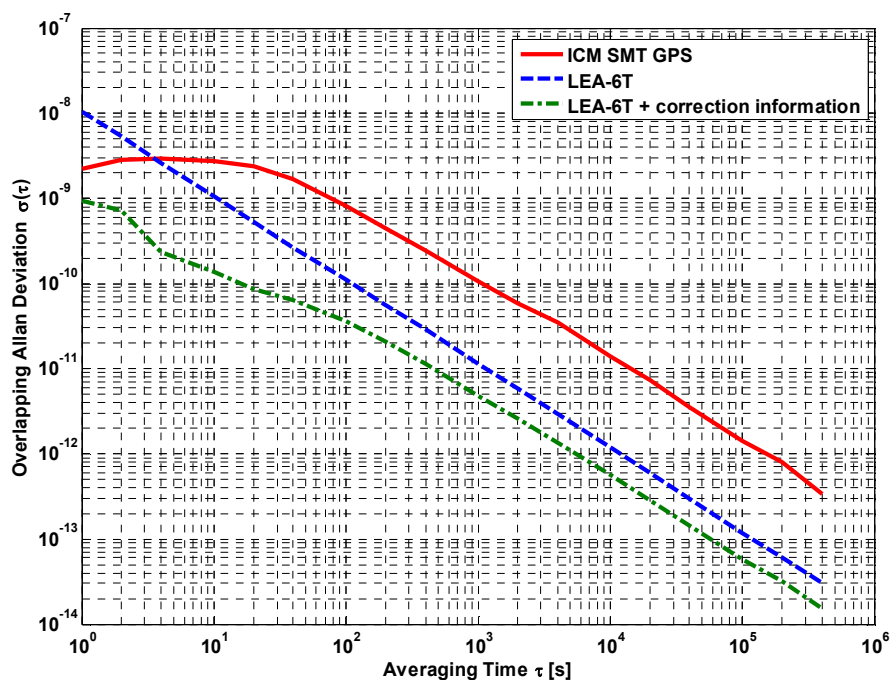
Stabilita GPS přijímačů byla testována proti stabilní referenční časové stupnici generované rubidiovým normálem FS725. Obrázek 5.1 reprezentuje schéma měřeného systému. Pro měření difference stupnice a PPS signálu přijímačů byly použity čítače Picotest U6200A. Na schématu jsou také zaznamenány délky použitých měřicích kabelů.



Obrázek 5.1: Zapojení měřicího pracoviště

5.1.3. Výsledky

Byly otestovány dva GPS přijímače, LEA-6T a ICM SMT GPS. Obrázek 5.2 znázorňuje modifikovanou Allanovu odchylku (viz kapitola 2.2.2) těchto přijímačů a dále průběh s použitím korekčních údajů u přijímače LEA-6T. Přijímač LEA-6T poskytuje korekční údaj ke každému generovanému PPS. V případě využití tohoto přijímače pro synchronizaci může být tento údaj zapracován do synchronizačního algoritmu.



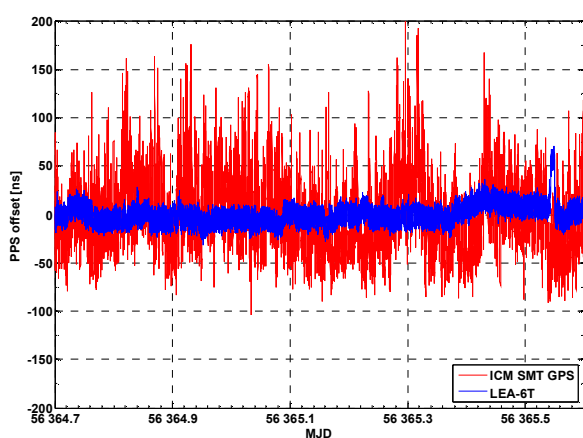
Obrázek 5.2: Výsledek porovnání přijímačů

V tabulce 5.2 je uvedena RMS hodnota odchylek pro různé intervaly měření. RMS hodnota odchylky je jedním z běžně udávaných parametrů přijímače v datovém listu.

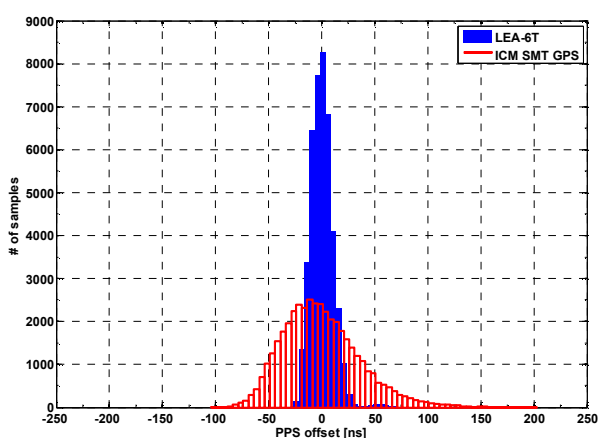
	uBlox LEA-6T	Trimble ICM SMT
Hodina	6,3 ns	21,0 ns
Den	7,1 ns	26,9 ns
Týden	7,7 ns	24,4 ns
Dva týdny	7,5 ns	26,0 ns
Měsíc (30 dní)	8,0 ns	26,2 ns

Tabulka 5.2: RMS odchylek GPS přijímačů

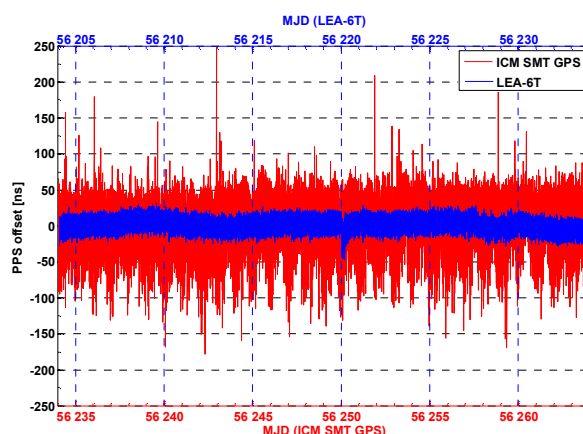
Obrázky 5.3 a 5.5 zobrazují odchylku PPS signálů GPS přijímačů od referenční stupnice rubidiového normálu v průběhu dvou měření. Na obrázcích 5.4 a 5.6 je pak histogram těchto odchylek.



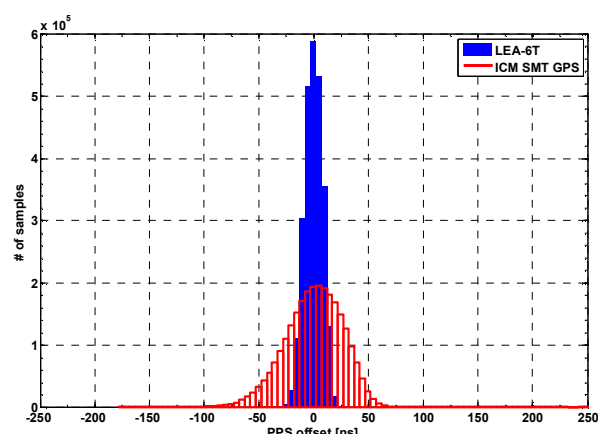
Obrázek 5.3: Odchylka přijímačů od referenční časové stupnice



Obrázek 5.4: Histogram odchylky přijímačů od referenční časové stupnice



Obrázek 5.5: Odchylka přijímačů od referenční časové stupnice



Obrázek 5.6: Histogram odchylky přijímačů od referenční časové stupnice

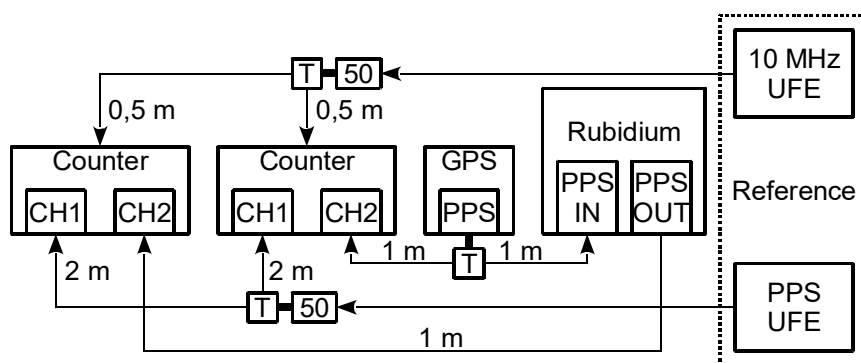
Jak je patrné z těchto výsledků, přijímač LEA-6T dosahuje lepší krátkodobé stability a proto byl vybrán pro další experimenty.

5.2. Synchronizace rubidiového normálu pomocí GPS

Cílem měření bylo ověřit stabilitu časové stupnice poskytované rubidiovým normálem FS725 synchronizovaným na GPS stupnici pomocí GPS přijímače. Jako zdroj synchronizace sloužil přijímač uBlox LEA-6T. Stabilita celého zařízení byla vůči stupnici UTC(TP) generované v laboratoři Státního etalonu času a frekvence v Ústavu fotoniky a elektroniky Akademie věd v Praze (LSEČF ÚFE AV ČR).

5.2.1. Zapojení měřicího systému

Na obrázku 5.7 je znázorněno zapojení měřicího systému. Signály 10 MHz UFE a PPS UFE sloužily jako referenční a byly poskytovány ze státního etalonu času a frekvence. Ve schématu jsou znázorněny délky použitých BNC kabelů. Tyto kabely byly vyrobeny ze stejného materiálu, takže u nich lze předpokládat shodné zpoždění signálu. Značka **T** označuje BNC rozbočovač a značka **50** nahrazuje 50 Ω průchozí terminátor.



Obrázek 5.7: Zapojení měřicího systému

5.2.2. Použité přístroje

GPS přijímač: uBlox LEA6-T (číslo 1), anténa GPS-P1MAM (číslo 3)

Čítač: 2 x Picotest U6200A

Rubidiový normál: SRS FS725

5.2.3. Parametry GPS přijímače

Nastavení všech parametrů GPS přijímače bylo uloženo do souboru GPS_TIM_UFE_50us.txt, tento soubor je součástí měřených dat. Mezi základní parametry patří přesná poloha (nastavena pomocí funkce *Survey-in*) a nastavené zpoždění výstupu 50 μ s (takto se zabrání přetečení výsledku měření čítače do následující sekundy).

Anténa GPS přijímače byla umístěna vně okna v přízemí budovy. To způsobilo sníženou viditelnost satelitů a zhoršení přijímaného signálu. Toto umístění simulovalo nepříznivé podmínky, které mohou nastat v praxi.

5.2.4. Nastavení rubidiového normálu

V tabulce 5.3 jsou uvedeny parametry použité při měření. Tyto parametry jsou dále popsány v manuálu přístroje [32]. Ty nejdůležitější jsou označeny šedě.

Název	Hodnota
SS	1349
FC	2262, 2436
SF	-239
ST	FF, FF, FF, 243, 36, FF
DS	-10, 803
TO	-1764
PT	10
PF	4
PI	0

Tabulka 5.3. Parametry rubidiového normálu SRS FS725

5.2.5. Naměřená data

Tabulka 5.4 obsahuje ukázkou naměřených dat. V prvním sloupci je čas ve formátu UNIX Time. Ve druhém sloupci je diference PPS signálu GPS přijímače a PPS signálu stupnice UTC(TP). V třetím sloupci je diference PPS signálu rubidiového normálu a PPS signálu stupnice UTC(TP). Poslední sloupec obsahuje časovou značku PPS signálu GPS přijímače měřenou přímo rubidiovým normálem. Tuto časovou značku rubidiový normál využívá pro synchronizaci své interní časové stupnice. Měření probíhalo od 16:22:52 dne 14. 03. 2012 do 09:44:20 dne 26. 04. 2012.

UNIX Time	GPS x UFE [ns]	Rubidium x UFE [ns]	Rubidium x GPS [ns]
1332038733.31	50171.9	50101.1	4.0
1332038734.31	50161.8	50101.2	999999997.0
1332038735.31	50170.0	50101.0	6.0
1332038736.31	50177.4	50100.9	999999999.0

Tabulka 5.4: Ukázka naměřených dat

5.2.6. Výsledky měření

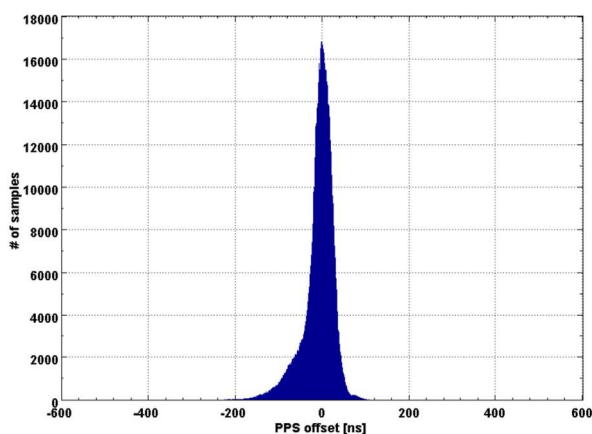
Samotný GPS přijímač

Tabulka 5.5 obsahuje změřené parametry GPS přijímače. Tyto hodnoty nejsou filtrovány, jedná se tedy okamžité hodnoty. Výsledky vypovídají o vlastnostech přijímače v nepříznivých podmínkách, jak je popsáno v kapitole 5.2.3. V těchto výsledcích není zahrnuta korekce PPS, kterou přijímač uBlox LEA-6T umožňuje, jak je popsáno v kapitole 5.3.

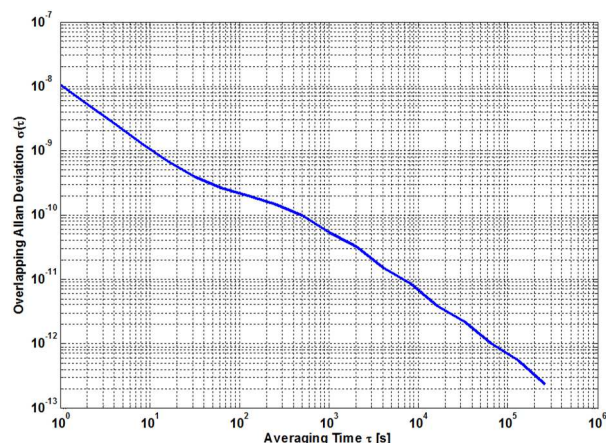
Počet vzorků	1012887
Střední hodnota	-9,00 ns
STD	40,62 ns
Max - Střední hodnota	391,00 ns
Střední hodnota - Min	-531,50 ns

Tabulka 5.5: Samotný GPS přijímač

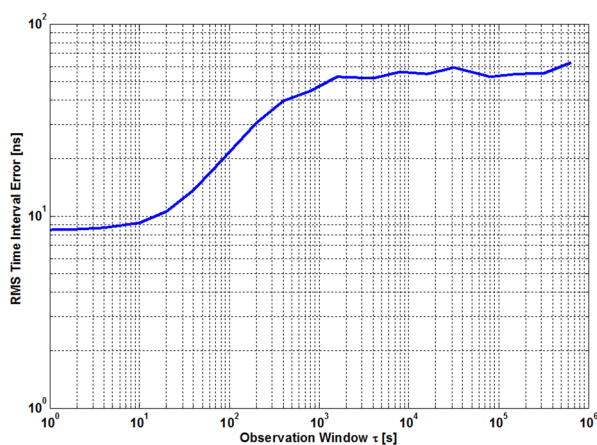
Na obrázcích 5.8 až 5.11 jsou zobrazeny metriky aplikované na změřená data.



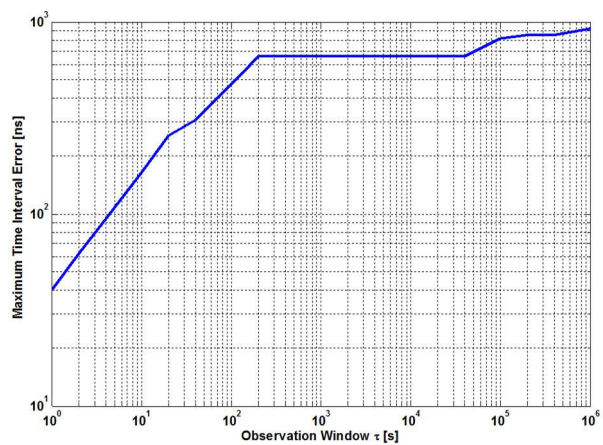
Obrázek 5.8: Histogram



Obrázek 5.9: ODEV



Obrázek 5.10: TIE RMS



Obrázek 5.11: MTIE

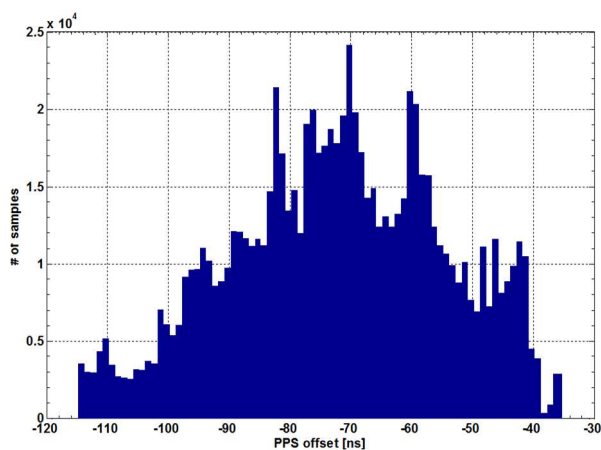
Rubidiový normál synchronizovaný na GPS přijímač

Výsledky měření rubidiového normálu synchronizovaného na GPS přijímač LEA-6T jsou uvedeny v tabulce 5.6. Střední hodnota odchylky stupnic (-72 ns) byla způsobena interním zpožděním na vstupu rubidiového normálu. Tuto hodnotu je možné kalibrovat.

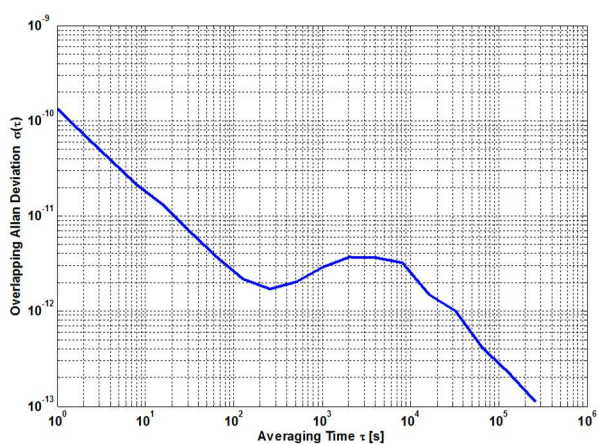
Počet vzorků	836483
Střední hodnota	-72,28 ns
STD	17,60 ns
Max - Střední hodnota	36,98 ns
Střední hodnota - Min	42,52 ns

Tabulka 5.6: Rubidiový normál synchronizovaný pomocí GPS přijímače

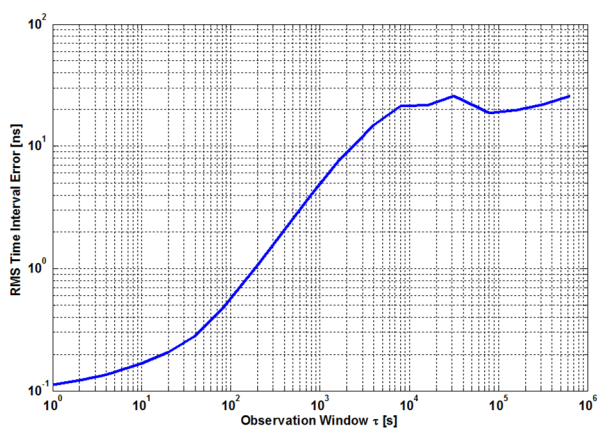
Na obrázcích 5.12 až 5.15 jsou zobrazeny metriky aplikované na změřená data.



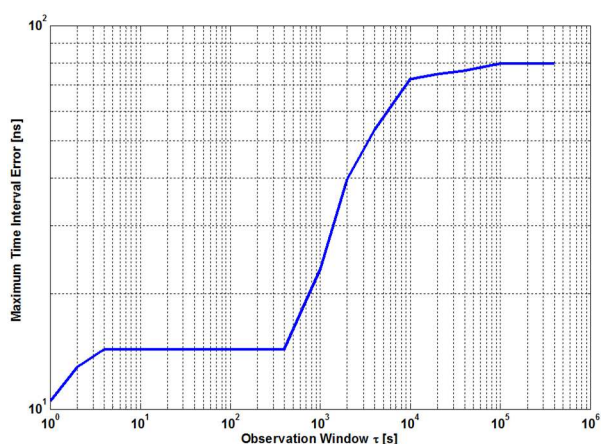
Obrázek 5.12: Histogram



Obrázek 5.13: ODEV



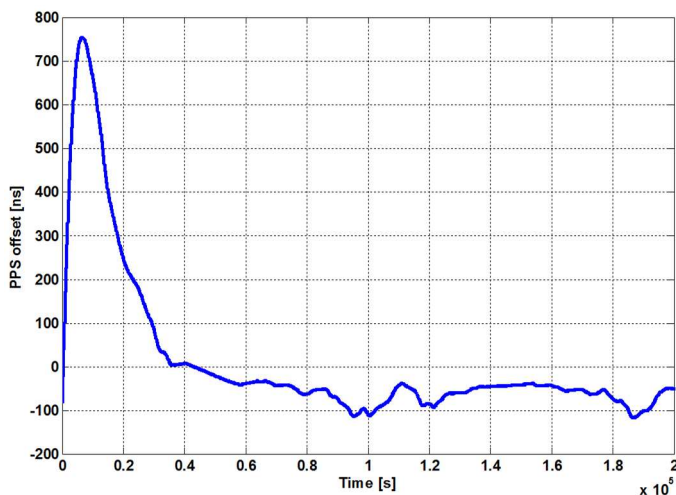
Obrázek 5.14: TIE RMS



Obrázek 5.15: MTIE

5.2.7. Synchronizace rubidiového normálu

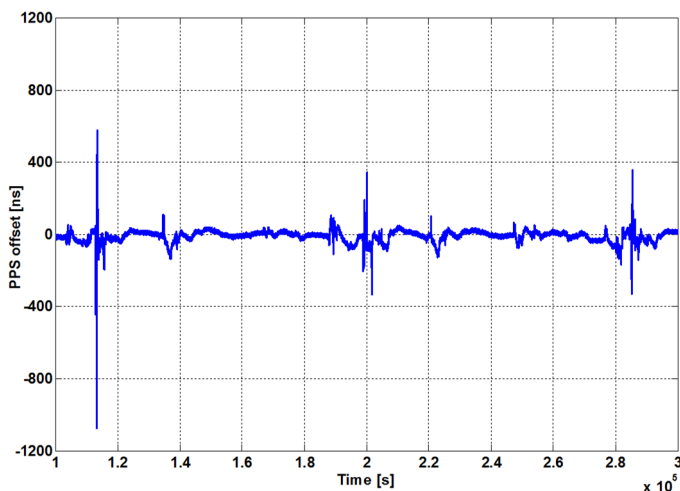
Průběh odchylky při synchronizaci rubidiového normálu na externí PPS signál je zobrazen na obrázku 5.16. Pro vyhodnocení měření bylo odebráno prvních 10^5 vzorků, aby nedošlo ke zkreslení výsledků měření.



Obrázek 5.16: Počátek synchronizace u rubidia

5.2.8. Časový průběh odchylky PPS signálu GPS přijímače

Na obrázku 5.17 je průběh odchylky PPS signálu GPS od UTC(TP). Na tomto průběhu jsou patrné takzvané denní cykly. Tyto cykly jsou způsobeny změnou prostředí (zejména změnami v ionosféře) s periodou jednoho dne (86400 sekund).



Obrázek 5.17: Odchylka PPS GPS přijímače v čase

5.2.9. Výsledky

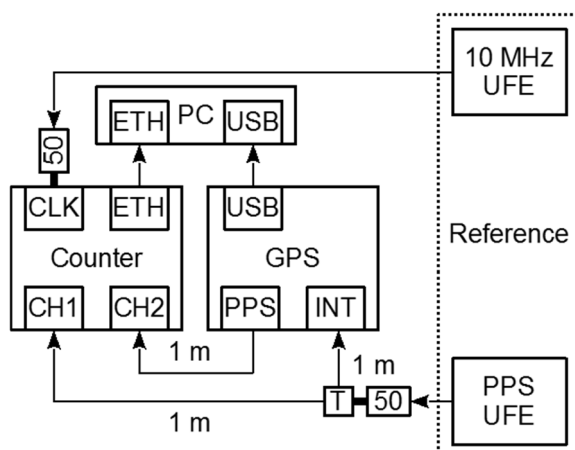
Hodnoty MTIE a Allanova odchylka potvrzují očekávané krátkodobé a dlouhodobé stability obou měřených systémů.

5.3. Použití korekční hodnoty generovaného PPS signálu

Cílem měření bylo ověřit stabilitu časové stupnice poskytované GPS přijímačem uBlox LEA-6T. Stabilita byla porovnávána vůči PPS signálu stupnice UTC(TP). Oproti měření popsaném v kapitole 5.1 byl kladen důraz na využití korekcí [33] PPS signálu poskytovaných přímo GPS přijímačem.

5.3.1. Zapojení měřicího systému

Na obrázku 5.18 je znázorněno zapojení měřicího systému. Signály 10 MHz UFE a PPS UFE sloužily jako referenční (stejně jako při měření popsaném v kapitole 5.2).



Obrázek 5.18: Zapojení měřicího systému

5.3.2. Měřená data

Byla měřena odchylka PPS signálu GPS přijímače a referenčního PPS stupnice UTC(TP). Data byla zaznamenávána do PC.

GPS přijímač posílal dvě zprávy:

- Zpráva TimePulse, obsahující korekce výstupního PPS pulsu,
- Zpráva TimeMark, obsahující časovou značku signálu přiváděného na vstup

Tabulka 5.7 obsahuje ukázkou naměřených dat. Šedě označený sloupec obsahuje informace o korekci generovaného PPS signálu.

Time of week [ms]	Submillisecond part of time [$2^{32} \cdot \text{ms}$]	Quantization error of timepulse [ps]	Timepulse week number according to time base
122380000	0	-9173	1686
122381000	0	-9593	1686
122382000	0	8917	1686
122383000	0	5951	1686

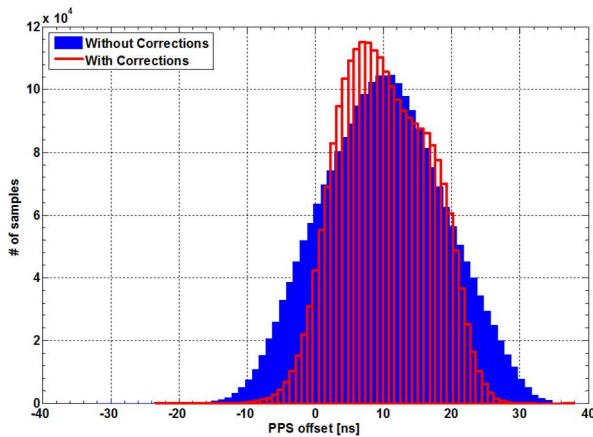
Tabulka 5.7: Ukázkou změřených dat

5.3.3. Výsledky měření

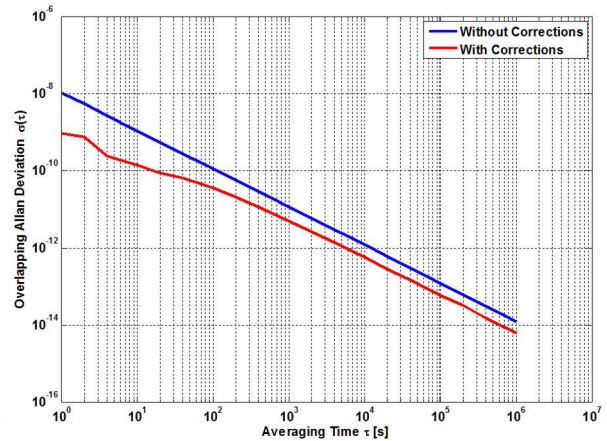
Průběhy MTIE (obrázek 5.22) a ODEV (obrázek 5.20) potvrzují očekávanou krátkodobou a dlouhodobou stabilitu GPS přijímače. Při aplikaci korekcí je vidět zlepšení krátkodobé stability (viz obrázky 5.19 až 5.22), ale v celkových parametrech uvedených v tabulce 5.8 se použití korekcí výrazně neprojevilo.

	Bez korekce	S korekcí
Počet vzorků	2 410 318	2 410 318
Střední hodnota	9,98 ns	10,09 ns
STD	8,81 ns	6,43 ns
Max - Střední hodnota	42,28 ns	33,57 ns
Střední hodnota - Min	29,52 ns	27,82 ns

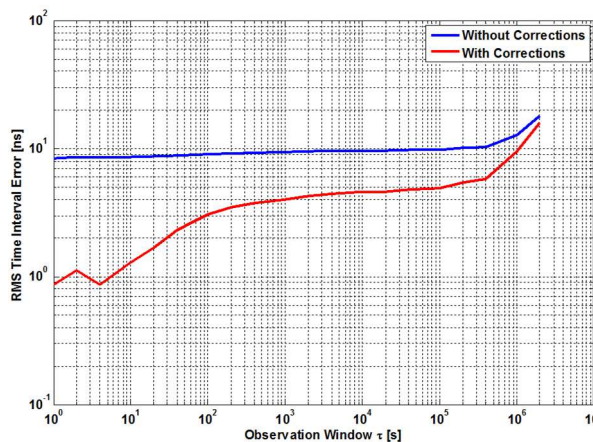
Tabulka 5.8: Změřené výsledky



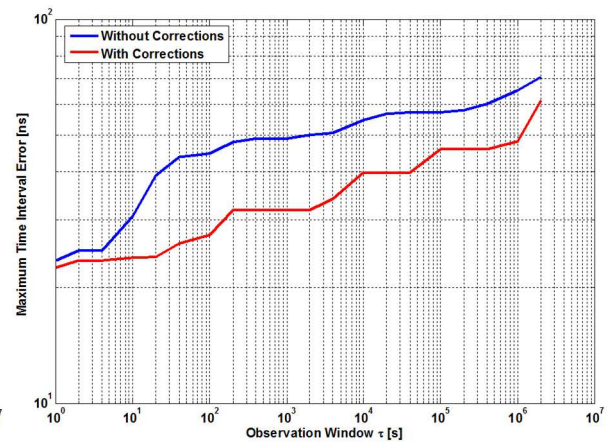
Obrázek 5.19: Histogram



Obrázek 5.20: ODEV



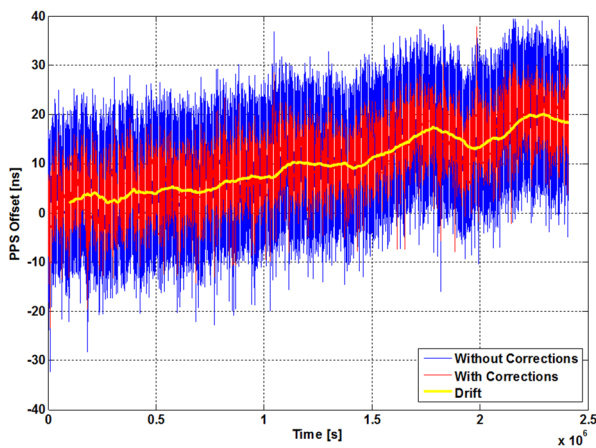
Obrázek 5.21: TIE RMS



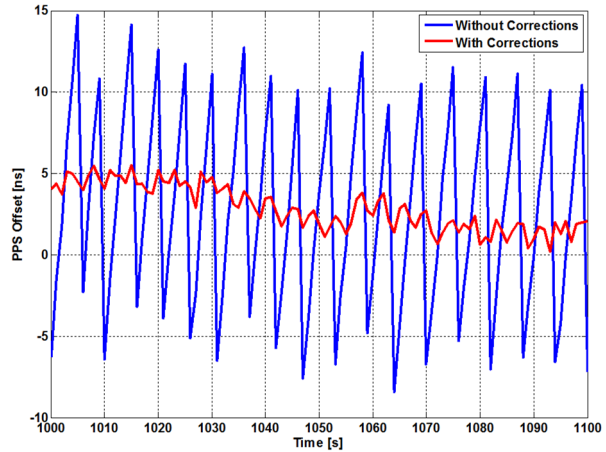
Obrázek 5.22: MTIE

5.3.4. Aplikace korekční hodnoty

Na obrázcích 5.23 a 5.24 a je zobrazen průběh měřené odchylky s aplikovanou korekcí a bez korekce. Jak je patrné z těchto obrázků je vhodné tuto korekční hodnotu využít pro měření dlouhodobé i krátkodobé stability.



Obrázek 5.23: Průběh měřených dat

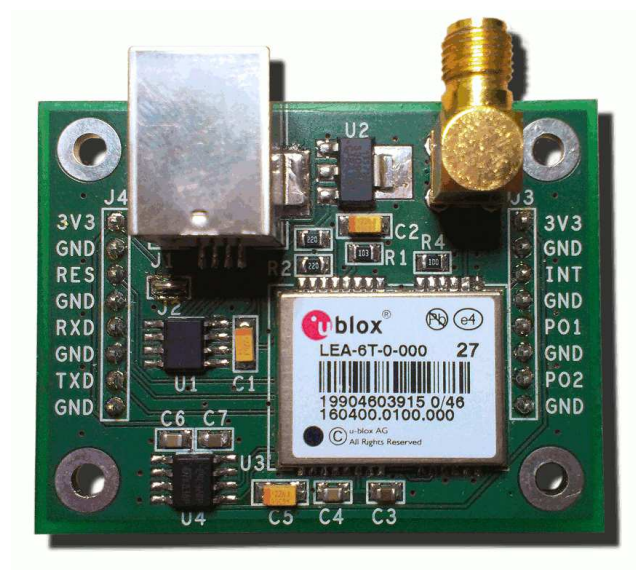


Obrázek 5.24: Detail průběhu

5.3.5. Výsledky

Hodnoty MTIE a Allanova odchylka potvrzují očekávané krátkodobé a dlouhodobé stability GPS přijímače. Při aplikaci korekcí se průběh evidentně zlepšil a jejich použití je vhodné pro další měření.

Na obrázku 5.25 je fotografie použitého modulu. Nosný plošný spoj [34] byl navržen a vyroben pro účely testování a případné integrace do průmyslového systému.



Obrázek 5.25: Foto měřeného modulu GPS přijímače LEA-6T

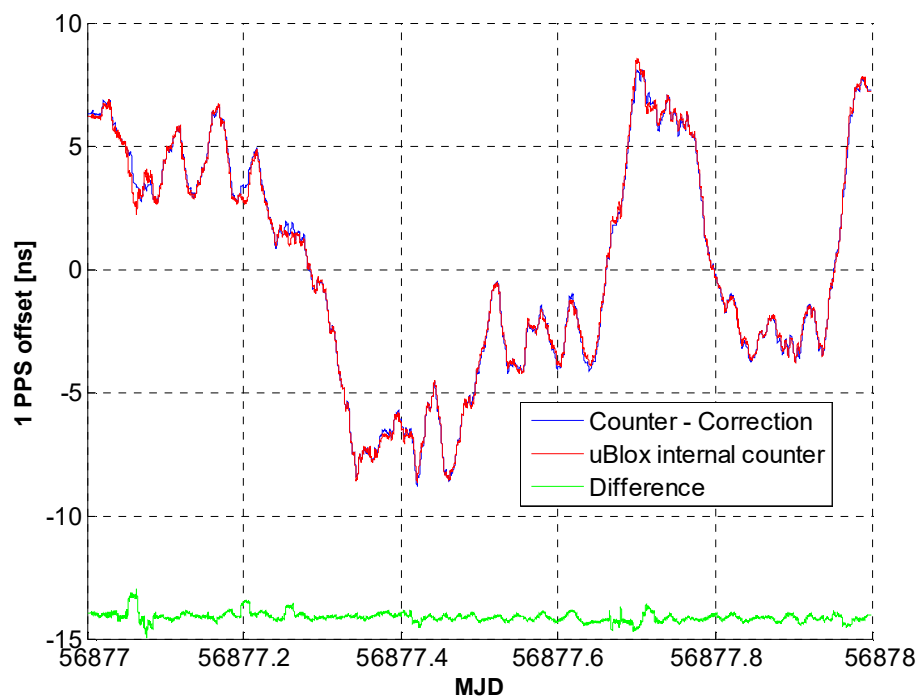
5.4. Využití interního čítače LEA-6T

GPS přijímač LEA-6T umožňuje záznam časových událostí pomocí externího vstupu. Doposud byl pro testování používán externí čítač. Pro praktické nasazení je ale toto zapojení nevýhodné, a to zejména z důvodu ceny čítače.

Pro další postup bylo nutné ověřit schopnost GPS přijímače zaznamenávat časovou značku vstupního signálu interním čítačem přijímače a otestovat přesnost tohoto měření. Bylo tedy provedeno celodenní srovnávací měření referenční časové stupnice s využitím interního čítače přijímače.

Jako referenční časová stupnice byl zvolen rubidiový normál popsáný v kapitole 5.2. Nicméně pro toto konkrétní měření nebyla důležitá stabilita této časové stupnice, jelikož šlo pouze o ověření funkčnosti interního čítače GPS modulu.

Na obrázku 5.26 je záznam z celodenního měření odchylky PPS signálu GPS přijímače od PPS rubidiového normálu. Modrý průběh znázorňuje odchylku odečtenou z externího čítače s aplikovanou korekcí viz kapitola 5.3. Červený průběh reprezentuje hodnotu odchylky měřené pomocí interního čítače. Zeleně je pak znázorněn jejich rozdíl. Střední hodnota tohoto rozdílu je posunuta o 14 ns pro přehlednější zobrazení v grafu.

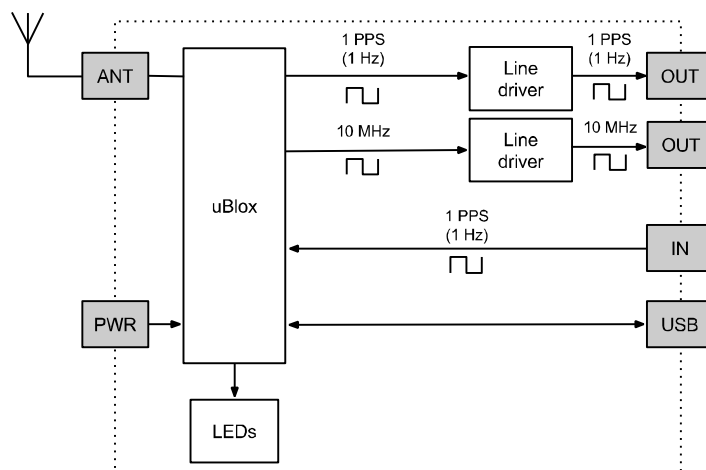


Obrázek 5.26: Porovnání měření externím a interním čítačem

Jak je z obrázku 5.26 patrné, průběhy obou měření se překrývají a rozdíl měření nepřekročí hodnotu 5 ns. Díky ověření této funkcionality je možné využít interní čítač přijímače LEA-6T pro měření odchylek lokálních časových stupnic a obejít se tak bez nákladného externího čítače.

5.5. Zařízení pro přenos času a synchronizaci

Na základě měření popsaných v kapitolách 5.1 až 5.4 bylo přistoupeno ke konstrukci zařízení pro distribuci přesného času a synchronizaci v distribuovaných systémech. Toto zařízení je založeno na testovaném levném modulu GPS přijímače LEA-6T od firmy uBlox. Na obrázku 5.27 je zobrazeno blokové schéma celého zařízení.



Obrázek 5.27: Schéma zařízení pro přenos přesného času a synchronizaci

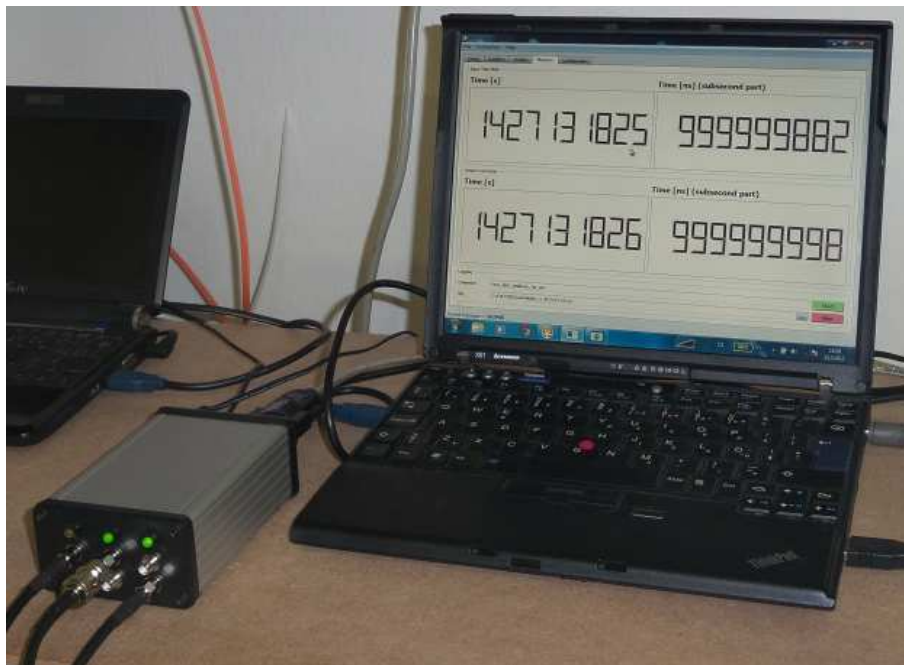
Pro posílení výstupů GPS přijímače byly přidány rychlé budiče signálu se schopností generovat hranu výstupního TTL signálu s dobou náběhu menší než 1 ns. Dále byl přidán obvod pro úpravu napájení a LED s tvarovačem signálu pro signalizaci výstupního a vstupního signálu PPS.

Hlavním účelem tohoto zařízení bylo docílit synchronizace prvků distribuovaných systémů s přesností lepší než 1 μ s. Tato přesnost je pro většinu průmyslových systémů dostačující. Dalším požadavkem byla minimalizace ceny a jednoduchost implementace do existujícího systému. Ověření řešení je popsáno v kapitole 5.7.

Výsledné vlastnosti zařízení:

- Možnost komunikace pomocí RS232
- Možnost komunikace pomocí USB (Virtual Serial Port)
- Konfigurace a čtení dat s využitím aplikace (viz kapitola 7.1)
- Ukládání konfigurace do externí paměti (EEPROM)
- Podpora antén s integrovaným zesilovačem (aktivní anténa)
- Možnost nastavení frekvence a zpoždění výstupních pulzů
- Digitální vstup pro záznam časové události
- Možnost Survey-In režimu (přesná detekce polohy)
- Automatické korekce časové stupnice pro vstupní signály (korekce jsou nutné z důvodu granularity interní časové stupnice)

Pro konfiguraci a sběr dat ze zařízení byl vytvořen ovládací software popsáný v kapitole 7.1. Na obrázku 5.28 je fotografie zařízení pro distribuci přesného času a synchronizaci, spolu se spuštěnou měřicí aplikací. Takováto sestava byla ve čtyřech exemplářích rozmístěna do čtyř metrologických laboratoří v ČR. Více informací je v kapitole 5.7.



Obrázek 5.28: Fotografie zařízení pro distribuci přesného času a synchronizaci

Výsledný etalon času a frekvence umožňuje kontinuální dlouhodobé měření odchylky lokální časové stupnice zařízení od stupnice GPS Time, a to autonomně pomocí interního čítače GPS přijímače.

5.5.1. Dosažitelná přesnost

Měření stability časové stupnice je možné provádět pomocí PPS vstupu zařízení. Relativní frekvenční odchylka měřené časové stupnice δf je dána vztahem:

$$\delta f = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{t_2 - t_1} \quad (5.1)$$

Kde Δt_1 a Δt_2 jsou hodnoty časových intervalů naměřené zařízením v časech t_1 a t_2 .

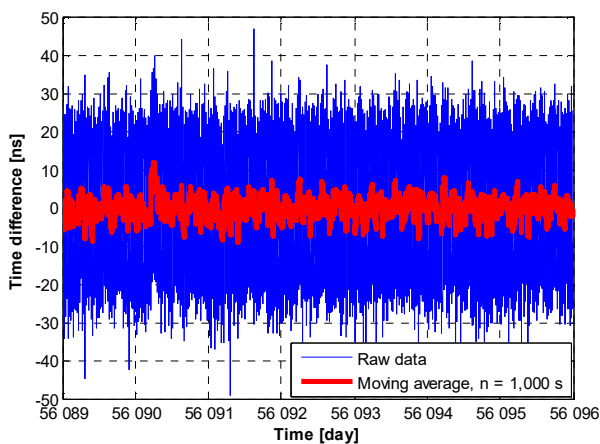
Při použití průměrování je možné dosáhnout nejistoty měření relativní frekvenční odchylky δf až $1 \cdot 10^{-13}$ pro měřicí interval jeden den. Pro intervaly měření kratší než jeden den a delší, než jedna hodina je nejistota vyšší, ale v případě dostatečného signálu GPS nepřekročí hodnotu $1 \cdot 10^{-11}$

Měřené výsledky jsou ukládány do textových souborů specifikovaných v panelu na obrázku 5.28. Další zpracování je možné pomocí vhodných programů jako Excel, MATLAB, NI DIAdem, aj. nebo pomocí pomocných programů vytvořených v průběhu řešení této práce viz příloha 12.4.

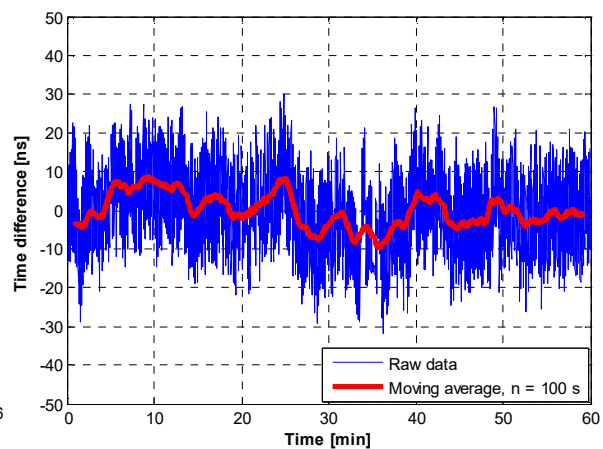
5.6. Porovnání dvou GPS přijímačů

Dva shodné GPS přijímače byly umístěny na stejném místě, každý s vlastní anténou. Tato konfigurace by se dala předpokládat u distribuovaného systému s body ve stejné lokalitě (do vzdálenosti 1 km). Vzhledem ke vzdálenosti GPS satelitů od antén přijímačů lze pak považovat prostředí, kterým prochází GPS signál za identické. V průběhu jednoho týdne byla nepřetržitě měřena odchylka PPS signálů od obou přijímačů.

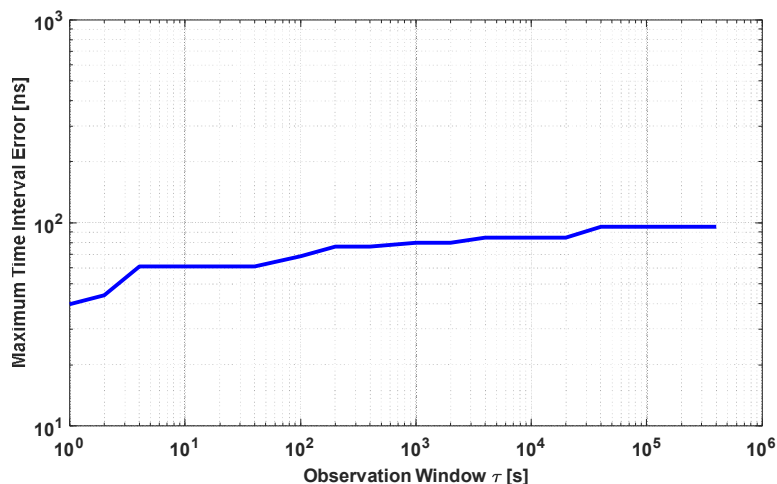
Průběh této odchylky je na obrázku 5.29. Detail z jednoho dne měření je na obrázku 5.30. Jak se dalo předpokládat dlouhodobý drift odchylky je nulový, jelikož oba přijímače reprezentují stupnici GPS Time. Díky shodné pozici antén je možné předpokládat, že odchylka je způsobena čistě zpracováním signálu GPS jednotlivými přijímači a jejich schopností synchronizovat interní stupnici. Na obrázku 5.31 je MTIE měřené odchylky.



Obrázek 5.29: Průběh záznamu časové odchylky



Obrázek 5.30: Detail průběhu časové odchylky



Obrázek 5.31: MTIE časové odchylky

Ze změřených dat vyplývá, že dva GPS přijímače LEA-6T umístěné ve stejné lokalitě jsou schopny reprezentovat GPS stupnici s chybou do 100 ns.

5.7. Dlouhodobé srovnání s high-end GNSS přijímačem

V rámci dalšího řešení byl proveden návrh a realizace funkčních vzorků rozšířené verze etalonu času a frekvence na bázi přijímače uBlox LEA-6T. Dále byla provedena úprava a rozšíření dvou stávajících měřicích pracovišť v LSEČF ÚFE AV ČR a v laboratoři FEL ČVUT a realizace dvou nových měřicích pracovišť v laboratoři sdružení CESNET a na Geodetické observatoři Pecný. Byla provedena série dlouhodobých měření GPS přijímačů umístěných ve zmíněných lokalitách a návrh programového vybavení pro měření a vyhodnocení výsledků.

Zařízení popsané v kapitole 5.5 bylo ověřeno ve spolupráci s pracovníky LSEČF, CESNET a Geodetické observatoře Pecný. Byla navržena základní metodika použití realizovaných etalonů v kalibračních laboratořích (včetně odhadu nejistot měření (viz kapitola 7.2) a vytvořeno programové vybavení pro vyhodnocení výsledků měření v těchto laboratořích (viz kapitola 7).

5.7.1. Laboratoř Státního etalonu času a frekvence ÚFE AV ČR

LSEČF zajišťuje provoz Státního etalonu času a frekvence, tj. vytváří fyzickou aproximaci jednotky času, sekundy, a realizuje národní časovou stupnici UTC(TP), která se podílí na vytváření světového koordinovaného času UTC ve spolupráci s Mezinárodním úřadem pro váhy a míry (BIPM). Laboratoř zajišťuje metrologickou návaznost na Státní etalon a poskytuje služby (kalibrace, expertní činnost) na nejvyšší metrologické úrovni v ČR pro potřeby průmyslu a dalších subjektů, např. kalibračních laboratoří.

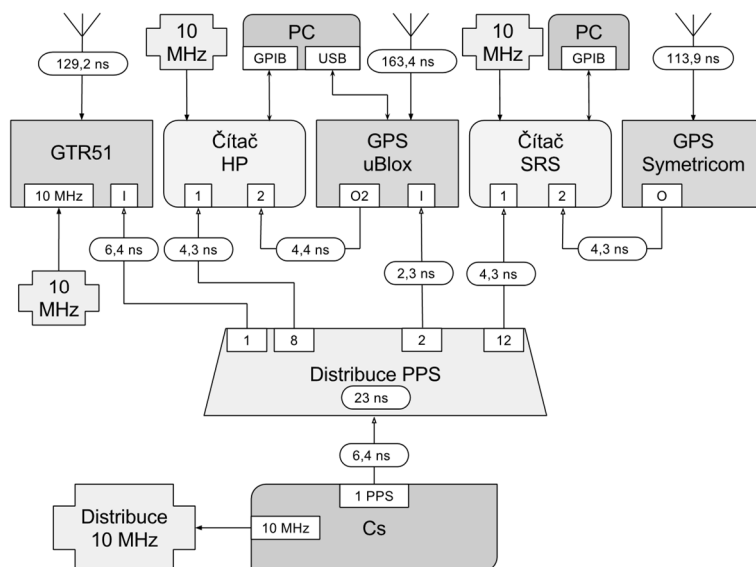
5.7.2. Průběh testů

Zařízení pro přenos času a synchronizaci popsané v kapitole 5.5 bylo nutné otestovat v rámci dlouhodobého měření oproti referenčnímu GNSS přijímači. Referenční měření proběhlo pomocí metody Common View s využitím přijímačů GTR 51 a GTR 50. Výpočet nejistoty měření je popsán v kapitole 7.2.

Paralelně s referenčním měřením probíhalo měření s použitím testovaného zařízení. V podkapitolách 5.7.3 až 5.7.5 jsou uvedeny výsledky srovnání lokálních časových stupnic dané laboratoře se stupnicí UTC(TP). Dále je pak vyhodnocen rozdíl hodnot měřených testovaným zařízením oproti referenčnímu měření GTR přijímačem. Na tuto diferenci pak byly aplikovány metriky popsané v kapitole 5.

5.7.3. Laboratoř přesného času a frekvence na ČVUT FEL

V průběhu roku 2015 byla zásadním způsobem vylepšena infrastruktura Laboratoře přesného času a frekvence na FEL ČVUT. Koncem dubna 2015 byla laboratoř vybavena cesiovým normálem HP5071A, který generuje referenční lokální časovou stupnici FEL_Time. Stupnice je porovnávána se stupnicí UTC(TP) generovanou Státním etalonem času a frekvence ČR, resp. s dalšími stupnicemi, především se stupnicí UTC(PTB). Porovnávání se realizuje pomocí přijímače GTR 51 metodou Common View. Zapojení přístrojů v této laboratoři je zobrazeno na obrázku 5.32.



Obrázek 5.32: Zapojení měřících přístrojů v laboratoři přesného času a frekvence na ČVUT FEL

Laboratoř je určena pro měření dlouhodobé stability přesných oscilátorů a časových základů měřících přístrojů typu čítač, digitizér, osciloskop a další.

Zařízení založené na přijímači LEA-6T umožňuje měření následujících parametrů:

- relativní frekvenční odchylky
- dlouhodobé frekvenční stability signálu přesných oscilátorů pro interval měření větší než 1000 s

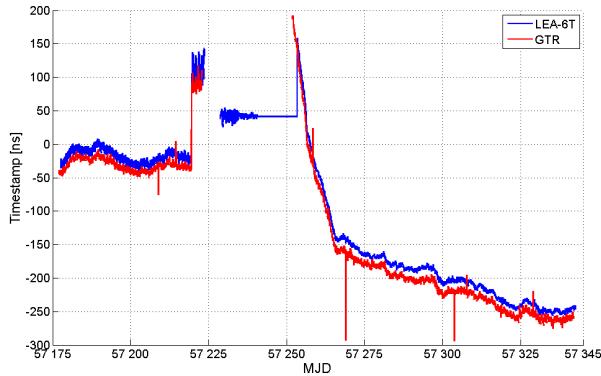
Stanovení relativní odchylky frekvence oscilátoru se provádí metodou porovnávání časových stupnic. Sinusový signál z měřeného oscilátoru s nominální frekvencí f (zpravidla 5 MHz nebo 10 MHz) se pomocí děliče frekvence převede na obdélkový signál s frekvencí 1 Hz, který se porovnává s výstupním signálem 1 PPS z etalonu pomocí čítače nebo je přímo měřen vnitřním čítačem etalonu. Relativní frekvenční odchylka δf je dána vztahem:

$$\delta f = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{t_2 - t_1} \quad (5.2)$$

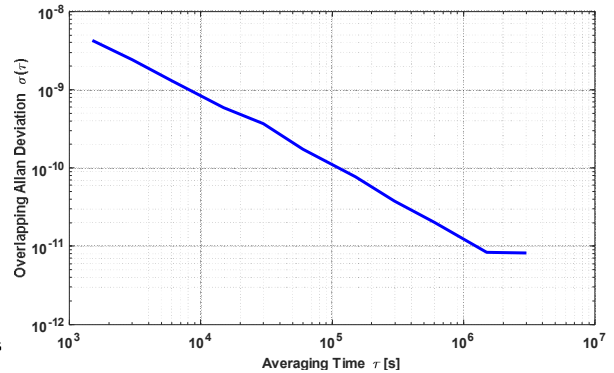
Kde Δt_1 a Δt_2 jsou hodnoty časových intervalů naměřené čítačem v časech t_1 a t_2 .

Na obrázku 5.37 je zobrazen průběh odchylky stupnice FEL_Time oproti stupnici UTC(TP). Červeně je zobrazen výsledek porovnání pomocí přijímačů GTR a modře výsledek porovnání pomocí zařízení založeném na přijímači LEA-6T. Měření muselo být přerušeno v důsledku rozsáhlé rekonstrukce na FEL po dobu 4 týdnů (20.7. - 17.8.2015).

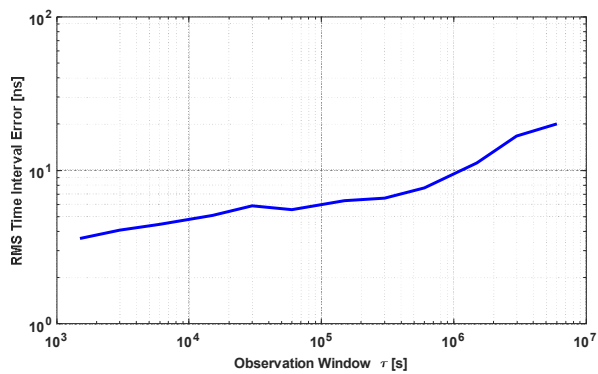
Na obrázcích 5.34 až 5.36 je vyhodnocen rozdíl výsledků poskytovaných zařízeními založeným na přijímači LEA-6T a výsledků porovnání stupnic, metodou Common View.



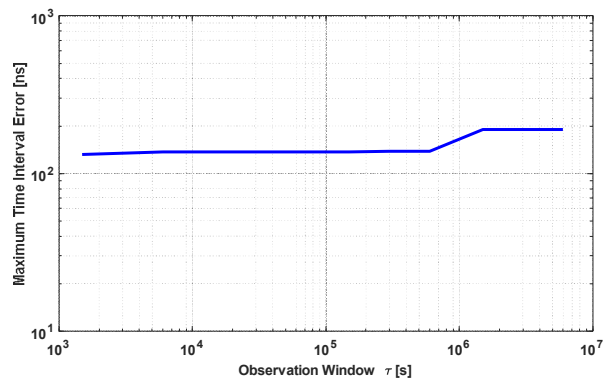
Obrázek 5.33: FEL_Time, průběh odchylky v čase



Obrázek 5.34: FEL_Time, ODEV



Obrázek 5.35: FEL_Time, TIE RMS



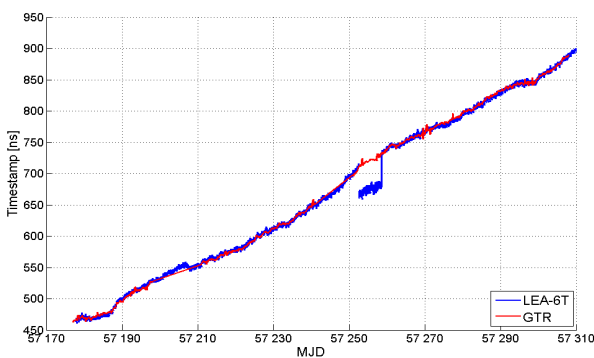
Obrázek 5.36: FEL_Time, MTIE

5.7.4. Geodetická observatoř Pecný

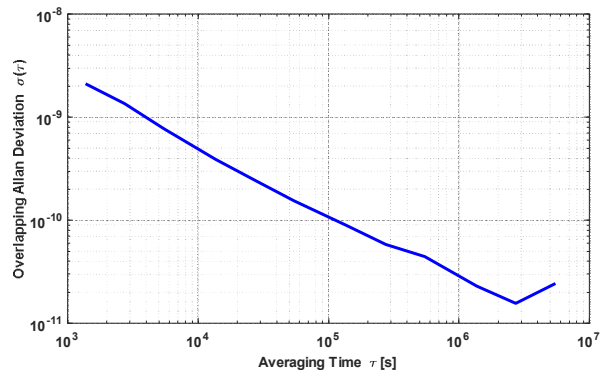
Geodetická observatoř Pecný je výzkumné pracoviště Výzkumného ústavu geodetického, topografického a kartografického, v.v.i. určené pro experimentální geodetický výzkum. Je umístěna přibližně 40 km jihovýchodně od Prahy blízko obce Ondřejov v sousedství velkého areálu Astronomického ústavu Akademie věd České republiky. Observatoř je geodetickou referenční stanicí České republiky včetně výškového a gravimetrického referenčního bodu. Má laboratoř a termokomoru pro zkoušky gravimetrů a geodetických přístrojů a základnu pro kalibraci GNSS techniky, kde je umístěn cesiový normál definující stupnici UTC(GOP). Na observatoři se provádí zejména permanentní GPS observace a sledování změn vertikální složky tíhového zrychlení. V okolí observatoře je geodetické a fotogrammetrické zkušební bodové pole a testovací základna pro GPS.

Na obrázku 5.37 je zobrazen průběh odchylky stupnice UTC(GOP) oproti stupnici UTC(TP). Červeně je zobrazen výsledek porovnání pomocí přijímačů GTR a modře výsledek porovnání pomocí zařízení založeném na přijímači LEA-6T. Na modrém průběhu je patrný výpadek (cca 57 255 MJD), kdy došlo k resetu zařízení, ale neprovedla se správná kalibrace polohy, jak je popsáno v kapitole 7.1.

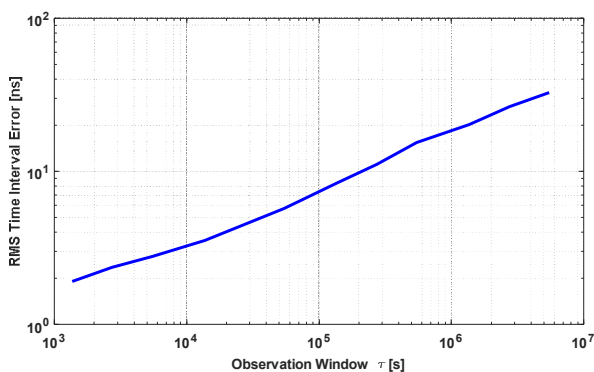
Na obrázcích 5.38 až 5.40 je vyhodnocen rozdíl výsledků poskytovaných zařízeními založeným na přijímači LEA-6T a výsledků porovnání stupnic, metodou Common View.



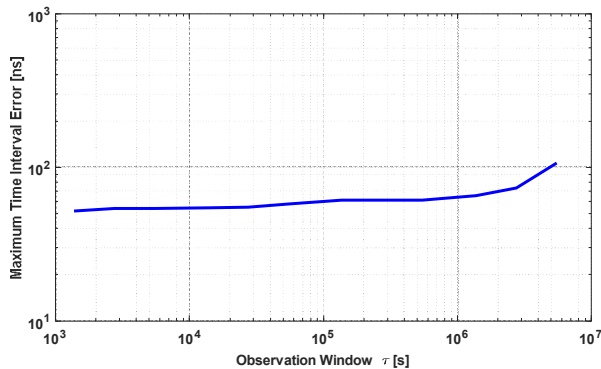
Obrázek 5.37: GOP, průběh odchylky v čase



Obrázek 5.38: GOP, ODEV



Obrázek 5.39: GOP, TIE RMS

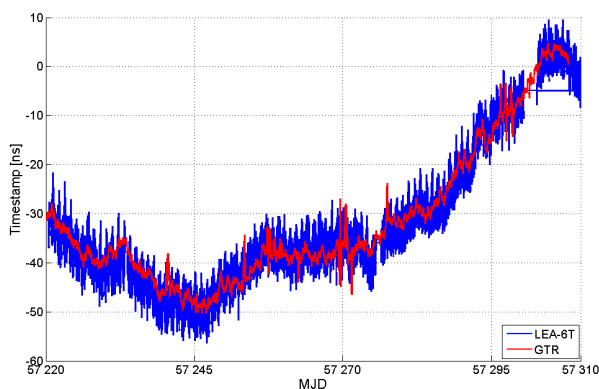


Obrázek 5.40: GOP, MTIE

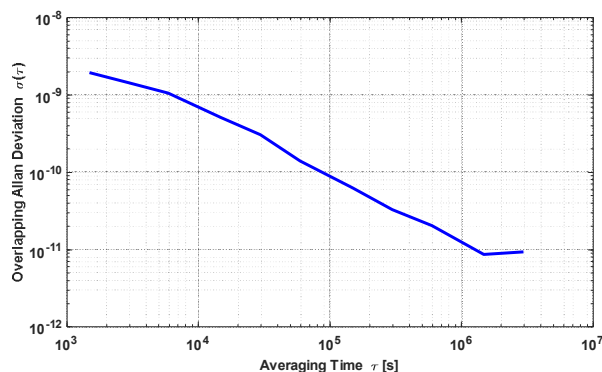
5.7.5. Laboratoř sdružení CESNET

Třetí laboratoř, kde bylo prováděno srovnání, je laboratoř sdružení CESNET. Na obrázku 5.41 je zobrazen průběh odchylky stupnice CESNET_Time oproti stupnici UTC(TP). Červeně je zobrazen výsledek porovnání pomocí přijímačů GTR a modře výsledek porovnání pomocí zařízení založeném na přijímači LEA-6T.

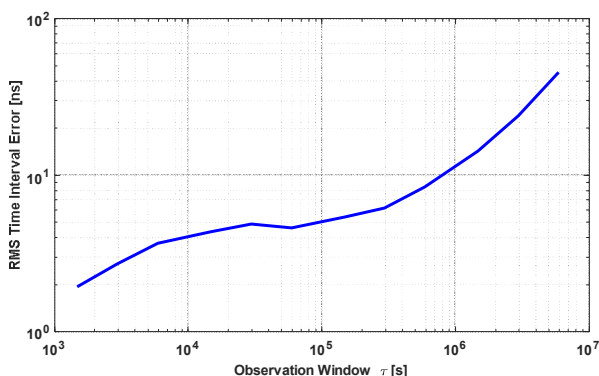
Na obrázcích 5.42 až 5.44 je vyhodnocen rozdíl výsledků poskytovaných zařízení založeným na přijímači LEA-6T a výsledků porovnání stupnic, metodou Common View.



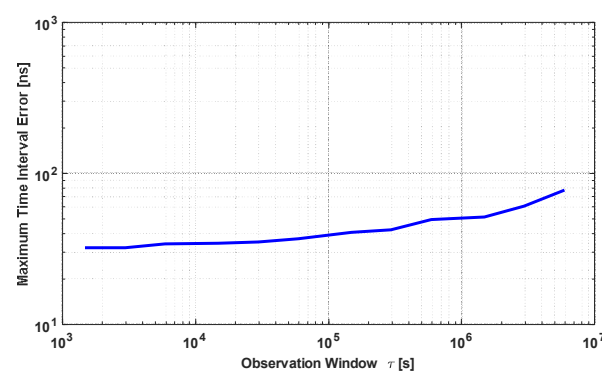
Obrázek 5.41: CESNET, průběh odchylky v čase



Obrázek 5.42: CESNET, ODEV



Obrázek 5.43: CESNET, TIE RMS



Obrázek 5.44: CESNET, MTIE

5.7.6. Výsledky

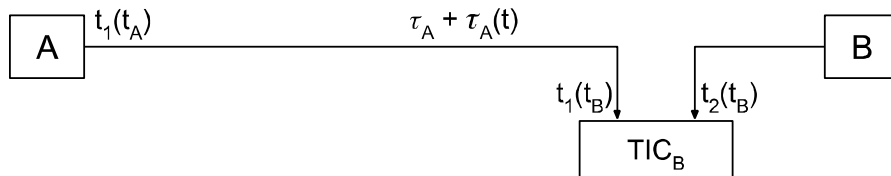
Z dlouhodobých měření uvedených v této kapitole je patrné, že navržené zařízení splňuje požadovanou přesnost měření 1 μ s. Ve většině případů byla maximální chyba porovnání dvou stupnic menší než 100 ns. Případné překročení této hodnoty bylo většinou způsobeno výpadkem nebo zásadním zhoršením kvality GPS signálu přijímaného GPS přijímačem.

Jelikož se jednalo o dlouhodobé měření, docházelo k občasným výpadkům měření, a to jak na straně námi vytvořeného zařízení, tak i na straně metrologického přijímače. Z tohoto důvodu byly navrženy metody popsané v kapitole 7.2, které se zabývají omezením těchto výpadků.

5.8. Ověření přenosu času po optickém vlákně

Cesiové hodiny typu 5071A provozované na FEL ČVUT realizují časovou stupnici FEL Time. Pro vyhodnocení parametrů této stupnice je potřebné průběžné porovnávání s národní aproximací časové stupnice UTC, tedy UTC(TP), která je vytvářena v LSEČF ÚFE AV ČR. Toto porovnání je možné dělat pomocí zařízení GTR 50/51. Vzhledem k tomu, že lze sestavit přímé optické propojení mezi FEL ČVUT a LSEČF ÚFE AV ČR, je možné pro porovnávání časových stupnic FEL Time a UTC(TP) využít vzájemný přenos obou časových stupnic po optickém vlákně [35].

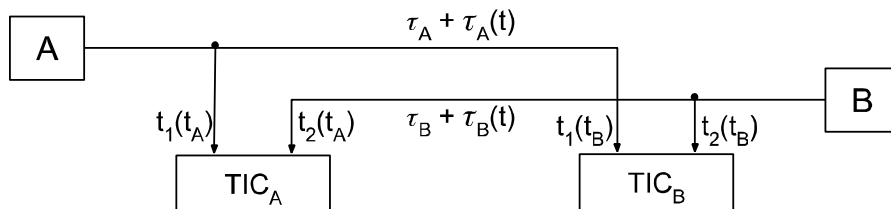
Základní principy přenosu času a frekvence jsou popsány v řadě dostupných kvalitních publikací např. [36]. Jednosměrný přenos (obrázek 5.45) neumožňuje z principu dosáhnout vysoké přesnosti časové stupnice na cílové straně optické linky vzhledem k proměnnému časovému zpoždění linky $\tau_A(t)$ v důsledku působení vnějších vlivů (především teploty).



Obrázek 5.45: Princip jednocestné metody přenosu času.

5.8.1. Použitá metoda měření

Vysoce přesné systémy pro porovnání časových stupnic využívají metodu obousměrného přenosu (v ideálním případě se symetrickým transportním zpožděním v obou směrech). Princip je zřejmý z obrázku 5.46. Dva adaptéry jsou spojeny jednou obousměrnou optickou linkou (nebo dvojicí jednosměrných linek). Každý adaptér má přiveden na vstup signál PPS z lokální stupnice. Veličiny $t_1(t_A)$ a $t_2(t_B)$ reprezentují časové okamžiky, kdy jsou zakódované signály PPS ze stupnice v místech A a B vyslány do optické linky. Veličiny $t_2(t_A)$ a $t_1(t_B)$ reprezentují časové okamžiky, kdy jsou přijaty a dekodovány signály PPS ze vzdálených adaptérů.



Obrázek 5.46: Princip dvoucestné metody přenosu času.

Čítače TIC_A a TIC_B (*Time Interval Counter A, B*) měří časové intervaly mezi signály PPS z lokálních a vzdálených hodin v místech A a B:

$$TIC_A = t_1(t_A) - t_2(t_A) = t_1(t_A) - (t_2(t_B) + \tau_B + \tau_B(t)) \quad (5.3)$$

$$TIC_B = t_2(t_B) - t_1(t_B) = t_2(t_B) - (t_1(t_A) + \tau_A + \tau_A(t)) \quad (5.4)$$

kde

- τ_A resp. τ_B je časové zpoždění optické linky ve směru A \rightarrow B resp. B \rightarrow A
- $\tau_A(t)$ resp. $\tau_B(t)$ okamžité fluktuace zpoždění optické linky ve směru A \rightarrow B resp. B \rightarrow A

Odečtením (5.3) a (5.4) dostáváme časový rozdíl (diference) mezi hodinami v místech A a B:

$$t_1(t_A) - t_2(t_B) = \frac{TIC_A - TIC_B - (\tau_A - \tau_B) - (\tau_A(t) - \tau_B(t))}{2} \quad (5.5)$$

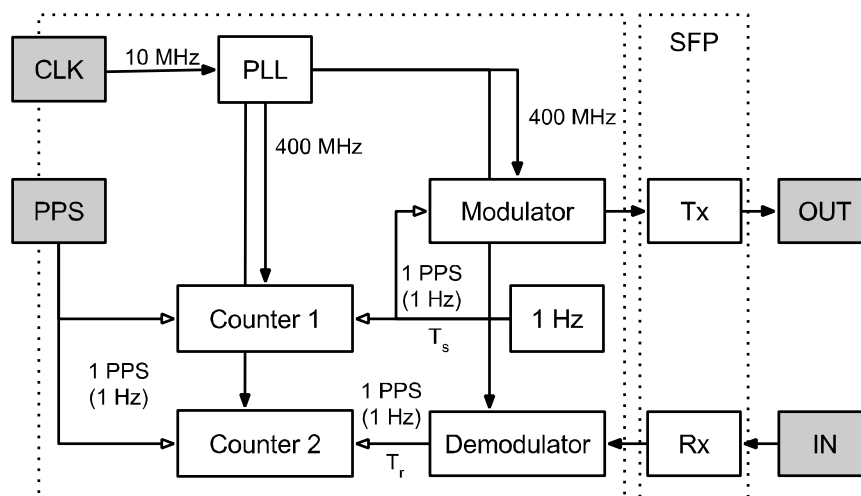
V případě ideální symetrické linky je zpoždění v obou směrech stejné a rovnice (5.5) se zjednoduší:

$$t_1(t_A) - t_2(t_B) = \frac{TIC_A - TIC_B}{2} \quad (5.6)$$

V reálné optické trase se přenáší signál buď jednosměrně na téže vlnové délce v páru vláken, nebo obousměrně v jediném vláknu, ovšem na různých vlnových délkách. V prvním případě bude existovat nesymetrie fyzické délky vláken, ve druhém případě se bude mírně lišit rychlost šíření optického signálu, neboť ta je dána koeficientem chromatické disperze $D(\lambda)$, který závisí na vlnové délce. V obou případech tedy bude existovat nesymetrie zpoždění, se kterou musíme počítat v souladu s rovnicí vztah (5.5).

5.8.2. Implementace

Struktura adaptéru (označeného jako MATRIX) je znázorněna na obrázku 5.47. Adaptér je tvořen dvěma hlavními komponentami: čipem FPGA typu Virtex-5 a optickým transceiverem SFP. Optický signál z linky je přiváděn do přijímače SFP, kde je konvertován na elektrický signál. Demodulátor v FPGA obnoví nosnou frekvenci a demoduluje signál PPS, který je jako T_r přiveden na vstup čítače, měřícího hodnotu x . Vysílací část generuje nosnou frekvenci 400 MHz, kdy oscilátor je buď volně běžící, nebo je zavěšen na signál 10 MHz z lokální stupnice. Výstup modulátoru T_s je přiveden na vstup druhého čítače, měřícího veličinu ϵ .



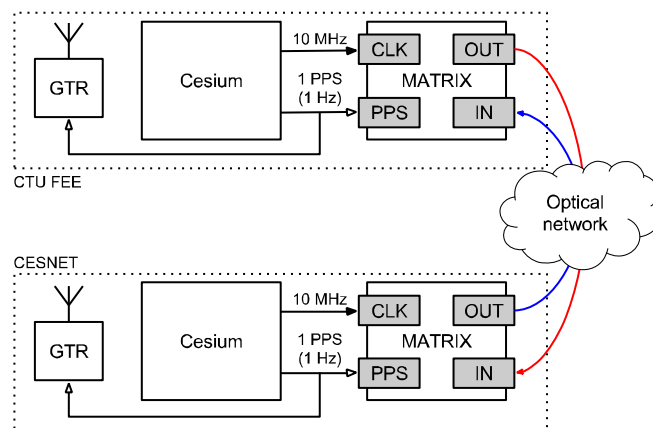
Obrázek 5.47. Struktura adaptéru MATRIX

Oba čítače jsou vytvořeny ve struktuře FPGA. Mají rozlišení přibližně 17 ps a nejistotu měření časového intervalu 50 ps. V případě požadavku na vyšší přesnost lze použít externí čítače.

5.8.3. Konkrétní technické řešení optického přenosu v areálu ČVUT v Praze – Dejvicích

Časový transfer v areálu ČVUT je realizován výše popsanou dvoucestnou metodou po optické trase FEL / CESNET (obrázek 5.48). Pro přenos je použita dvojice vícevidových (MM *multimode*) optických vláken vyčleněných pouze pro komunikaci mezi adaptéry v laboratořích FEL ČVUT a CESNET.

Vlastnosti časového transferu jsou průběžně vyhodnocovány na základě výsledků dlouhodobých měření časové diference lokálních časových stupnic odvozených z cesiových hodin HP/Agilent typu 5071A v laboratořích FEL ČVUT a CESNET vzdálených několik set metrů.



Obrázek 5.48: Schéma porovnání lokálních časových stupnic v laboratořích CESNET a FEL ČVUT

Obě laboratoře jsou vybaveny referenčními GPS přijímači Dicom GTR-50/51, které umožňují alternativní porovnání časových stupnic metodou společných pozorování (*Common View*) s využitím satelitního systému GPS.

5.8.4. Návrh programového vybavení

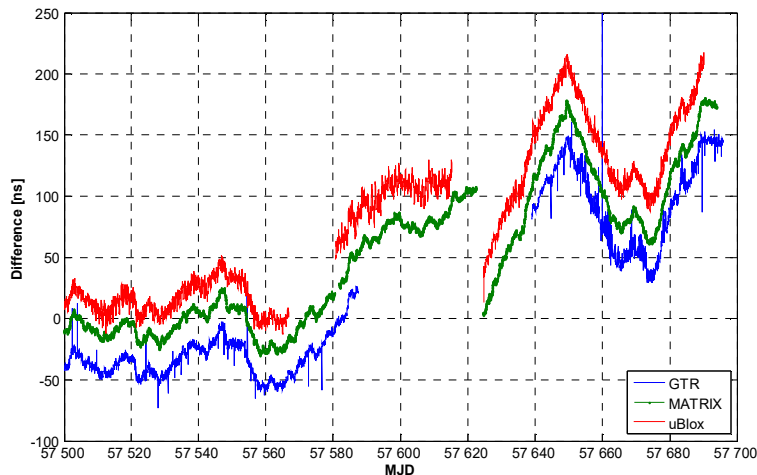
V průběhu řešení projektu byly realizovány programy v prostředí MATLAB potřebné pro vyhodnocení dlouhodobých měření časových diferencí lokálních hodin (FEL, CESNET). Programy jsou k dispozici na pracovišti řešitele (katedra měření FEL ČVUT).

5.8.5. Návrh řízené zpožďovací linky

Návrh zpožďovací linky s elektricky nastavitelným zpožděním ke kompenzaci proměnného zpoždění signálu přesného času je popsán v příloze. Tento obvod bude perspektivně použit v systému přenosu času v případě větších vzdáleností optických tras.

5.8.6. Výsledky dlouhodobých měření

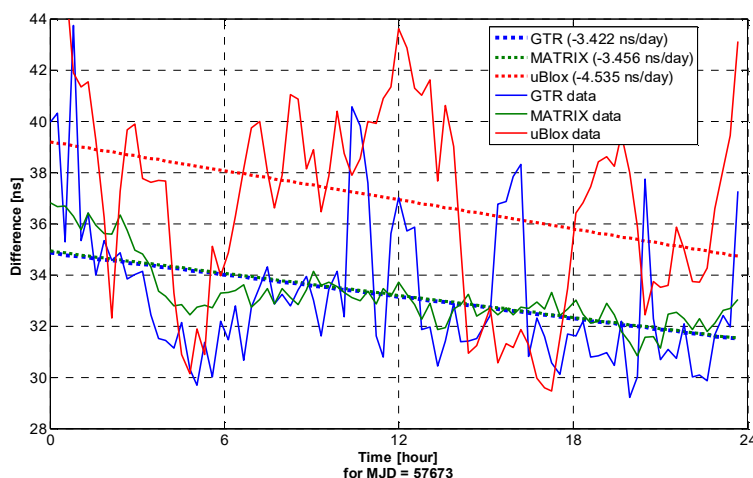
Dlouhodobá kontinuální měření (podle schématu na obrázku 5.48) probíhala od 22. dubna 2016. Výsledkem měření za období více než šesti měsíců (od 22. 4. 2016 do 8. 11. 2016) je zobrazen na obrázku 5.49.



Obrázek 5.49: Časová odchylka stupnice FEL_Time vůči CESNET_Time měřená a) metodou GPS common view (modrý průběh); b) metodou dvoucestného přenosu po optickém vlákně (zelený průběh); c) pomocí přijímačů uBlox LEA-6T (červený průběh);

Dne 22.8.2016 (MJD 57622) došlo k výpadku napájení cesiových hodin. Generování stupnice bylo plně obnoveno 24.8.2016.

Absence „modrého průběhu“ na obrázku 5.49, který reprezentuje časovou diferenci stupnic FEL a CESNET, v období od konce srpna do začátku září 2016 byla pravděpodobně způsobena chybou ve firmware přijímače Javad (součást systému GTR-51). Po tuto dobu byl optický přenos času kontrolován pouze pomocí přijímačů uBlox (na grafu znázorněno červenou barvou). Na obrázku 5.50 je detail měření. Čárkovanou čarou jsou znázorněny směrnice denních průběhů odchylky pro jednotlivá měření.



Obrázek 5.50: Detail odchylky stupnice FEL_Time vůči CESNET_Time.

5.9. Zhodnocení výsledků

Bylo provedeno srovnání běžně dostupných levných GPS přijímačů, popsané v kapitole 5.1. Toto měření bylo provedeno v laboratoři Státního etalonu času a frekvence (LSEČF) ÚFE AV ČR. Na základě těchto měření byl zvolen přijímač LEA-6T jako základ pro další práci.

Přijímač LEA-6T byl spolu s rubidiovým časovým normálem FS725 využit pro konstrukci časové stupnice synchronizované na stupnici GPS. Tato stupnice byla porovnána se stupnicí UTC(TP), jak je popsáno v kapitole 5.2. Toto měření ukázalo, že takto konstruovanou časovou stupnici je možné použít pro průmyslové systémy. Díky kombinaci dlouhodobě stabilního GPS přijímače a krátkodobě stabilního rubidiového normálu je výsledný systém přesný a je schopen překlenout krátkodobé výpadky GPS signálu. Nicméně vzhledem k ceně rubidiového normálu bylo rozhodnuto pro hledání dalšího řešení s přijatelnější celkovou cenou.

Jedním z důvodů, proč byl zvolen přijímač LEA-6T byla jeho schopnost poskytovat korekční informace o odchylce výstupního PPS signálu oproti GPS stupnici. Toto je z důvodu omezeného rozlišení interní stupnice tohoto GPS přijímače (viz kapitola 5.1.1). Využití této korekční hodnoty pro generování stupnice je popsáno v kapitole 5.3.

V rámci celého měření byly vytvořeny níže popsané body, které je třeba zvážit při vytváření průmyslového systému s GNSS přijímačem.

Kalibrace zpoždění antény

Při použití antény je třeba dbát na to, aby GNSS přijímač mohl korigovat její délku, případně je nutné její zpoždění korigovat na výstupním signálu. Zpoždění jak na zesilovači (u aktivních antén) tak i na přívodním kabelu je většinou uvedeno v technickém listu antény. Na kalibraci je třeba dbát i u dalších prvků jako je další přívodní vodič či anténní rozbočovač.

Ztráta signálu a kvalita generované časové stupnice

Je třeba rozhodnout, jak se má systém chovat při ztrátě signálu GNSS satelitů. Většina GNSS přijímačů v takovém případě dál generuje PPS signál, a to i přesto, že je značně degradována jeho přesnost. To je způsobeno tím, že je v tomto případě odvozován čistě od interního oscilátoru, který je u levných přijímačů založen na VCXO či TCXO (viz. kapitola 2.3).

Pevná pozice

Nejlepším stavem pro provozování GNSS synchronizace je zafixování antény na jedno místo. Konkrétní polohu je nutné předat GNSS přijímači, případně si ji může zjistit pomocí Survey módu.

Kvalita PPS signálu

PPS signál používaný pro další synchronizaci je nutné korektně rozvést ze zdroje do cíle. K tomuto účelu je nutné dodržovat impedanční přizpůsobení a správné zakončení linky. Pro rozvod do vícero cílů je zapotřebí použít distribuční prvky. Důležitá je kontrola strmosti hrany PPS signálu, nejlépe pomocí rychlého osciloskopu s dostatečnou šířkou pásma.

Zpoždění na distribučních prvcích

Při použití distribučních prvků je třeba dbát na zpoždění, které vytvářejí. Tato hodnota nemusí být shodná pro všechny porty distribuce.

Kompenzace kabelových přívodů

Kabelový spoj, ať už metalický nebo optický, vytváří zpoždění, které je nutno kompenzovat.

Denní cykly

Na všech měřeních s GPS přijímačem jsou patrné fluktuace s periodou jednoho dne (viz kapitola 5.2.8). To je způsobeno zejména změnou atmosférických podmínek v průběhu dne. Specializované přijímače jsou schopné tyto fluktuace částečně eliminovat využitím složitějšího ionosférického modelu. Pro levné GNSS přijímače je vhodné omezit elevační masku tak, aby se signál ze satelitů, které jsou nízko nad horizontem, nepočítal do měření. A to z důvodu, že tyto satelity jsou změnou atmosférických podmínek ovlivněny nejvíce.

6. Měření parametrů časových základů měřicích přístrojů

Jako další cíl práce se jeví využití těchto přijímačů pro praktické aplikace. Jednou z nich je měření vlastností časových základů měřicích přístrojů [37]. Jako nejběžnější příklad se nabízí kalibrace interních oscilátorů čítačů. Kalibrace takovýchto zařízení může být nákladná. S využitím levného GNSS modulu je možné tuto cenu snížit a navíc není nutné čítač přenášet z pracoviště do kalibrační laboratoře [38].

Dále se může jednat o měření časových základů například u osciloskopů či digitizérů. U těchto přístrojů se odchylka nominální frekvence interního oscilátoru projeví jako odchylka vzorkovací frekvence, což může mít vliv na přesnost měření.

Rozbor metod pro měření parametrů časových základů reálných digitalizátorů s vysokým rozlišením, návrh automatizovaného systému pro tato měření včetně vývoje programového vybavení a realizace měřicího systému pro měření extrémně nízkého fázového šumu (menšího než -150 dBc/Hz pro frekvenční offset v rozsahu jednotek Hz až desítek kHz) generátorů sinusového signálu s kmitočtem v řádu jednotek až desítek MHz byly dílčími výstupy úkolu PRM 2013 č. VIII/1/13 řešeného na katedře měření FEL ČVUT v Praze. Úkol navazoval na předchozí výzkumné projekty zaměřené na dynamické testování analogově-číslicových převodníků a digitalizátorů.

Kvalitní digitalizátor musí být vybaven nejen dobrým analogově-číslicovým (A/Č) převodníkem, ale i kvalitně navrženými dalšími obvody měřicího řetězce, které mohou ovlivnit proces digitalizace (vzorkování a kvantování) analogového signálu. Významnou úlohu má časová základna, která zásadně ovlivňuje kvalitu vzorkování. Určení základních parametrů časové základny reálného digitalizátoru jako je relativní frekvenční odchylka, frekvenční stabilita a fázový šum vychází ze standardních metod měření signálu sinusových oscilátorů. Nutnou podmínkou je, aby byl signál z časové základny vyveden na externí výstup konkrétního přístroje.

V případě většiny osciloskopů a levnějších digitalizátorů v podobě USB modulů, PCI zásuvných karet nebo PXI modulů není výstup tohoto signálu k dispozici. Proto není možné změřit jeho frekvenci, stabilitu frekvence nebo fázi přímou metodou pomocí čítače a frekvenčního etalonu. Jediným možným řešením je navzorkovat referenční signál (např. signál z frekvenčního etalonu, jehož přesnost a frekvenční stabilita jsou známé a výrazně lepší než parametry signálu měřené časové základny) standardním způsobem, tedy připojit tento referenční signál do analogového vstupu, provést jeho digitalizaci a z naměřených vzorků pomocí metod číslicového zpracování signálu vyhodnotit požadované parametry.

Vzorkovací metody měření frekvence jsou teoreticky velmi dobře zpracované. Jejich praktické nasazení však vyžaduje určité zkušenosti případně ověření měřením v konkrétních podmínkách.

6.1. Metody detekce průchodů nulou

Signál časové základny je možné považovat za stacionární (resp. kvazistacionární) s konstantní frekvencí (alespoň po dobu vzorkování). Pak lze pro stanovení okamžité frekvence použít některou z metod zpracování signálu v časové nebo frekvenční oblasti.

6.1.1. Metoda průchodů sinusového signálu nulovou úrovní ZCR (Zero Crossing).

Jedná se o základní metodu určení frekvence (resp. periody) v časové oblasti. Časový interval mezi dvěma průchody signálu se stejným sklonem (shodným znaménkem derivace signálu) nulovou úrovní určuje dobu periody měřeného signálu. Nejistota měření okamžité frekvence touto metodou závisí na zkreslení signálu, rušivých složkách a poměru vzorkovací frekvence digitalizátoru a frekvence signálu.

V praxi se vyskytuje v modifikovaných verzích (viz [39], [40] a [41]):

- Metoda průchodů nulou s předběžnou filtrací ZCRF (*Zero-Crossing with Filtration*) využívá předběžnou číslicovou filtraci dolní propustí typu FIR nebo IIR, která potlačuje zkreslení a šum reálného sinusového signálu.
- Metoda průchodů nulou zpřesněných pomocí regresních přímek (obecně křivek) v okolí průchodů ZCRR (*Zero-Crossing with Regression*) potlačuje zkreslení reálného sinusového signálu v okolí nuly v důsledku aditivního šumu nebo vyšších harmonických složek spektra.
- Metoda průchodů nulou s integrací IZC (*Integrated Zero-Crossing*), u které je signál před výpočtem metodou ZCR nejprve integrován a zbaven střední hodnoty.

6.1.2. Metoda nejlépe proložené sinusovky.

Používá se při dynamickém testování AČ převodníků a digitalizátorů pomocí sinusového signálu. Naměřené vzorky jsou proloženy ideální sinusovkou podle kritéria „nejmenších čtverců“ (suma kvadrátů odchylek měřeného a rekonstruovaného signálu je minimální). Detailní informace jsou obsaženy ve standardu IEEE 1057-2007 [42] a v příspěvku [43].

6.1.3. Metoda spektrální analýzy

Základní metodou měření frekvence ve frekvenční oblasti je výpočet frekvenčního spektra vzorkovaného periodického signálu pomocí diskrétní Fourierovy transformace (DFT), v praxi pomocí některého z algoritmů rychlé Fourierovy transformace (FFT). Frekvence signálu odpovídá frekvenci základní harmonické složky signálu. Metoda se také používá se při dynamickém testování A/Č převodníků a digitalizátorů sinusovým signálem. Bližší informace jsou obsaženy ve standardu [42], odst. 4.5 *Discrete Fourier transform (DFT)*.

6.2. Algoritmy pro stanovení frekvence časových základů digitalizátorů

Z metod zmíněných v kapitole 6.1 se dále zaměříme pouze na metody zpracování v časové oblasti. Konkrétně použité algoritmy jsou blíže určeny v dalším textu. Programy s uvedenými algoritmy byly vytvořeny v jazycích C a MATLAB.

6.2.1. Metoda nejlépe proložené sinusovky

Byly použity dva algoritmy výpočtu:

První algoritmus je popsán ve standardu IEEE 1057-2007. (viz [44], kapitola 4.6 Sinewave testing and fitting a Annex A.2 Algorithm for four-parameter least squares fit to sinewave data using matrix operations). Algoritmus je naprogramován v jazyce C.

Druhý algoritmus je realizován v prostředí MATLAB pomocí funkce `nlinfit()`. Použití této funkce ukazuje následující příklad:

```
function [Parameters] = sine_fit(t, x, InitialParameters)
% 4-parameter sine fit with initial parameters option

% Syntax:
% [Parameters] = sine_fit(x, y, [InitialParameters])

% struct Parameters = InitialParameters = [Offset, Ampl, Phase,
Freq]
% Evaluate arguments
InitialParameters = NaN(1,4);
InitialParameters(1) = median(x);
InitialParameters(2) = mean(minmax(x));
InitialParameters(3) = 0;
[tmp, pos]=findpeaks(smooth(x,10));
InitialParameters(4)=1/max(diff(t(pos)));

eval('f = @(InitialParameters,timeval) InitialParameters(1) +
InitialParameters(2) * sin( InitialParameters(3) +
2*pi* InitialParameters(4)*timeval );')

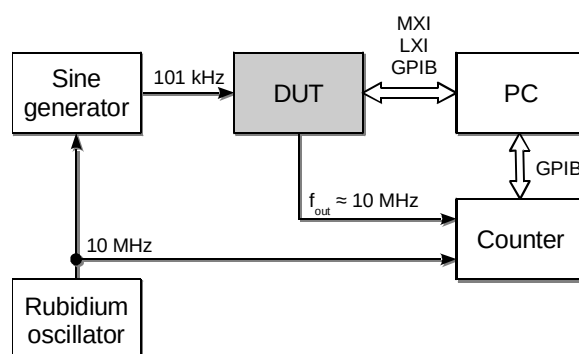
[Parameters] = nlinfit(t,x,f,InitialParameters);
End
```

6.2.2. Metoda průchodů signálu nulovou úrovní

Konkrétně byly vybrány algoritmy ZCRR (*Zero Crossing with Regression*) a ZCRF s filtrací signálu pomocí klouzavého průměru délky $d/4$ (kde d je počet vzorků na periodu signálu). Oba algoritmy byly naprogramovány jako skripty v prostředí MATLAB.

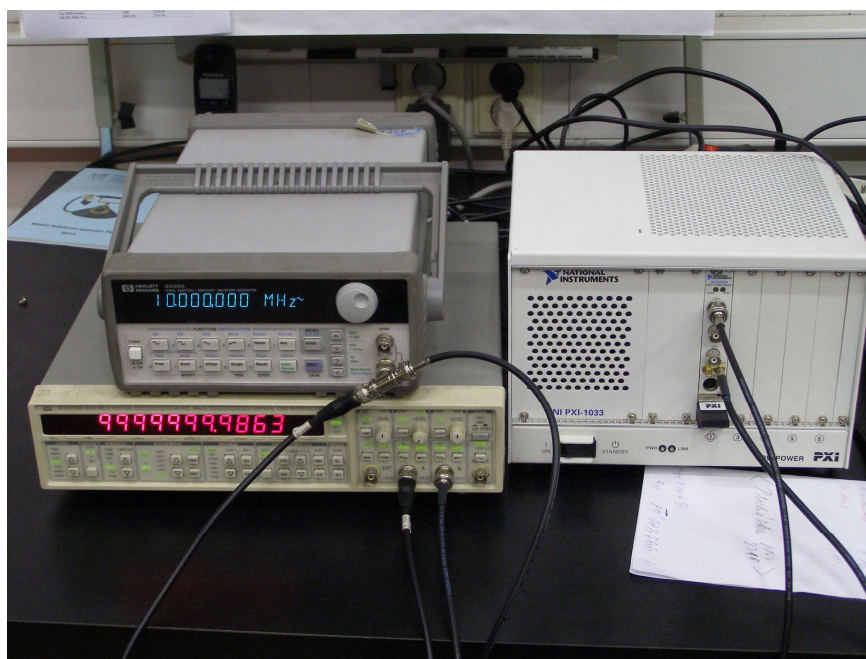
6.3. Měřicí systém

Blokové schéma systému pro měření parametrů časových základen digitalizátorů je zobrazeno na obrázku 6.1. Základem systému je vysoce stabilní a přesný rubidiový (Rb) frekvenční normál FS725 (výrobce Stanford Research Systems) synchronizovaný s pomocí GPS přijímače s dlouhodobou frekvenční stabilitou řádově $1 \cdot 10^{-12}$. Nominální výstupní frekvence Rb generátoru 10 MHz je vhodná pro synchronizaci dalších přístrojů, ale k testování digitalizátorů se zpravidla nehodí. Potřebné nižší frekvence vhodné pro testování jsou generovány prostřednictvím sinusového generátoru HP33120 fázově synchronizovaného s Rb generátorem.



Obrázek 6.1: Zapojení pro měření časových základen digitalizátorů

Systém umožňuje i přímé měření frekvence časové základny digitalizátoru v případě, že je testovaný digitalizátor vybaven výstupem signálu z interního oscilátoru (tedy oscilátoru časové základny) na externí konektor. Přímá měření se mohou využívat k verifikaci použitých číslicových metod. Pro tato měření je používán čítač SR620 (výrobce Stanford Research Systems).



Obrázek 6.2: Měření frekvence časové základny digitalizátoru

Programové vybavení pro řízení vlastního měření a přenos dat do počítače k dalšímu zpracování bylo navrženo na FEL ČVUT. V současné době jsou k dispozici programy pro měření PXI digitalizátorů National Instruments (např. typy PXI 5122 a PXI 5922) a LXI digitalizátorů Agilent (typ L4534A), připravuje se SW pro osciloskop TELEDYNE/LECROY HDO 6104.

Naměřená data byla zpracována pomocí výše uvedených algoritmů naprogramovaných v jazyce C (vývojové prostředí LabWindows/CVI) a pomocí funkcí a skriptů v prostředí MATLAB.

6.4. Zhodnocení výsledků

Ověřovací měření byla provedena na PXI digitalizátoru National Instruments typ PXI-5122 (rozlišení 14 bitů), LXI digitalizátoru Agilent L4534A (rozlišení 16 bitů) a osciloskopu TELEDYNE/LECROY typ HDO6104 (rozlišení 12 bitů). Ve všech případech bylo možné měřit frekvenci časových základů i na externích výstupech. Tyto hodnoty byly použity k porovnání s výsledky měření pomocí vzorkovacích metod popsanych v kapitole 6.1

U modulu PXI-5122 byla přímým měřením [45] určena hodnota relativní frekvenční odchylky -15,1 ppm, u digitalizátoru L4534A hodnota -2,0 ppm a u osciloskopu HDO6104 pouze -0,06 ppm. Nejistota měření byla nižší než 0,001 ppm.

Další testování jednotlivých metod a algoritmů proto probíhalo na osciloskopu HDO6104 jako digitalizátoru s nejkvalitnější časovou základnou. Testovací signál byl volen v rozsahu frekvencí přibližně 1 až 101 kHz, rychlost vzorkování nastavena na 10 MSa/s, celkový počet vzorků 1 MSa.

Nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití metody nejlépe proložené sinusovky (oba popsané algoritmy jsou v tomto případě přibližně rovnocenné), kde chyba určení relativní frekvenční odchylky byla přibližně 0,01 ppm. O málo horší výsledky dává algoritmus ZCR s filtrací klouzavým průměrem, chyba byla přibližně 0,03 ppm. Téměř o řád horší je ZCR (bez filtrace), kde chyba dosahuje až 0,17 ppm.

Na základě provedených měření lze konstatovat [46], že vzorkovací metody je možné použít pro určení frekvence časových základů digitalizátorů, které nemají vyveden signál časové základny na externí výstup. Jako optimální se prokázala metoda nejlépe proložené sinusovky. Tato skutečnost odpovídá doporučením ve standardu [42]. Tabulka 6.1 reprezentuje výsledky včetně parametrů všech měření popsanych v této kapitole.

Tabulka 6.1: Výsledky měření časových základen digitizátorů (označeny červeně)

f_vz [Hz]	1,00E+07	n_vz [-]	1,00E+06	f_nom [Hz]	1,00E+07
-----------	----------	----------	----------	------------	----------

PXI	Generována f [Hz]	Spoctena pomoci sine_fit				Spoctena pomoci ZCR		Vystup hodin mereny citacem po ~ 2 s				
		Hodnota [Hz]	STD [ns] oproti ZCR	Pocet pouzitych period [-]	Spoctena odchylka stupnice [ppm]	Hodnota [Hz]	Spoctena odchylka [ppm]	Stredni hodnota [Hz]	Spoctena odchylka [ppm]	Max. chyba [Hz]	STD [Hz]	n [-]
	333	333,0050	0,2099	32	-15,1647	333,0051	-15,4348	9 999 849,00	-15,1002	2,5525	0,6782	3484
	1 000	1 000,0151	0,0970	99	-15,0602	1 000,0150	-15,0370	9 999 849,00	-15,1002	2,5525	0,6782	3484
	1 010	1 010,0152	0,0973	100	-15,0736	1 010,0154	-15,2206	9 999 849,00	-15,1002	2,5525	0,6782	3484
	3 333	3 333,0506	0,0487	332	-15,1846	3 333,0507	-15,2104	9 999 849,00	-15,1002	2,5525	0,6782	3484
	10 000	10 000,1510	0,0252	999	-15,1003	10 000,1511	-15,1136	9 999 849,00	-15,1002	2,5525	0,6782	3484
	10 100	10 100,1526	0,0286	1 000	-15,1096	10 100,1527	-15,1208	9 999 849,00	-15,1002	2,5525	0,6782	3484
	33 333	33 333,5057	0,0135	3 332	-15,1699	33 333,5051	-15,1535	9 999 849,00	-15,1002	2,5525	0,6782	3484
	100 000	100 001,5132	0,0071	99 999	-15,1324	100 001,5117	-15,1171	9 999 849,00	-15,1002	2,5525	0,6782	3484
	101 000	101 001,5297	0,0079	100 000	-15,1454	101 001,5293	-15,1420	9 999 849,00	-15,1002	2,5525	0,6782	3484

LXI	Generována f [Hz]	Spoctena pomoci sine_fit				Spoctena pomoci ZCR		Vystup hodin mereny citacem po ~ 2 s				
		Hodnota [Hz]	STD [ns] oproti ZCR	Pocet pouzitych period [-]	Spoctena odchylka stupnice [ppm]	Hodnota [Hz]	Spoctena odchylka [ppm]	Stredni hodnota [Hz]	Spoctena odchylka [ppm]	Max. chyba [Hz]	STD [Hz]	n [-]
	333	333,0007	0,8053	32	-2,0070	333,0015	-4,4495	9 999 979,82	-2,0181	0,5348	0,1982	5600
	1 000	1 000,0020	0,4384	99	-1,9800	1 000,0027	-2,7150	9 999 979,82	-2,0181	0,5348	0,1982	5600
	1 010	1 010,0020	0,4324	100	-2,0247	1 010,0016	-1,5721	9 999 979,82	-2,0181	0,5348	0,1982	5600
	3 333	3 333,0067	0,1995	332	-2,0089	3 333,0068	-2,0494	9 999 979,82	-2,0181	0,5348	0,1982	5600
	10 000	10 000,0202	0,1012	999	-2,0171	10 000,0190	-1,8951	9 999 979,82	-2,0181	0,5348	0,1982	5600
	10 100	10 100,0205	0,1029	1 000	-2,0256	10 100,0207	-2,0456	9 999 979,82	-2,0181	0,5348	0,1982	5600
	33 333	33 333,0673	0,0525	3 332	-2,0185	33 333,0624	-1,8728	9 999 979,82	-2,0181	0,5348	0,1982	5600
	100 000	100 000,2023	0,0276	99 999	-2,0232	100 000,1980	-1,9802	9 999 979,82	-2,0181	0,5348	0,1982	5600
	101 000	101 000,2041	0,0275	100 000	-2,0211	101 000,2069	-2,0486	9 999 979,82	-2,0181	0,5348	0,1982	5600

LeCroy	Generována f [Hz]	Spoctena pomoci sine_fit				Spoctena pomoci ZCR		Vystup hodin mereny citacem po ~ 2 s				
		Hodnota [Hz]	STD [ns] oproti ZCR	Pocet pouzitych period [-]	Spoctena odchylka stupnice [ppm]	Hodnota [Hz]	Spoctena odchylka [ppm]	Stredni hodnota [Hz]	Spoctena odchylka [ppm]	Max. chyba [Hz]	STD [Hz]	n [-]
	333	333,0001	3,8260	32	-0,3005	332,9992	2,3808	10 000 000,05	0,0049	0,3299	0,1082	2564
	1 000	999,9997	1,5571	99	0,2617	999,9957	4,2816	10 000 000,05	0,0049	0,3299	0,1082	2564
	1 010	1 010,0000	1,5594	100	-0,0430	1 010,0044	-4,3360	10 000 000,05	0,0049	0,3299	0,1082	2564
	3 333	3 333,0001	0,5195	332	-0,0337	3 333,0008	-0,2289	10 000 000,05	0,0049	0,3299	0,1082	2564
	10 000	9 999,9999	0,1956	999	0,0093	10 000,0057	-0,5722	10 000 000,05	0,0049	0,3299	0,1082	2564
	10 100	10 099,9997	0,2035	1 000	0,0313	10 100,0038	-0,3778	10 000 000,05	0,0049	0,3299	0,1082	2564
	33 333	33 333,0004	0,0750	3 332	-0,0128	33 332,9982	0,0542	10 000 000,05	0,0049	0,3299	0,1082	2564
	100 000	100 000,0013	0,0323	99 999	-0,0132	100 000,0036	-0,0363	10 000 000,05	0,0049	0,3299	0,1082	2564
	101 000	100 999,9975	0,0346	100 000	0,0245	101 000,0014	-0,0139	10 000 000,05	0,0049	0,3299	0,1082	2564

7. Metody zpracování měřených dat a kalibrace

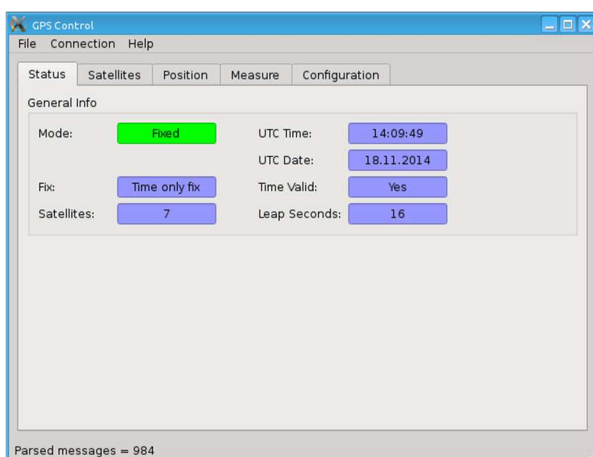
Při nepřetržitém měření v laboratořích času a frekvence se nahromadí velké množství dat. Tato data je potřeba interpretovat pro obsluhu laboratoří v reálném čase. Proto bylo nutné navrhnout metody pro automatizované zpracování takovýchto dat. V rámci provozování metody měření Common View je dále nutné zajistit výměnu dat mezi jednotlivými laboratořemi, a to co nejefektivněji. Navržené metody musí být robustní a musí umožňovat zpracování dat v různých formátech.

7.1. Sběr dat z GPS přijímačů uBlox

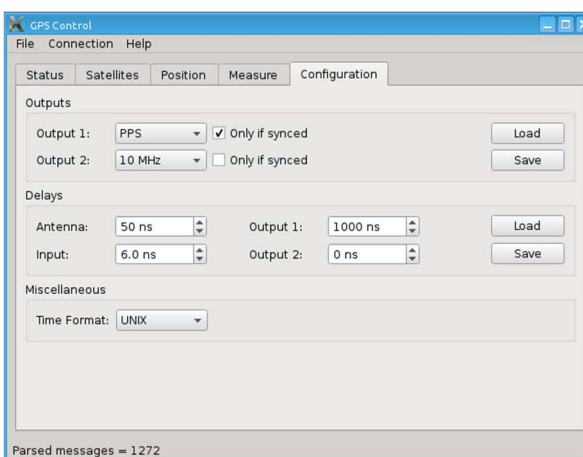
Jak popisuje kapitola 5.5 bylo vytvořeno několik identických zařízení založených na přijímači LEA-6T. Aby bylo možné tyto zařízení konfigurovat a provádět měření byl vytvořen program GPSControl. Tento program byl vytvořen ve frameworku Qt a to z několika důvodů:

- Qt podporuje jazyk C a C++, proto bylo možné použít už vytvořenou komunikační knihovnu pro komunikaci s GPS moduly. Tato knihovna je dále popsána v příloze 12.1
- Jedná se o multiplatformní framework. To je výhodné zejména pro jednoduché přeložení aplikace pro Linux.
- Ovladač sériového portu je řešen nezávisle na použitém operačním systému.
- Qt umožňuje rychlé vytvoření grafického rozhraní.

Základní aplikační okno je znázorněno na obrázku 7.1. Zobrazuje mód GPS přijímače, v tomto případě *Fixed*. To značí, že je přijímač na pevné pozici, tudíž veškeré chyby měření pozice může využít pro korekci času (viz kapitola 2.8.2). Software dále zobrazuje aktuální čas, datum a počet satelitů využitých GPS přijímačem pro měření.



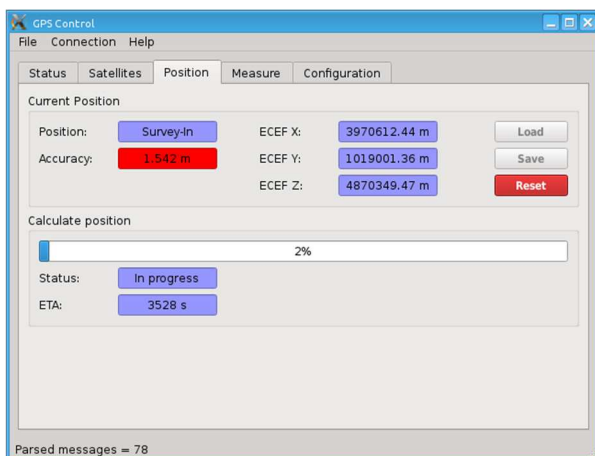
Obrázek 7.1: Hlavní okno programu



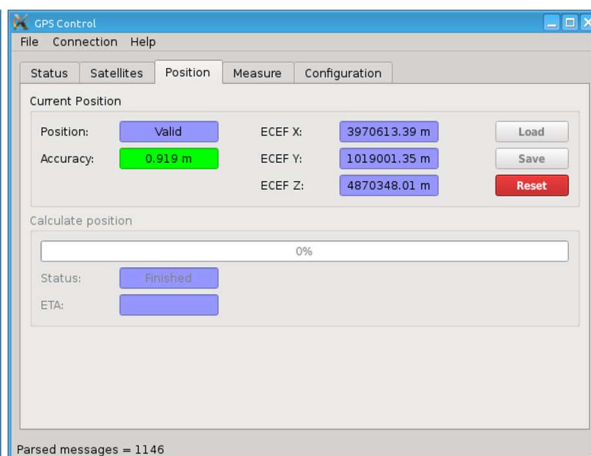
Obrázek 7.2: Konfigurace GPS přijímače

Obrázek 7.2 ukazuje konfigurační okno programu, zde je možné provést nastavení chování jednotlivých vstupů a výstupů GPS přijímače. Dále je možné nastavit zpoždění přívodních kabelů a zvolit formát ukládané časové značky.

Důležitou vlastností přijímače LEA-6T je možnost zjistit polohu antény a tím se vyhnout nutnosti tuto polohu zaměřovat. Proces, který toto zjištění provádí, se nazývá *Survey-In*. Pro jeho spuštění program obsahuje speciální okno. Je zde vidět aktuální stav GPS přijímače a také tlačítko *Reset*, které vyvolá samotné hledání polohy antény. Průběh je znázorňován uživateli, jak je patrné z obrázku 7.3. Pokud je dosaženo dostatečné přesnosti odhadu polohy a zároveň pokud proběhl dostatečný počet odměřů, je GPS přijímač přepnut do *Fixed* módu a zjištěná pozice antény je uložena do konfigurační EEPROM přijímače. Tím je dokončen proces zjišťování pozice (*Survey-In*) a v grafickém prostředí se zobrazí stav *Valid* tak jako na obrázku 7.4.

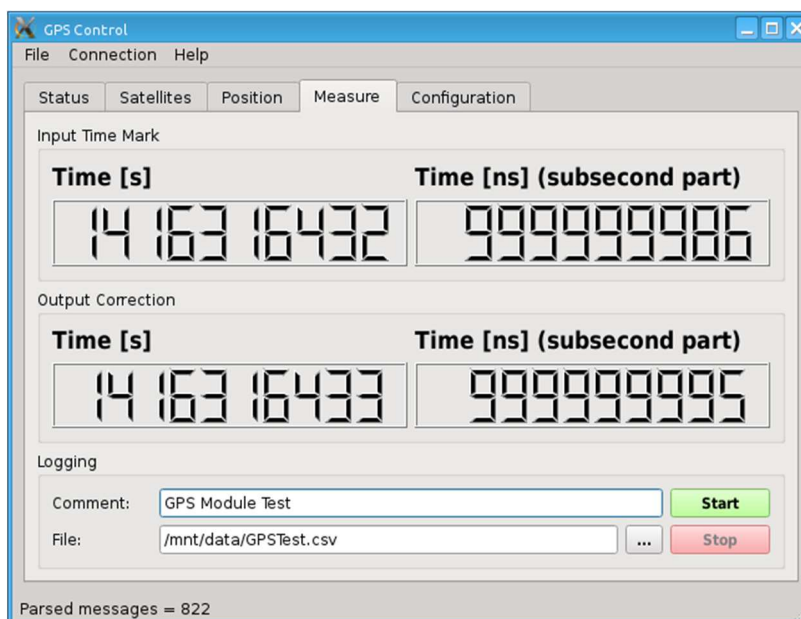


Obrázek 7.3: Probíhající Survey-In



Obrázek 7.4: Přijímač se nachází v zafixované poloze

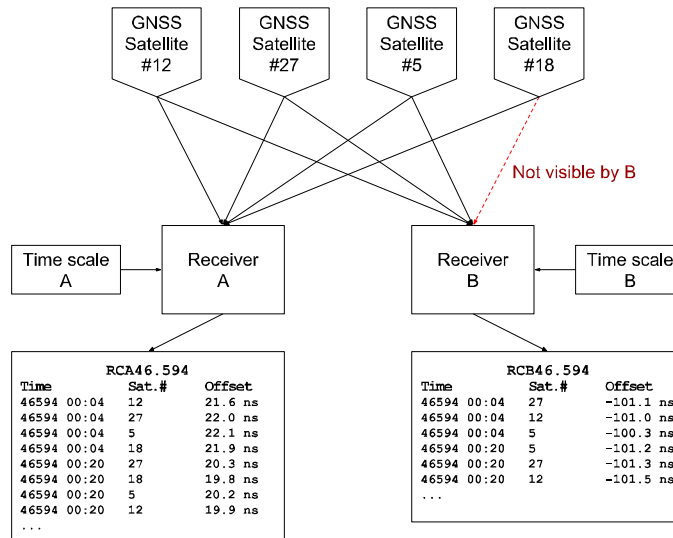
Na obrázku 7.5 je měřicí okno aplikace, změřené hodnoty jsou zobrazovány a zároveň ukládány do zvolených souborů. Čas jednotlivých událostí je zaznamenáván ve formátu UNIX Time.



Obrázek 7.5: Okno měření

7.2. Sběr a zpracování dat pro použití metody Common View

Obrázek 7.6. popisuje způsob porovnání časových stupnic *A* a *B* pomocí metrologických přijímačů *A* a *B*. V daném čase se porovnává odchylka lokální časové stupnice se stupnicí jednotlivých satelitů pomocí metody Common View popsané v kapitole 2.8. Výhodou této metody je, že není potřeba uvažovat chybu synchronizace mezi satelity [47] a zároveň je možné do měření zahrnout více satelitních systémů najednou. Nevýhodou je, že se lze porovnávat pouze se stejnými satelity [48], tzn. v případě ilustrovaném na obrázku 7.6 nelze využít satelit č. 18.



Obrázek 7.6: Příklad uskupení pro porovnání pomocí Common View

Na obrázku 7.6 je dále naznačen záznam přijímačů do souboru. Ve skutečnosti se do CGGTTS souboru ukládají ještě další záznamy jako je typ GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, Beidou a další), frekvence a typ měření (L1C, L3P a další) více v [49]. Jako časová značka se využívá Modified Julian Date (MJD) pro určení dne a UTC pro čas [50]. Měření se provádí v 16minutových intervalech. Pro identifikaci zařízení se používá hlavička v souboru, které obsahuje informace o přijímači (název, polohu, typ).

7.2.1. Výpočet odchylky stupnic

Následující postup vychází z metodiky laboratoře Státního etalonu času a frekvence (LSEČF) ÚFE AV ČR [51]. Obě laboratoře jsou vybaveny přijímači signálů vysílaných družicemi daného GNSS. Tyto přijímače měří prostřednictvím jednotlivých družic $j = 1, 2, \dots, N$ difference mezi časem připojeného etalonu $UTC(k)$, $k = 1, 2$ a systémovým časem daného GNSS

$$x_{kj} = UTC(k) - GNSS(j) \quad (7.1)$$

Časové difference změřené ve stejném čase v obou laboratořích se odečtou a dostaneme diferenci časů obou etalonů změřenou prostřednictvím jednotlivých družic

$$x_j = x_{2j} - x_{1j} = UTC(2) - UTC(1) \quad (7.2)$$

Výsledná diference časů etalonů se pak určí jako průměr diferencí získaných měření přes jednotlivé družice $j = 1, 2, \dots, N$.

Poloha musí být známa s nejistotou ($k = 2$) lepší než 0,1 m v každé souřadnici X, Y, Z.

Pokud přesná poloha antény není známá, proběhne před samotnou kalibrací určení polohy antény, viz [52] a [53]. Přijímač se nechá nepřetržitě měřit po dobu alespoň 24 h a to tak, aby bylo měření pokryto období od UTC 00:00:00 do UTC 23:59:59 jednoho dne. Na základě tohoto měření se pro signály GPS vygenerují data RINEX V2.11 za jeden den s periodou 30 s. Na základě těchto dat se pomocí služby NRCAN PPP (www.nrcan.gc.ca) určí poloha antény vzhledem k souřadnému systému ITRF a zadá se do kalibrovaného přijímače.

Měření se zahájí a ukončí tak, aby v obou laboratořích měření pokrylo požadovaný časový úsek. Začátky a konce měření se nemusí shodovat. Změřená data se pak zpracují.

Na každém řádku jsou výsledky měření k jedné družici vztažené k jednomu času. Jedná se o výsledek lineárního vyrovnání výsledků dílčích měření provedených během seance dlouhé 13 minut. Výsledná data jsou vztažena ke středu seance, tj. 6,5 min po jejím začátku. Až na výjimky začínají seance každých 16 min. Posloupnost začátků seancí generují přijímače automaticky. Do měření jsou zpravidla zahrnuty všechny družice, které lze v daném čase na daném stanovišti spolehlivě přijímat.

Při nízké elevaci družice dochází k prudkému nárůstu troposférického zpoždění, což vede ke zhoršení účinnosti jeho korekce a nárůstu reziduální chyby. Do zpracování jsou proto zahrnuta pouze data změřená při elevaci větší než 20°.

Na výsledky měření REFSYS je v přijímačích aplikována korekce modelovým ionosférickým zpožděním MDIO. Vzhledem k tomu, že v některých GNSS není možné zaručit ani zjistit, že oba přijímače použily při výpočtu MDIO stejné parametry modelu ionosféry, je třeba zvláště při porovnání na menší vzdálenost (<500 km) tuto korekci ze změřených dat vyloučit. Pokud se korekce nevyloučí, může občas nastat až několikahodinový stav, kdy je porovnání zatíženo chybou o velikosti několika nanosekund.

Ojediněle může dojít k změření výrazně odchyleného výsledku v důsledku rušení silným odraženým signálem. Tuto situaci lze indikovat jednak na základě zvýšení směrodatné odchylky reziduí po lineárním vyrovnání DSG a jednak na základě odchylení změřené hodnoty od měření provedených prostřednictvím ostatních družic. Do zpracování jsou proto zahrnuta pouze měření s DSG menším než 5 ns a ze zpracování jsou vyřazena měření, jejichž výsledky nesplňují podmínku, že se od průměru přes všechna měření provedená v daném čase neliší více než o trojnásobek výběrové směrodatné odchylky.

Postup zpracování změřených dat

Oba soubory změřených dat se postupně projdou a vyhledají se páry řádků se shodnými hodnotami SAT, MJD, STTIME, IOE, oběma hodnotami $ELV \geq 20$ a oběma hodnotami

DSG < 5 ns. Vyhledané páry měření se uspořádají do skupin se shodným MJD a STTIME. Každá tato skupina výsledků měření se pak zpracuje následujícím způsobem:

Z MJD a STTIME se určí čas začátku seance. Vztažný čas výsledku porovnání t_i je o 6,5 min vyšší než čas začátku seance. Pro každou družici se vypočte

$$x_j = (\text{REFGPS}_j + \text{MDIO}_j) - (\text{TP REFGPS}_j + \text{TP MDIO}_j), \quad j = 1, \dots, N \quad (7.3)$$

kde N je počet družic, které byly v dané seanci použity k porovnání. Data změřená v LSEČF jsou označena TP.

Vypočte se průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \quad (7.4)$$

odchylky od průměrné hodnoty

$$\Delta x_j = x_j - \bar{x}, \quad j = 1, \dots, N \quad (7.5)$$

a směrodatná odchylka

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \Delta x_j^2} \quad (7.6)$$

Pokud pro některé měření není splněna podmínka

$$\Delta x_j \leq 3\sigma_x, \quad j = 1, \dots, N \quad (7.7)$$

měření s největší odchylkou se z dalšího zpracování vyřadí. Tento postup se opakuje, dokud všechna měření nespĺňují uvedenou podmínku, nebo počet zbývajících měření není menší než tři. Naposledy stanovená průměrná hodnota je výsledkem porovnání v daném čase t_i .

Uvedeným postupem se zpracují všechny skupiny měření. Výsledkem je časová posloupnost diferencí

$$\hat{x}_i = [\text{UTC}(k) - \text{UTC}(\text{TP})](t_i), \quad i = 1, \dots, M \quad (7.8)$$

kde M je počet seancí.

Pokud je třeba určit i průměrnou relativní frekvenční odchylku na intervalu t_m až t_n , určí se takto

$$\bar{y} = \frac{\hat{x}_n - \hat{x}_m}{t_n - t_m} \quad (7.9)$$

Nejistoty měření

Vyhodnocení nejistoty porovnání časových stupnic prostřednictvím GNSS za předpokladu, že vzdálenost mezi laboratořemi není větší než několik set kilometrů, je popsáno ve zprávě [54]. V souladu s uvedeným dokumentem byly při stanovení nejistoty porovnání postupně určeny složky nejistoty způsobené mnohacestným šířením a šumem přijímače, nejistotou kalibrace zpoždění přijímačů, antén a anténních kabelů, nejistotou určení polohy antén a ionosférickým a troposférickým zpožděním. Chyba způsobená mnohacestným šířením a šumem přijímače má při odlehlosti jednotlivých seancí 16 min charakter bílého šumu. Tato složka chyby měření je na ostatních chybách měření nezávislá. Její nejistota nezávisí na vzdálenosti mezi laboratořemi. Horní odhad této složky nejistoty při použití libovolného signálu GNSS je

$$u_1 = 0,35 \text{ ns (A)} \quad (7.10)$$

Standardní nejistota kalibrace zpoždění přijímačů kalibrovaných v LSEČF činí

$$u_2 = 0,25 \text{ ns (B)} \quad (7.11)$$

Nejistotu jednotlivých souřadnic polohy antény předpokládáme $u_p = 0,1 \text{ m}$ ($k = 2$). Nejhorší situace nastane v případě, kdy porovnání probíhá pouze prostřednictvím jedné družice.

Standardní nejistota způsobená nejistotou určení polohy, pak činí

$$u_3 = \frac{u_p \sqrt{2}}{2c} = 0,24 \text{ ns (B)} \quad (7.12)$$

kde $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ je rychlost světla. Pokud bude porovnání probíhat prostřednictvím více družic, nejistota bude lepší a bude záviset na momentálním rozmístění družic po obloze. Reziduální chyby porovnání způsobené ionosférickým a troposférickým zpožděním rostou se vzdáleností mezi laboratořemi. O nejistotě způsobené ionosférickým a troposférickým zpožděním předpokládáme, že se vzdáleností d roste lineárně. Standardní nejistotu pak stanovíme

$$u_4 = \sqrt{\sigma^2 - u_1^2} \frac{d}{d_{\max}} = 0,61 \frac{d}{d_{\max}} \text{ ns (A)} \quad (7.13)$$

kde $\sigma = 0,7 \text{ ns}$ a $d_{\max} = 370 \text{ km}$. Kombinovanou standardní nejistotu mezi laboratořemi určíme

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = \sqrt{0,25 + 0,37 \left(\frac{d}{d_{\max}} \right)^2} \text{ ns} \quad (7.14)$$

a rozšířená nejistota ($k = 2$) pak činí

$$U = 2u_c = 2 \sqrt{0,25 + 0,37 \left(\frac{d}{d_{\max}} \right)^2} \text{ ns} \quad (7.15)$$

Při vzdálenosti mezi laboratořemi $d = 0$ km je rozšířená nejistota $U = 1.0$ ns a se vzdáleností roste. Při vzdálenosti $d = 500$ km dosáhne hodnoty $U = 1.9$ ns.

Průměrná relativní frekvenční odchylka za 1 den se vypočte ze změřených diferencí časů na začátku a na konci dne x_1 a x_2

$$\bar{y} = \frac{x_2 - x_1}{86400} \quad (7.16)$$

Její standardní nejistotu určíme

$$u_y = \frac{\sqrt{2(u_1^2 + u_3^2 + u_4^2)}}{86400} = \frac{\sqrt{0,36 \cdot 10^{-18} + 0,74 \cdot 10^{-18} \left(\frac{d}{d_{\max}}\right)^2}}{86400} \quad (7.17)$$

a rozšířená nejistota ($k = 2$) činí

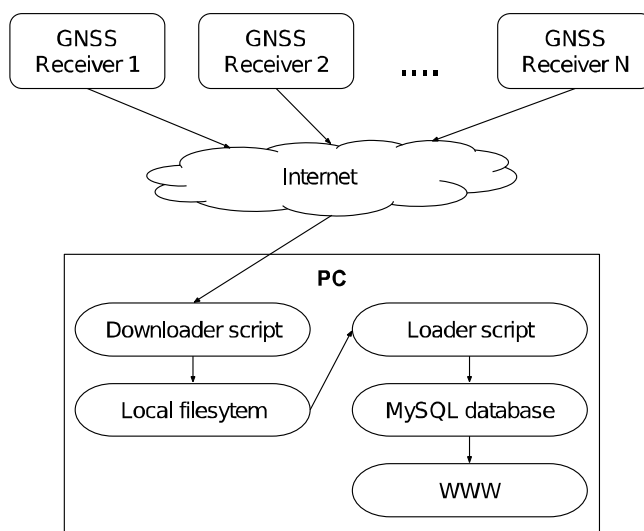
$$U_y = 2 \frac{\sqrt{0,36 \cdot 10^{-18} + 0,74 \cdot 10^{-18} \left(\frac{d}{d_{\max}}\right)^2}}{86400} \quad (7.18)$$

Při vzdálenosti mezi laboratořemi $d = 0$ km je rozšířená nejistota $U_y = 1.4 \cdot 10^{-14}$ a se vzdáleností roste. Při vzdálenosti $d = 500$ km dosáhne hodnoty $U_y = 3.0 \cdot 10^{-14}$.

7.2.2. Záznam měření

Pro uchování CGGTTS záznamů všech zařízení byla využita MySQL databáze. Data jsou zachovávána více méně v nezměněném formátu. Došlo pouze ke změně formátu časových značek. Textový formát času používaný v CGGTTS byl nahrazen UNIX Time (viz kapitola 2.5.5) formátem. Tento formát využívá jako časovou značku celé číslo a reprezentuje počet sekund od 1. 1. 1970. Použití v databázi je pak mnohem jednodušší a vzhledem k tomu, že časová značka je jeden z nejpoužívanějších záznamů pro výpočet odchylky, zkracuje celkovou dobu výpočtu.

Protože jsou měřená data ukládána lokálně v zařízeních, je obtížné k nim získat přístup. Naštěstí většina metrologických laboratoří svá data publikuje na internetu. Pro sběr těchto dat byl vytvořen skript, který data automaticky stahuje (downloader script), tento skript také umožňuje lokální nahrání dat v případě, že nejsou dostupná po internetu. Bohužel jednotlivé laboratoře nemají jednotný přístup k publikaci dat, proto se musí tento proces konfigurovat pro každou laboratoř zvlášť. Ve chvíli, kdy jsou jednotlivé balíky dat uloženy na lokálním úložišti, je spuštěn nahrávací skript, který data nahrává do databáze. Tento mezikrok byl zvolen důvodu zálohování jednotlivých CGGTTS souborů ještě před jejich předzpracováním databází.



Obrázek 7.7: Schéma systému pro automatizovaný sběr dat

Jelikož je během porovnávání časových stupnic potřeba zpracovávat velké množství dat, byla pro uchování zvolena MySQL databáze. Při správné volbě indexace umožňuje velice rychlé zpracování jednotlivých záznamů [55] včetně průměrování. Data jsou ukládána včetně hlaviček jednotlivých CGGTTS souborů, a tak je možné tyto soubory zpětně reprodukovat. Celý proces sběru dat popisuje obrázek 7.7.

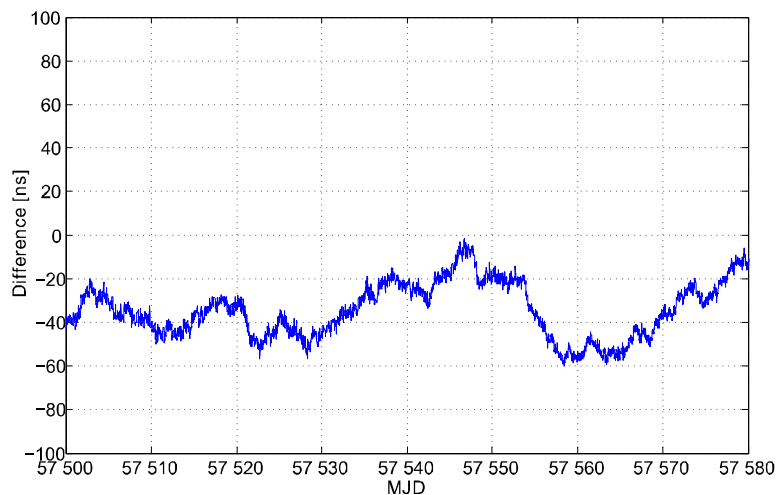
Pro výsledné zobrazení vyhodnocených dat byl využit web server, nicméně vzhledem k universalitě použití databází je možné realizovat jiné řešení bez větších komplikací.

Na výsledky měření odchylek je v přijímačích aplikována korekce modelovým ionosférickým zpožděním. Vzhledem k tomu, že v některých GNSS není možné zaručit ani zjistit, že oba přijímače použily při výpočtu odchylky stejné parametry modelu ionosféry, je třeba zvláště při porovnání na menší vzdálenost (<300 km) tuto korekci ze změřených dat vyloučit. Pokud se korekce nevyloučí, může občas nastat až několikahodinový stav, kdy je porovnání zatíženo chybou o velikosti několika nanosekund.

Ojediněle může dojít k změření výrazně odchyleného výsledku v důsledku rušení silným odraženým signálem. Tuto situaci lze indikovat na základě odchýlení změřené hodnoty od měření provedených prostřednictvím ostatních družic. Ze zpracování jsou vyřazena měření, jejichž výsledky nesplňují podmínky popsána v kapitole 7.2.1.

7.2.3. Výsledky

Výpočet odchylky stupnic byl realizován pomocí SQL dotazu, tím se celá zátěž výpočetní zátěž přesunula na SQL server. Na obrázku 7.8 je zobrazený výsledek porovnání časových stupnic dvou metrologických laboratoří pomocí GNSS přijímače.



Obrázek 7.8: Výsledek porovnání pomocí databáze

Jelikož hlavním kritériem byla rychlost zpracování dat, bylo provedeno srovnání pro 7denní a 80denní záznam měření. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 7.1. Navíc pro zpracování v Matlabu či v C programu bylo nutné manuálně vyhledat správné CGGTTS soubory, při zpracování databází byly soubory automaticky nahrány.

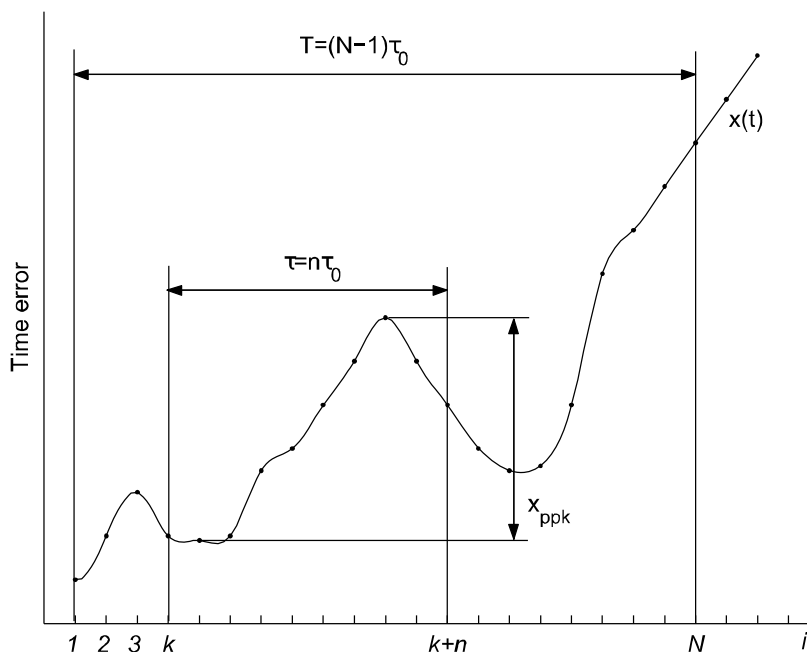
Doba měření	Program v C	Matlab script	MySQL dotaz
7 dní	7,21 s	4,95 s	0,60 s
80 dní	338,58 s	238,13 s	1,95 s

Tabulka 7.1: Rychlost zpracování měření

Díky popsaným metodám je možné rychle porovnávat záznamy z jednotlivých zařízení a zároveň centralizovat sběr a zálohu dat.

7.3. Zrychlení výpočtu MTIE

Výpočet MTIE (kapitola 2.2.6), je časově velmi náročný. To je dáno zejména tím, že pro výpočet hodnoty MTIE pro jeden interval $\tau = n\tau_0$ je nutné provést $N - n$ hledání minima a maxima (x_{ppk}) v množině n prvků, kde N je počet všech vzorků a n je zadaná velikost intervalu, jak popisuje obrázek 7.9.



Obrázek 7.9: Výpočet MTIE [6]

Pro jednotlivá n se postupně prochází měřená data a při každém posunu se pro interval τ hledá maximum a minimum. Toto navyšuje dobu výpočtu exponenciálně v závislosti na počtu vzorků. S použitím jednoduché heuristiky pro hledání minima a maxima bylo možné dobu výpočtu snížit. V ideálním případě je doba výpočtu lineárně závislá na počtu vzorků. Nicméně heuristiku použitou v takto zrychleném výpočtu (Fast MTIE), je možné aplikovat pouze na data, která kontinuálně nerostou nebo neklesají. Nicméně právě takové průběhy odchylky stupnice jsou běžné pro synchronizované časové stupnice anebo metrologické normály času a frekvence založených na atomových hodinách. Tabulka 7.2 ukazuje porovnání rychlosti výpočtu s pomocí MTIE algoritmu definovaného normou a s algoritmem Fast MTIE. Výpočet pracoval s reálnými daty podobného průběhu jako jsou na obrázku 7.8.

Počet vzorků pro výpočet	Doba výpočtu MTIE (dle [6])	Doba výpočtu Fast MTIE
1 000	0,05 s	0,04 s
10 000	0,76 s	0,39 s
500 000	2270,78 s	22,69 s

Tabulka 7.2: Porovnání rychlosti výpočtu jednotlivých algoritmů

7.4. Zhodnocení výsledků

Z důvodů potřeby jednoduché konfigurace a sběru dat ze zařízení obsahujících GPS přijímač LEA-6T (viz kapitola 5.5) byl vytvořen software GPSControl. Tento software umožňuje nastavení parametrů jako jsou kalibrační zpoždění antény, konfigurace výstupních signálů, kalibrace pozice antény a další. Tento software byl úspěšně nasazen pro dlouhodobé měření popsané v kapitolách 5.6 – 5.8.

V rámci měření s metrologickými GNSS přijímači GTR50 a GTR51 byl proveden výpočet nejistoty srovnání časových stupnic metodou Common View. Díky tomu mohla být tato metoda použita pro ověření funkčnosti modulů s levnými GPS přijímači LEA-6T. Způsob ověření popisují kapitoly 5.7 a 5.8.

Na základě nutnosti rychlého zpracování dat z metrologických GNSS přijímačů byl vytvořen systém sběru a vyhodnocení dat pomocí MySQL databáze. Tento systém umožňuje automatizované zařazení měřených dat z různých přijímačů do jednotné databáze. Následně je možné provést porovnání časových stupnic metodou Common View. Toto porovnání je oproti běžné praxi rychlé a potřebuje minimální zásah od operátora, v podstatě je třeba pouze zvolit parametry porovnávání.

Jelikož je MTIE metrika často používána v telekomunikačních aplikacích a protože výpočet MTIE je časově hodně náročný, byla vytvořena zrychlená verze výpočtu. Zrychlená verze obsahuje heuristiku pro vyhledávání minima a maxima v intervalu, což je základní prvek výpočtu MTIE. Díky této heuristice je možné razantně snížit dobu výpočtu. I přes tuto modifikaci jsou hodnoty získané tímto výpočtem identické s klasickým MTIE. Vzhledem k použité heuristice je nutné, aby průběh dat byl kontinuálně nerostoucí nebo neklesající. Nicméně takové průběhy odchylky stupnice jsou běžné pro synchronizované časové stupnice anebo metrologické normály času a frekvence založené na atomových hodinách.

8. Závěr

Práce se zabývá synchronizací času v průmyslových distribuovaných systémech a je cílena na využití levných GNSS přijímačů. Hlavním cílem této práce bylo otestování vlastností různých způsobů synchronizace a stanovení parametrů levných GNSS přijímačů.

8.1. Porovnání výsledků práce se stanovenými cíli

Návrh a implementace metod řízení lokálních stupnic v distribuovaném systému

V rámci řešení (viz kapitola 4) byly navrženy, realizovány a otestovány metody řízení lokální stupnice pomocí softwarové implementace v operačním systému Windows a pomocí hardwarové jednotky realizované pomocí FPGA. Pro systémy závislé na běžném operačním systému byla vyhodnocena latence generování signálů. Vzhledem ke špatné stabilitě oscilátoru PC a vysokému jitteru doby odezvy, způsobené operačním systémem, není možné v tomto složení dosáhnout přesnosti lepší jak 1 ms (ve smyslu MTIE). Tato přesnost ale může být pro některé průmyslové systémy dostatečná, zvláště pokud pak není nutno zakupovat specializovaný hardware. Navržená a zkonstruovaná jednotka realizovaná pomocí FPGA byla schopna udržet přesnost generované stupnice pod 1 μ s, jak ukazují výsledky prezentované v kapitole 4.2. Samotný kód vytvořený v jazyce VHDL je snadno přenositelný na další zařízení a umožňuje snadnou integraci v aplikaci využívající FPGA.

Ověření dosažitelné přesnosti levných přijímačů

Z běžně dostupných levných GPS přijímačů byly vybrány dva typy (uBlox LEA-6T a Trimble ICM SMT GPS), a to s ohledem na jejich katalogové parametry, cenu a dostupnost. Stabilita těchto přijímačů byla ověřena v laboratoři Státního etalonu času a frekvence (LSEČF) v ÚFE AV ČR (viz kapitola 5.1). Na základě výsledků měření byl pro další práci zvolen přijímač LEA-6T.

Spojením rubidiového normálu a přijímače LEA-6T vzniklo velice stabilní zařízení s časovou stupnicí odvozenou od GPS Time. Toto zařízení bylo opět testováno v LSEČF. Na základě výsledků popsaných v kapitole 5.2 je možné konstatovat, že toto zařízení splňuje parametry zvolené v úvodu této práce s výjimkou ceny. Cena celého systému je dána hlavně cenou rubidiového normálu. Nicméně pro některé aplikace toto nemusí být překážkou, zejména pokud vyžadují větší odolnost proti krátkodobým výpadkům GPS signálu.

S použitím přijímače LEA-6T bylo navrženo zařízení umožňující samostatné měření a synchronizaci (viz kapitola 5.5). V rámci realizace byly využity vlastnosti tohoto přijímače popsané v kapitolách 5.3 a 5.4. Z tohoto návrhu bylo vytvořeno několik identických zařízení pro další testování. Jako hlavní test bylo zvoleno porovnání časových stupnic metrologických laboratoří na různých místech v ČR. Pro ověření bylo zařízení srovnáno s metrologickým GNSS přijímačem GTR50 a GTR51 (viz kapitola 5.7). Dále pak bylo provedeno kontrolní porovnání s pomocí přenosu času po optickém vlákně, jak popisuje kapitola 5.8 a bylo provedeno porovnání dvou zařízení s anténou umístěnou na stejném místě (viz kapitola 5.6). Výsledky těchto měření potvrdily, že zařízení je schopné generovat časovou stupnici s chybou menší než 1 μ s.

Návrh a implementace metody měření lokálních stupnic zařízení bez přímého výstupu signálu časové základny

Byly navrženy metody pro měření dlouhodobé stability lokálních časových základen měřicích přístrojů. Tyto metody byly realizovány a výsledky porovnány s přímým měřením frekvence. Pro zrychlení výpočtu frekvenční odchylky lokální základny byly vytvořeny automatizované skripty v programu Matlab. Na základě těchto metod je možné provést kalibraci běžného digitalizátoru i bez externího výstupu interního oscilátoru.

Návrh a implementace metod pro automatizovaný sběr a zpracování dat

Byly navrženy metody pro automatizované zpracování dat získaných pomocí měření metodou Common View (viz 7.2). Byly vytvořeny softwarové a hardwarové prostředky pro zajištění výměny dat mezi jednotlivými laboratořemi. Navržené metody jsou robustní a akceptují všechny platné CGGTTS formáty ukládaných dat.

Dále byl vytvořen software (viz kapitola 7.1) umožňující sběr dat a konfiguraci GPS přijímače. Tento software je založen na knihovně GPS Parser popsané v příloze 12.1.

Pro výpočet a vyhodnocení stability časové stupnice se využívají metriky popsané v kapitole 2.2. Výpočet těchto metrik je časově náročný, zejména pro velké množství vzorků. Toto platí obzvláště pro MTIE. Z tohoto důvodu byla vytvořena modifikace standardního výpočtu, která dokáže celý proces zrychlit, více je popsáno v kapitole 7.3.

8.2. Originální výsledky dosažené v této práci

V rámci této práce bylo vytvořeno a otestováno zařízení popsané v kapitole 5.5, které může být použité pro synchronizaci distribuovaného systému a měření dlouhodobé stability časových stupnic. Toto zařízení je možné realizovat s nízkými náklady a jeho použití je limitováno pouze dostupností GPS signálu. Jak ukazují jednotlivá měření v kapitolách 5.1 a 5.2 je možné toto zařízení provozovat i s „omezeným“ signálem. Další možností je umístění antény na vhodné místo a korekce délky anténního kabelu přímo v zařízení.

Bylo zkonstruováno zařízení pro distribuci přesného času s využitím PTP (Precise Time Protocol) v lokálních počítačových sítích. Zařízení (viz [56] a [57]) se chová jako zdroj času pro podřazený systém, jeho konstrukce je popsána v příloze 12.2. Toto zařízení pak bylo úspěšně otestováno spolu se zařízeními dalších výrobců, tak jak je popsáno v příloze 12.3.

Dále byla vytvořena softwarová knihovna pro komunikaci s GPS přijímači různých výrobců, která umožňuje unifikovaný sběr dat (viz příloha 12.1). Tato knihovna je psaná v jazyce C a díky tomu byla využita pro několik semestrálních a bakalářských prací. Knihovna byla později rozšířena na plně autonomní software s grafickým prostředím pro ovládání a sběr dat z GPS přijímače uBlox. Software je popsán v kapitole 7.1.

Pro samotné zpracování dat a měření pomocí externích přístrojů, zejména čítačů, byl realizován modulární software pro měření a kalibraci časových stupnic (viz příloha 12.4). Ten vznikl kombinací skriptů v jazyce Python a Matlab. Součástí tohoto balíku je i skript pro zrychlený výpočet MTIE popsany v kapitole 7.3.

8.3. Doporučení pro další rozvoj a realizace v praxi

V poslední době se objevilo několik nových obvodů specializovaných na řízení časové stupnice bez nutnosti změny frekvence oscilátoru. Tyto obvody dokáží nahradit část zařízení s FPGA popsaneho v kapitole 4.2. Jedním z příkladů je integrovaný obvod fyzické vrstvy DP83630, použitý v zařízení, které je popsáno v příloze 12.2.

Měření a synchronizace je v současnosti realizováno pomocí modulů LEA-6T, které podporují pouze satelitní systém GPS. Nové moduly od firmy uBlox LEA-M8T podporují i systémy GLONASS, BeiDou a Galileo. Nový modul je dle výrobce kompatibilní se starším. Tento modul bude použit při realizaci nových zařízení.

Software pro zpracování dat ze metrologických GNSS přijímačů by bylo vhodné sjednotit se software pro porovnávání stupnic pomocí levných modulů [58]. Bylo by pak jednodušší provádět srovnání v jednom rozhraní a získat tak redundantní měření v případně výpadků (byť se zhoršenou přesností). Jelikož se jedná vesměs o dlouhodobé měření, které obsluha často nekontroluje bylo by vhodné doplnit možnost automatického upozorňování na výpadek měření a tím minimalizovat ztrátu dat.

9. Literatura

- [1] Cristaldi L., Ferrero, A., Muscas, C., Salicone, S., Tinarelli, R., „The impact of internet transmission on the uncertainty in the electric power quality estimation by means of a distributed measurement system“, *Instrumentation and Measurement*, IEEE Transactions, roč. 52, č. 4, 2003, s. 1073–1078,
- [2] Eidson, J. C. „Measurement, Control, and Communication Using IEEE 1588“, 2006.
- [3] Riley, J. „Handbook of frequency stability analysis“, *NIST special publication*. 2007
- [4] Bregni S., „Measurement of maximum time interval error for telecommunications clock stability characterization“, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, roč. 45, č. 5, s. 900–906, 1996.
- [5] Sullivan D.B., Allan D.W., Howe D.A., Walls F.L., „Characterization of Clocks and Oscillators“, *NIST Technical Note 1337*, Boulder National Institute of Standards and Technology, 1990,
- [6] Allan, D. W., „Time and Frequency (Time-Domain) Characterization, Estimation, and Prediction of Precision Clocks and Oscillators“, *IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS AND FREQUENCY CONTROL*, č. UFFC-34–6, 1987.
- [7] „Definitions and Terminology for Synchronization Networks“, *ITU-T G.810*, Geneva : International Telecommunication Union, 1996.
- [8] Stein, S. R., „Frequency and Time—Their Measurement and Characterization“, *Ballato A. Gerver E.A. Precision Frequency Control*, New York: Academic Press, 1985, s. 191–232.
- [9] „Characterization of Frequency and Phase Noise“, *Report 580. International Radio Consultative Committee (CCIR, the predecessor of the ITU)*, 1986, s. 142–150.
- [10] Lance, A. L., Seal, W. D., Labaar, F., „Phase Noise and AM Noise Measurements in the Frequency Domain“, *Infrared and Millimeter Waves*, 1984, s. 239–289.
- [11] „Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology – Random Instabilities“, *1139-1999, IEEE Std. IEEE Standard*, New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1999.
- [12] Riley, W. J., „Handbook of frequency stability analysis“, *NIST special publication*, Hamilton Technical Services, 2007
- [13] Searle, L. S., Cutler, C. L., „Some aspects of the theory and measurement of frequency fluctuations in frequency standards“ *Proceedings of the IEEE*, č. 54, 1966, s. 136–154.
- [14] Ebenhag, S-C., „Frequency Transfer Techniques and Applications“, Göteborg: Chalmers University of Technology, 2013
- [15] Matsakis, D., Koppang, P., Garvey, M. R., „THE LONG-TERM STABILITY OF THE U.S. NAVAL OBSERVATORY'S MASERS“, *36th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting*, 2004.
- [16] Lombardi, M., Heavner, T., Jefferts, S., „NIST Primary Frequency Standards and the Realization of the SI second“, *The Journal of Measurement Science*. č. 2, 2007, roč. 4, s. 74-89.

- [17] Torcaso, F., Ekstrom, C., Burt, E., Matsakis, D., „Estimating the stability of N clocks with correlations“, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, č. 47, 2000, r. 5, s. 1183.
- [18] Breuer, J., Cemusova, B., Vigner, V., et al. „Synchronization of Distributed Systems using GPS“, *Advanced Distributed Measuring Systems*, River Publishers, 2012.
- [19] Jiang, G., Petit, Z., „Precise point positioning for TAI computation“, *International Journal of Navigation and Observation*, 2008.
- [20] Audoin, C., Guinot, B., „The Measurement of Time: Time, frequency and the Atomic“, *University Press*, 2001.
- [21] Breuer, J., „Synchronizace času v distribuovaných heterogenních měřicích a řídicích systémech“, *Disertační práce*, ČVUT FEL, 2016.
- [22] Lombardi, M. A., Nelson, L. M., Novick, A. N., „Using the Global Positioning System Cal Lab“, *The International Journal of Metrology*, 2001, s. 26-33.
- [23] Appleyard, S.F., Linford, R.S., Yarwood, P.J., „Marine Electronic Navigation (2nd Edition)“. 1988, s. 77–83.
- [24] Kvapil, J., „Kosmický segment GPS a jeho budoucnost“, *Aldebaran bulletin*, roč. 3, 2005, č. 2.
- [25] Levine, J. „Introduction to Time and Frequency Metrology“, *REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS*, č. 6, 1999, s. 2567–2596.
- [26] „Mesit defence“, www.mesitdefence.cz. [Online] www.mesitdefence.cz/en/casomerna-technika, [Viděno: 5. 7. 2017].
- [27] Vigner, V., Breuer, J., „Precise Synchronization in Large Distributed Systems“, *IDAACS 2013 - Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*. Technology and Applications. Berlin, IEEE. 2013, s. 226-230.
- [28] Roztocil, J., Vigner, V., Device for Time Scale Generation and Event Timestamping. *IDAACS'2011 - Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*. 2011, stránky 287 – 290.
- [29] „White paper: What Is LXI?“, *National Instruments*, www.ni.com, [Online]. <http://www.ni.com/white-paper/7255/en/>, [Viděno: 2. 6. 2017].
- [30] Roztocil, J., Vigner, V., „Live Demonstration: Time and Frequency Standard Based on GPS Receiver“, *Proceedings of the 14th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics*. Milán, Politecnico di Milano. 2016, s. 64.
- [31] „u-blox 6 Receiver Description“, *u-blox*, [Online], www.u-blox.com, [Viděno: 20. 7 2017].
- [32] „Model PRS10, Rubidium Frequency Standard, Operation and Service Manual“, *Stanford Research Systems Inc*, Sunnyvale, 2015.
- [33] Vigner, V., Roztocil, J., „Zařízení pro časovou identifikaci událostí synchronizované GPS signálem“, 2011

- [34] Vigner, V., Roztočil, J., Čemusová, B., „Evaluation of timing GPS receivers for industrial applications“, *Proceedings of the 12th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics*, Università di Firenze, 2014, roč. 2013, s. 177–182.
- [35] „Závěrečná zpráva úkolu PRM 2016 VIII/1/16“, FEL ČVUT, Praha, 2016.
- [36] Hedekvist, P. O., Ebenhag, S. C., „Time and Frequency Transfer in Optical Fibers“, *In Recent Progress in Optical Fiber Research*, InTech. 2012, s. 371-386
- [37] Roztočil, J., Vigner, V., Papež, V. „MEASUREMENT OF TIME BASE CHARACTERISTICS OF HIGH RESOLUTION DIGITIZERS“, *IMEKO WORLD CONGRESS*, 2015.
- [38] Roztočil, J., Vigner, V., „Měření parametrů časových základů digitalizátorů spojitých signálů s vysokým rozlišením“, *Metrologie*, roč. 23, 2014, č. 4, s. 7-9.
- [39] Sedláček, M., Blaška, J., „Low uncertainty power-line frequency estimation for distorted and noisy harmonic signals“, *Measurement*, roč. 35, 2004, s. 97-107.
- [40] Krumpholtz M., Sedláček M., „Measurement of Phase Difference Using DSP Algorithms“, *14th International Symposium on New Technologies in Measurement and Instrumentation and 10th Workshop on ADC Modelling and Testing*, 2005, s. 229-234.
- [41] Sedláček, M., Šmíd R., „MATLAB v měření“, skripta ČVUT FEL. 2012, s. 169.
- [42] „Revision of IEEE Std. IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders“, IEEE Std 1057-2007 (1057-1994).
- [43] Handel, P., „Properties of the IEEE-STD-1057 Four-Parameter Sine Wave Fit Algorithm“, *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, roč. 49, 2000, č. 6.
- [44] „Revision of IEEE Std. IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology-Random Instabilities“, IEEE Std 1139-2008 (1139-1999).
- [45] Vágner, R., „Vliv zpracování digitalizovaných dat pomocí základních algoritmů číslicového zpracování signálu na nejistotu měření“, *Diplomová práce*, ČVUT FEL, 2002.
- [46] „Zpráva pro závěrečnou oponenturu úkolu PRM 2013 č. VIII/1/13“. Praha: ČVUT FEL, 2013.
- [47] Lewandowski, W., Thomas, C., „GPS time transfer“, *Proceedings: IEEE*, roč. 79, 1991, č. 7, s. 991-1000.
- [48] Imae, M., Suzuyama, T., Hongwei, S., „Impact of satellite position error on GPS common-view time transfer“, *Electronics Letters*, roč. 40, 2004, č. 10.
- [49] Defraigne, P., Petit, G., „CGGTTS-Version 2E: an extended standard for GNSS time transfer“, *Metrologia*, roč. 52, 2015, č. 6, s. 1-22.
- [50] Cepek, A., Vondrak J., „Combined smoothing method and its use in combining earth orientation parameters measured by space techniques“, *Astronomy & Astrophysics, Supplement Series*, roč. 147, 2000, č. 2, s. 347-359.
- [51] „Příloha č. 2 ke zprávě k úkolu PRM č. III/13/16“, AVČR, ÚFE, Praha, 2016. s. 1-6.
- [52] Lewandowski, W., Jiang, Z., „Accurate GLONASS Time Transfer for the Generation of the Coordinated Universal Time“, *International Journal of Navigation and Observation*. 2012.

- [53] Defraigne, P., Aerts, W., Cerretto, G., Cantoni, E., Sleewaegen, J., „Calibration of Galileo Signals for Time Metrology“, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, roč. 61, 2014, č. 12.
- [54] „Zpráva pro dílčí oponenturu úkolu PRM 2011 III/13/11 - Příloha 3.“, AVČR, ÚFE, Praha 2011.
- [55] Harmegnies, A., Defraigne, P., Petit, G., „Combining GPS and GLONASS in all-in-view for time transfer“, *Metrologia*, roč. 50, č. 3, s. 277-287.
- [56] Breuer, J., Vigner, V., Roztočil, J., „Precise packet delay measurement in an Ethernet network“, *Measurement*, roč. 54, 2014, s. 215-221.
- [57] Haasz, V., et al., „PRECISE SYNCHRONISATION IN INDUSTRIAL SYSTEM USING IEEE 1588 PRECISE TIME PROTOCOL“, *International Journal of Computing*, roč. 14, 2015, č. 1, s. 8-14.
- [58] . Allan, D.W., Weiss, M., „Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite“, *Proc. 1980 IEEE Freq. Contr. Symp.*, Philadelphia, PA, 1980, s. 334-356.

10. Seznam vlastních publikací

10.1. Publikace vztahující se k tématu této práce

10.1.1. Publikace v impaktovaných časopisech

BREUER, J. (40 %), VIGNER, V. (40 %), a ROZTOČIL, J. (20 %)

Precise packet delay measurement in an Ethernet network.

Measurement. 2014, 54(54), s. 215-221. ISSN 0263-2241.

10.1.2. Publikace v recenzovaných časopisech

VIGNER, V, a ROZTOČIL, J. (přijato 8. 8. 2017, čeká na publikování)

Fast comparison of high-precision time scales using GNSS receivers

International Journal of Navigation and Observation.

BREUER, J. (35 %), ČEMUSOVÁ, B. (10 %), FISCHER, J. (25 %), ROZTOČIL, J. (15 %), VIGNER, V. (15 %)

Synchronization of Distributed Systems Using GPS.

In: HAASZ, V., ed. *Advanced Distributed Measuring Systems – Exhibits of Application*.

Aalborg: River Publishers. 2012, s. 95-120. The River Publishers Series of Information

Science and Technology. ISBN 978-87-92329-72-1

10.1.3. Publikace ostatní

ROZTOČIL, J. a VIGNER, V.

Měření časové diference lokálních časových stupnic v distribuovaných systémech.

Zikova 1903/2, Dejvice, 160 00 Praha: CESNET, zájmové sdružení právnických osob. 2016

BREUER, J., ROZTOČIL, J., a VIGNER, V.

Live Demonstration: Precise Time Protocol Tester.

In: *Proceedings of the 14th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics*.

Milán, Politecnico di Milano. 2016, s. 63. ISBN 978-92-990073-9-6.

ROZTOČIL, J. a VIGNER, V.

Live Demonstration: Time and Frequency Standard Based on GPS Receiver.

In: *Proceedings of the 14th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics*.

Milán, Politecnico di Milano. 2016, s. 64. ISBN 978-92-990073-9-6.

ROZTOČIL, J., VIGNER, V., a PAPEŽ, V.

MEASUREMENT OF TIME BASE CHARACTERISTICS OF HIGH RESOLUTION DIGITIZERS.

In: HOLUB, J., ed. *XXI IMEKO WORLD CONGRESS – Full Papers*. XXI IMEKO WORLD

CONGRESS. Prague, 30.08.2015 - 04.09.2015. Prague: Czech Technical University in

Prague, Faculty of Electrical Engineering. 2015, ISBN 978-80-01-05793-3.

HAASZ, V., ROZTOČIL, J., BREUER, J. a VIGNER, V.

PRECISE SYNCHRONISATION IN INDUSTRIAL SYSTEM USING IEEE 1588 PRECISE TIME PROTOCOL.

International Journal of Computing. 2015, 14(1), s. 8-14. ISSN 1727-6209.

Dostupné z: <http://www.computingonline.net>

ROZTOČIL, J. a VIGNER, V.

Měření parametrů časových základen digitalizátorů spojitých signálů s vysokým rozlišením.

Metrologie. 2014, 23(4), s. 7–9. ISSN 1210-3543.

BREUER, J., VIGNER, V., a ROZTOČIL, J.

Device for Precise Packet Delay Measurement.

In: *Proceedings of the 12th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics*. Florencie, 06.06.2013 - 07.06.2013. Florencie: Universita di Firenze. 2013, s. 66-71. ISBN 978-88-903149-8-8.

VIGNER, V., ROZTOČIL, J., a ČEMUSOVÁ, B.

Evaluation of timing GPS receivers for industrial applications.

In: *Proceedings of the 12th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics*. Florencie, 06.06.2013 - 07.06.2013. Florencie: Universita di Firenze. 2013, ISBN 978-88-903149-8-8.

VIGNER, V. a BREUER, J.

Precise Synchronization in Large Distributed Systems.

In: *IDAACS 2013 - Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems. Technology and Applications*. Berlin, 12.09.2013 - 14.09.2013. Berlin: IEEE. 2013, s. 226-230. ISBN 978-1-4799-1426-5.

VIGNER, V.

Development Board for Accurate Time Scale Preservation.

In: *POSTER 2011 - 15th International Student Conference on Electrical Engineering*. Prague, 12.05.2011. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. 2011, s. 1-4. ISBN 978-80-01-04806-1.

VIGNER, V. a ROZTOČIL, J.

Device for Time Scale Generation and Event Timestamping.

In: *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*. The 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. Prague, 15.09.2011 - 17.09.2011. Piscataway: IEEE. 2011, s. 287-290. ISBN 978-1-4577-1423-8.

BREUER, J., B., FISCHER, J., ROZTOČIL, J. a VIGNER, V.

Modul hlavních hodin.

[Funkční vzorek]. 2011

ROZTOČIL, J. a VIGNER, V.

Měření parametrů časové synchronizace v distribuovaných systémech.
2012

BREUER, J., VIGNER, V., a ROZTOČIL, J.

PTP Tester.
[Funkční vzorek]. 2012

BREUER, J., ROZTOČIL, J., a VIGNER, V.

Software pro měření a kalibraci časových stupnic.
[Software splňující podmínky RIV (dřív Autorizovaný)]. 2012,

VIGNER, V. a ROZTOČIL, J.

Časový přijímač GPS pro průmyslové použití.
[Funkční vzorek]. 2012

VIGNER, V., BREUER, J., a ROZTOČIL, J.

Synchronizační modul s GPS přijímačem Trimble.
[Funkční vzorek]. 2013

BREUER, J., B., FISCHER, J., ROZTOČIL, J. a VIGNER, V.

Modul obyčejných hodin.
[Funkční vzorek]. 2011

BREUER, J., VIGNER, V., a ROZTOČIL, J.

Precise Time Protokol daemon pro systém Windows.
[Software splňující podmínky RIV (dřív Autorizovaný)]. 2013

BREUER, J., VIGNER, V., ROZTOČIL, J., a FISCHER, J.

Měřicí ústředna s protokolem IEEE1588.
[Funkční vzorek]. 2013,

VIGNER, V., BREUER, J., ROZTOČIL, J., a FISCHER, J.

Modul pro časovou synchronizaci sběru dat = TriggerBox.
[Funkční vzorek]. 2013

VIGNER, V.

Modul absolutního času pro synchronizaci bezdrátových sensorových sítí. [Funkční vzorek]. 2015

VIGNER, V. a ROZTOČIL, J.

Zařízení pro časovou identifikaci událostí synchronizované GPS signálem.
[Funkční vzorek]. 2011

10.2. Ostatní

BREUER, J. a VIGNER, V.

Sleepy Cat: an Open Source Development Platform for STM32F2 Microcontrollers.

In: *POSTER 2012 - 16th International Student Conference on Electrical Engineering*.

Prague, 17.05.2012. Praha: Czech Technical University in Prague. 2012, s. 1-4. ISBN 978-80-01-05043-9.

HORÁK, M. a VIGNER, V., eds.

Advanced Measurement of Photovoltaic Cells.

Poster 2014. Praha, 15.05.2014. 2014, ISBN 978-80-01-05499-4.

BREUER, J. a VIGNER, V.

SCPI Parser Library for Small Devices.

In: *POSTER 2013 - 17th International Student Conference on Electrical Engineering*. 17th International Student Conference on Electrical Engineering. Prague, 16.05.2013. Prague: Czech Technical University. 2013, s. 1-4. ISBN 978-80-01-05242-6.

BREUER, J. a VIGNER, V.

SCPI Parser.

[Jiný software (nesplňující podmínky RIV)]. 2013

BREUER, J., et al.

Měřicí systém pro sběr a analýzu dat.

Chodovská 3, Praha 4: Cegelec a.s. 2014

WARAUS, D., DVOŘÁK, J., a VIGNER, V.

Diagnostická jednotka pro FlexRay sběrnici.

[Funkční vzorek]. 2011

10.3. Ohlasy

(BREUER, J. – VIGNER, V. – ROZTOČIL, J., 2014) citován v:

Chen, X. – Guo, H. – Crossley, P., „Interoperability Performance Assessment of Multivendor IEC61850 Process Bus“, *IEEE Transactions on Power Delivery*, roč. 31, č. 4, s. 1934–1944, srp. 2016.

Catelani, M. - Ciani, L., „Editorial“, *Measurement*, roč. 54, s. 178–179, srp. 2014.

Dostal, J.; Smotlacha, V., „System on Chip for Comparison of Precise Time Sources“, *PROCEEDINGS OF 2016 IEEE EAST-WEST DESIGN & TEST SYMPOSIUM (EWDTS)*, 2016.

(VIGNER, V. – BREUER, J., 2013) citován v:

Sagatov, E.S.; Samoilova, D.V.; Sukhov, A.M.; Vinogradov, N.I., „Composite distribution for one-way packet delay in the global network“, *24th Telecommunications Forum, TELFOR 2016*, 2016. ISBN 9788674666494.

Vinogradov, N.I.; Sagatov, E.S.; Sukhov, A.M., „Device for measuring one-way network delay with microsecond accuracy“, *TELFOR 2015*, pp. 133–136, 2015. ISBN 978-1-5090-0055-5.

(VIGNER, V. – ROZTOČIL, J., 2011) citován v:

Hrbac, R.; Kolar, V.; Mlcak, T., „Distributed Measurement System with GPS Synchronisation and Its Use in Electric Traction“, *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA*, vol. 21, no. 6, pp. 8–13, 2015. ISSN 1392-1215.

11. Seznam symbolů a zkratek

ADEV	Allan deviation
AV ČR	Akademie věd České republiky
BIMP	International bureau of weights and measures
C/A	Coarse/acquisition (kód GPS)
Cs	Cesium, Cesiové hodiny
CV	Common view
DCF	Deutschland, long wave signal, Frankfurt
DCF77	Deutschland long wave signal Frankfurt frequency 77
DUT	Device under test
EGNOS	European geostationary navigation overlay service
FPGA	Field programmable gate array
Galileo	European global navigation satellite system
GLONASS	Global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema
GMT	Greenwich Mean Time
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IRIG	Inter-Range Instrumentation Group
ITU	International telecommunication union
LEA-6T	GPS Timing module, verze 6 od firmy u-blox,
LORAN	Long range navigation
LSEČF	Laboratoř státního etalonu času a frekvence
LVDS	Low-Voltage Differential Signaling (TIA/EIA-644)
MDEV	Modified Allan deviation
MTIE	Maximum Time Interval Error
NMEA	National Marine Electronic Association
NTP	Network Time Protocol
OCXO	Oven-Controlled Crystal Oscillator
P	Precision (kód GPS)
PDOP	Position Dilution Of Precision
PHY	Physical layer
PPB	Parts per billion
PPM	Parts per million
PPP	Precise point positioning

PPS	Pulse Per Second
PTP	Precise Time Protocol dle standardu IEEE 1588
Rb	Rubidium, Rubidiové hodiny
RINEX	Receiver Independent Exchange (formát)
RMII	Reduced media-independent interface
RMS	Root mean square
RMS	Root Mean Square
SI	International System of Units
TAI	Temps Atomique International
TAI	Temps Atomique International
TCXO	Temperature-Compensated Crystal Oscillator
TDEV	Time deviation
TIC	Time interval counter
TIE	Time Interval Error
TTL	Transistor–transistor logic
ÚFE	Ústav fotoniky a elektroniky (Akademie věd ČR)
USNO	United States Naval Observatory
UT	Universal time
UTC	Coordinated Universal Time
UTC(BIMP)	Časová stupnice laboratoře BIMP
UTC(TP)	Časová stupnice Českého národního etalonu času
UTC(USNO)	Časová stupnice laboratoře USNO
VHDL	VHSIC Hardware Description Language
ZCR	Zero CRossing

12. Přílohy

12.1. GPS Parser

12.1.1. Zadání

Pro zpracování dat z GPS přijímače bylo zapotřebí vytvořit pomocnou aplikaci. Tato aplikace měla dlouhodobě zaznamenávat vybraná data ve formátu vhodném pro další zpracování. Zvoleným výstupem měl být textový dokument a každý záznam má být opatřen časovou značkou. Pro přehlednost byl pro ukládání času zvolen Unix Time formát. Ten je snadno převeditelný do ostatních formátů, a navíc je využíván i v IEEE 1588 protokolu.

12.1.2. Popis struktury výsledné aplikace

Samotná aplikace je naprogramována v jazyku C. Toto přináší snadnou portovatelnost do mikroprocesorových aplikací. V rámci snadné rozšiřitelnosti aplikace o další GPS přijímač byla aplikace naprogramována modulárně. Tzn. každý blok programu (modul) je rozdělen do knihovny obsahující C soubor s kódem.

Hlavní modul se stará o nastavení datových linek, v tomto případě sériových portů. A zároveň specifikuje výstup programu. Konkrétně se jedná o časové označení jednotlivých zpracovaných dat a jejich zápis do textového souboru. Zbylé moduly se starají o zpracování toku dat. Každý z těchto modulů je navržen pro konkrétní komunikační protokol.

12.1.3. Podporované protokoly

NMEA

Tento protokol je standardizovaný National Marine Electronics Association. Jedná se o textový protokol. Zprávy obsahují kontrolní součet pro validaci došlých dat. Všechny GPS přijímače tento protokol podporují. Nevýhodou je, že tento protokol je používán zejména pro určování polohy a rychlosti. Z tohoto důvodu neobsahuje informace potřebné pro aplikace s přesným časem. Další nepříjemností je to, že je tento protokol textový a formát zpráv (zejména zápis hodnot) není vždy stoprocentně dodržován všemi výrobci.

I když NMEA protokol myslí na implementaci speciálních zpráv (např. pro poskytnutí rozšiřujících informací) výrobci speciálních časových GPS přijímačů na to moc nedbají. Proto se NMEA protokol hodí zejména pro informace o počtu a pozici družic.

UBX

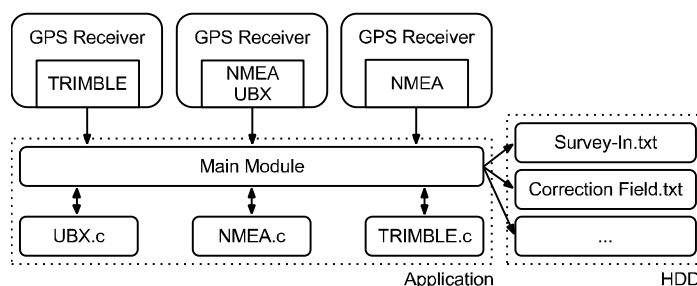
Jedná se o binární protokol vytvořený výrobcem GPS přijímačů uBlox. Tento protokol obsahuje dostatek zpráv pro vyčtení všech dostupných informací z GPS přijímače. Zprávy obsahují kontrolní součet pro validaci došlých dat.

TRIMBLE

Jedná se o binární protokol vytvořený výrobcem GPS přijímačů Trimble. Platí pro něj to samé jako pro protokol UBX s tím, že tyto protokoly jsou navzájem nekompatibilní. A to nejenom v způsobu přenosu dat, tak i v definici jednotlivých parametrů zpráv. Díky modularitě celé aplikace mohou být další protokoly doplněny přidáním konkrétní knihovny

12.1.4. Příklad použití aplikace

Na následujícím obrázku je patrné zapojení pro monitoring tří GPS přijímačů s různými komunikačními protokoly. Data jsou přijímána hlavním modulem a s použitím jednotlivých knihoven zpracována. Výsledek je pak opatřen časovou značkou a uložen do patřičného souboru. V tomto případě se jedná o soubory Survey-In.txt který obsahuje informace o přesném určení polohy GPS antény (to je důležité pro určení přesného času). Druhý soubor s názvem Correction Field.txt poskytuje informace o předpokládané odchylce PPS (Pulse Per Second) signálu z důvodu granularity časové stupnice GPS přijímače. Dále mohou být zaznamenávány libovolné zprávy poskytované GPS přijímačem či přijímači do jednoho či více textových souborů.



Obrázek 12.1: Monitoring tří GPS přijímačů

12.1.5. Hodnocení

Aplikace byla otestována při dlouhodobém záznamu dat z GPS přijímače, konkrétně se jednalo o 22denní záznam obsahující přes 5 milionů zpracovaných zpráv bez jediného výpadku. Tyto data pak mohla být dále zpracována a zapracována do výsledků měření kvality jednotlivých GPS přijímačů. Aplikace je napsána modulárně a obsahuje knihovny pro běžně používané standardy.

12.1.6. Ukázkový obsah výstupního souboru

Následující soubor obsahuje informace o výstupním PPS signálu generovaným GPS přijímačem (TP = Time Pulse). Červeně označený sloupec představuje informaci o kvantizační chybě PPS signálu z důvodů granularity časové stupnice GPS přijímače.

Data jsou uložena v souboru TP2012-04-30_11-54-02.txt a obsahují následující informace.

Time of the week [ms]	Submilisecond part of time [$2^{32} \cdot \text{ms}$]	Quantization error of timepulse [ps]	Timepulse week number	Bitmask
122380000	0	-9173	1686	02
122381000	0	-9593	1686	02
122382000	0	8917	1686	02
122383000	0	5951	1686	02

Tabulka 12.1: Informace o výstupním PPS signálu

Následující soubor obsahuje informace o časových značkách příchodu externího PPS signálu (TM = Time Mark). Důležité hodnoty jsou označeny červeně. Jedná se o časovou značku náběžné a sestupné hrany externího PPS signálu.

Data jsou uložena v souboru TM2012-04-30_11-54-02.txt

Channel	Bitmask	Rising edge counter	WN of RE	WN of FE	TOW of RE	ns for RE	TOW of FE	ns for FE
0	CD	16541	1686	1686	122378000	189	122378000	23
0	CD	16542	1686	1686	122379000	192	122379000	23
0	CD	16543	1686	1686	122380000	193	122380000	23
0	CD	16544	1686	1686	122381000	173	122381000	23

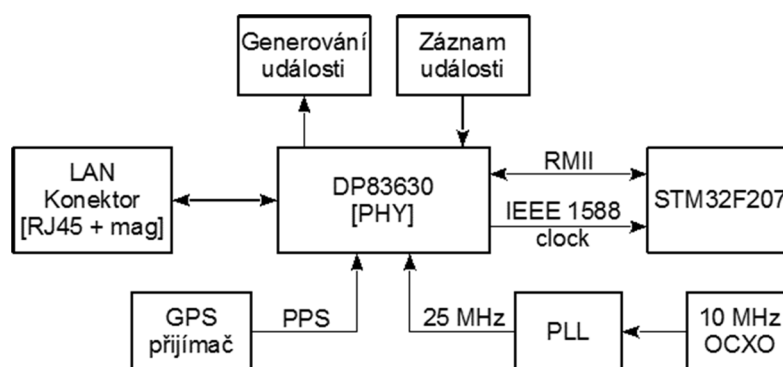
Tabulka 12.2: Časové značky PPS signálu

* WN = week number, RE = rising edge, FE = falling edge, TOW = Time of Week

12.2. Modul hlavních hodin s GPS přijímačem pro distribuované systémy synchronizované pomocí protokolu IEEE 1588.

Modul slouží jako přesná časová stupnice synchronizovaná s UTC (resp. GPS Time). Zároveň je schopen sloužit jako tzv. *Grand Master Clock* pro implementaci synchronizačního protokolu IEEE 1588.

Blokové schéma celého systému je na obrázku 1. Použitá precizní fyzická vrstva DP83630 umožňuje *timestamping* (časovou identifikaci) příchozích a odchozích paketů. O zpracování dat a další komunikaci se stará mikrokontrolér STM32F207. Celý systém je nezávislý na nadřazeném systému.

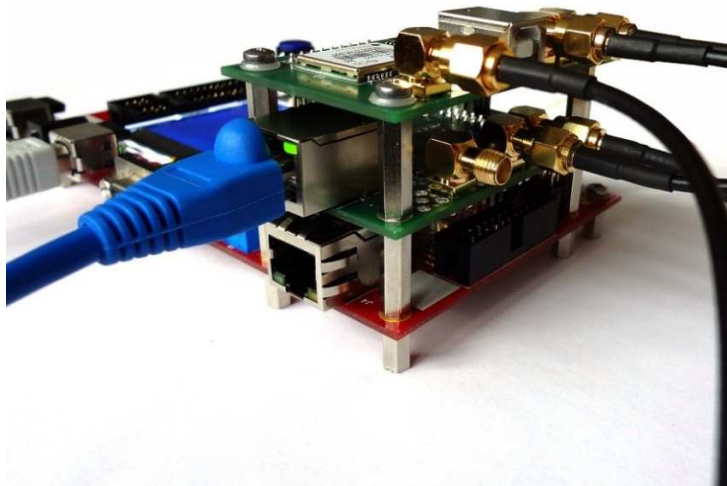


Obrázek 12.2 Blokové schéma modulu

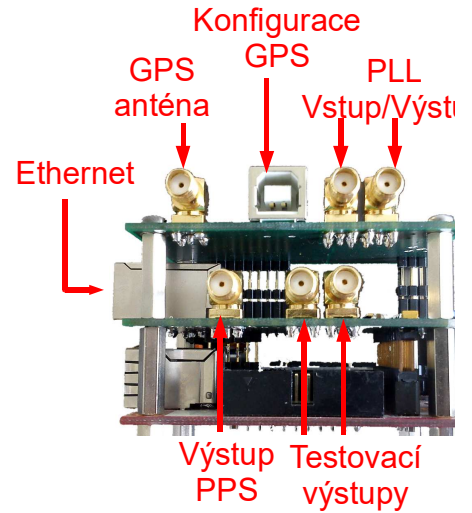
O kvalitu časové stupnice se stará OCO (MTI 210 od firmy MTI Miliren), který poskytuje dobrý základ pro krátkodobou stabilitu systému. Druhým dílčím prvkem je GPS přijímač LEA-6T od firmy uBlox. Tento GPS přijímač je speciálně navržen pro aplikace s přesným časem. Tím pádem zajišťuje dlouhodobě stabilní časovou referenci pro celý systém.

12.2.1. Vlastnosti

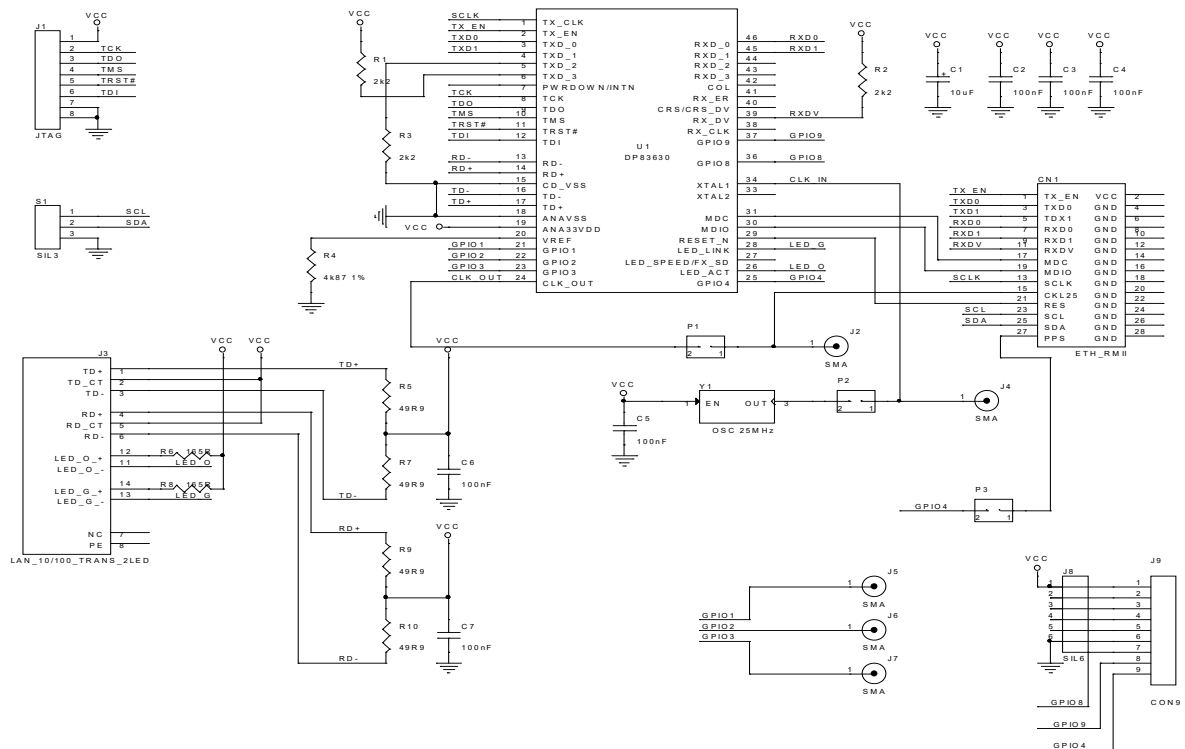
Přesnost 1PPS výstupu:	UTC(USNO): ± 50 ns RMS 200 ns špička
Výstupní signál:	Programovatelný 1PPS až 1MPPS (1PPS default)
Synchronizační protokoly	IEEE 1588 – 2008 (PTP v2)



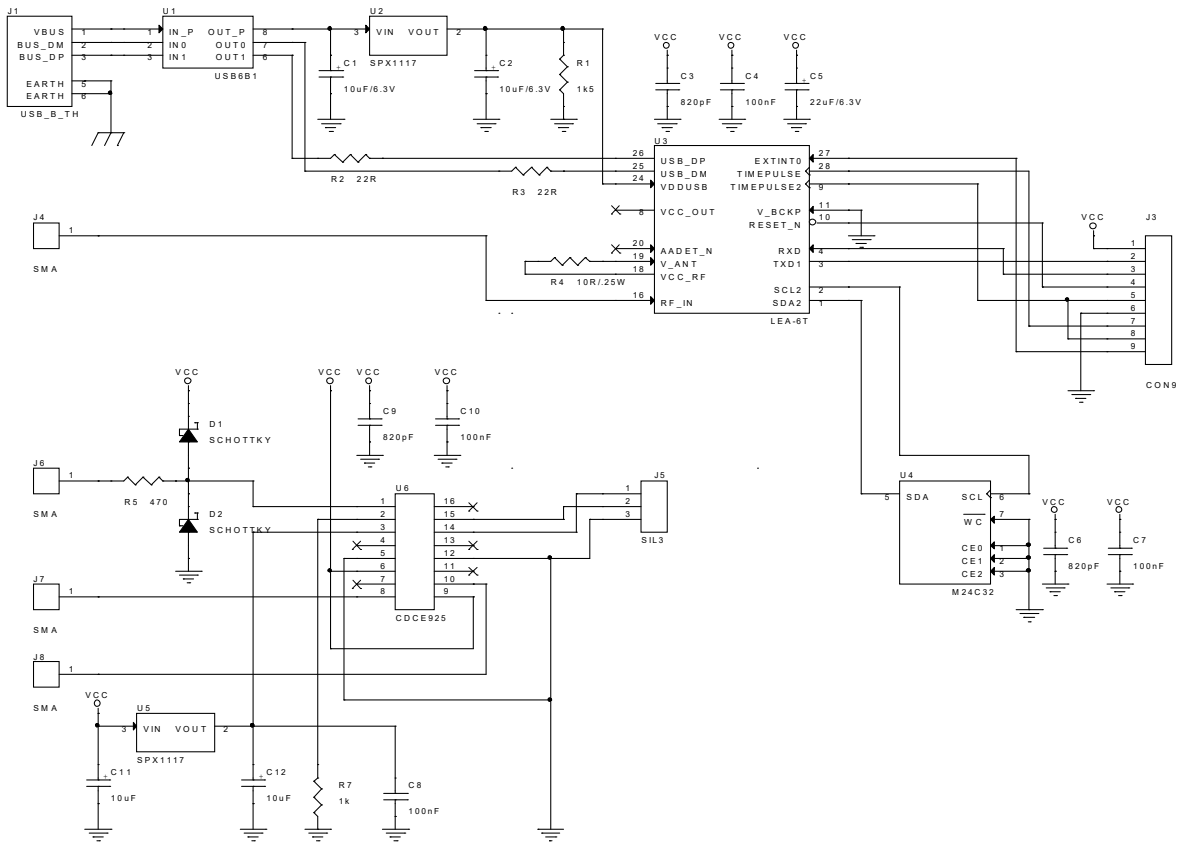
Obrázek 12.3. Fotografie aktivního modulu



Obrázek 12.4. Zapojení vstupů a výstupů



Obrázek 12.5. Schéma zapojení Ethernetové fyzické vrstvy



Obrázek 12.6. Schéma zapojení GPS

12.3. ISPCS 2012 a Plugfest

Jedná se o každoroční konferenci zabývající se přesným časem a synchronizací pro měření, řízení a telekomunikace. Konference začíná plugfestem a pokračuje odbornou částí ve formě prezentací produktů firem z oblasti časové synchronizace a prezentací odborných článků.

<http://www.ispcs.org/2012/index.html>

12.3.1. Plugfest 2012

Plugfest je třídenní workshop zabývající se synchronizací pomocí PTP. Na této akci se každoročně sejde více jak 50 firem a institucí z oblasti měření, řízení a telekomunikací. Hlavní náplní tohoto plugfestu je testování zařízení s podporou PTP. Jedná se o master clock, slave clock zařízení a také o switche s podporou tohoto protokolu.

<http://www.ispcs.org/2012/plugfest.html>

https://ispcs.iol.unh.edu/wiki/ISPCS_2012_Wiki



Obrázek 12.7 Plugfest v plném proudu

12.3.2. Test jednotek Grand Master a Slave

Jednotky Grand Master a Slave byly otestovány v několika předem definovaných profilech. Pro každý profil byla vytvořena dedikovaná síť s 12 – 25ti účastníky. Tento počet se měnil v průběhu testu. Každý profil měl určeny specifické testy. Vzhledem k obrovskému objemu přenášených dat si každý z účastníků si zpracovával výsledky svých jednotek.

Profil 1, General profile	
Síť	Testy
100Mbps Ethernet Layer 2 equivalent of Default profile (multicast) Peer to peer delay measurement Sync interval = 1 s Delay requests interval = 1 s Announce message interval = 2 s Announce time out = 3 s	Basic interoperability (both 1 and 2 step clocks) Best Master Clock Algorithm (BMCA) 1 step to 2 step conversion in switches Rogue master test Leap second Multiple time domains (time permitting) Alternative master (time permitting)
Profil 2, Power Profile	
Síť	Testy
Layer 2 100 Base-T Peer to peer delay measurement Sync interval = 1 s Peer delay requests interval = 1 s Announce message interval = 2 s Announce time out = 3 s Power profile TLVs	Basic interoperability TLV verification: Grandmaster ID, time Inaccuracy, ... Master change transients Sync direction change transients Alternative time offset test Interoperability with VLANs tags Coexistence with default profile ptp
Profil 3, Telecom Profile	
Síť	Testy
Gigabit Ethernet IPv4 End to end delay measurement Unicast Unicast discovery (reservation protocol) Sync rate = 1/64 s Delay request rate = 1/64 s Announce rate = 1 s Announce time out = 2 s	Basic interoperability Sync flow terminated early by master Sync flow terminated early by slave Master loading test Congestion test with network emulator Synchronous Ethernet test
Profil 4, General profile, volné testování	
Síť	Testy
100Mbps Ethernet Layer 2 equivalent of Default profile (multicast) Peer to peer delay measurement Sync interval = volitelně Delay requests interval = volitelně Announce message interval = volitelně Announce time out = volitelně	Basic interoperability Best Master Clock Algorithm (BMCA) Individual connection Communication overload

12.3.3. Výsledky

V následující tabulce jsou popsány výsledky jednotlivých testů. Testy byly vyhodnocovány pro Master a Slave moduly zároveň díky tomu, že obsahují shodný firmware. Pro popsání výsledku byl použit barevný kód. Zelená znamená splnění testu, modrá znamená splnění s ohledem na limitaci SW nebo HW a červené znamená nesplnění testu.

Profil 3 byl testován, ačkoliv není počítáno s využitím jednotky v tomto profilu, a to zejména z důvodů HW složitosti. Výsledky z toho profilu jsou pouze informativní*.

Profil	Test	Výsledek
1	Basic interoperability (both 1 and 2 step clocks)	Pouze 2 step
	Best Master Clock Algorithm (BMCA)	Ano
	1 step to 2 step conversion in switches	Pouze 2 step
	Rogue master test	RM ignorován
	Leap second	Ano
	Multiple time domains (time permitting)	Manuální volba
	Alternative master (time permitting)	Manuální volba
2	Basic interoperability	Ano
	TLV verification: Grandmaster ID, time Inaccuracy	Ano
	Master change transients	Ano
	Sync direction change transients	Ano
	Alternative time offset test	Ano
	Interoperability with VLANs tags	Ne
	Coexistence with default profile ptp	Ano
3	Basic interoperability	Pouze 100Mbps Ethernet*
	Sync flow terminated early by master	Ne*
	Sync flow terminated early by slave	Ne*
	Master loading test	Ano*
	Congestion test with network emulator	Ano*
	Synchronous Ethernet test	Není implementováno*
4	Basic interoperability	Ano
	Best Master Clock Algorithm (BMCA)	Ano
	Individual connection	Ano
	Communication overload	Ne

Výsledkem této série testů bylo nalezení dvou zásadních problémů, a to jednak zahlcení jednotky při větším objemu dat a omezená podpora VLAN. Tyto problémy je vhodné odstranit pro kompatibilitu s Power Profilem (2).

12.3.4. Kontaktované osoby a společnosti

V rámci plugfestu a následně konference byli kontaktováni tyto účastníci.

Jméno	Společnost	Téma diskuze
Roel de Vries	Arbiter	Návrh Grand Master modulu GPS přijímače pro průmyslové aplikace
Maciej Lipinski	CERN	Protokol White Rabbit Synchronizace po optických vláknech
Heiko Gerstung	Meinberg	Návrh Grand Master modulu
Rodney Greenstreet Rick Ratzel	National Instruments	Implementace jednotky pro synchronizaci pro PXI Test kvality synchronizace Ověření funkčnosti BMC algoritmu
Julien Ridoux Matthew Davis	University of Melbourne	Využití síťových karet s podporou PTP Algoritmus pro synchronizaci jednotek Synchronizace interní stupnice PC
Kang Lee	NIST	Budoucnost PTP Využití našich jednotek Návrhy pro zlepšení SW a HW
Eric Percival	Calnex	Pokračování diskuze využití měřicího systému Vzájemná spolupráce

Následně byla utvořena malá síť mezi společnostmi Arbiter, National Instruments a námi. V této síti byly testovány BMC algoritmus, správnost informací poskytovaných v oznamovacích zprávách a detekce „rogue“ mastera. Dále bylo testováno zahlcení jednotek náhodným provozem v síti. Díky měřicímu vybavení zástupců fy. National Instruments byla ověřena kvalita synchronizace jednotek. A to jak při kontinuálním provozu, tak při změně mastera.

12.3.5. Závěr

Ověření funkčnosti implementace PTP

Na plugfestu byly testovány naše funkční vzorky. Jednalo se o master clock, slave clock a PTP tester. Zařízení master a slave byly testovány v síti spolu s produkty ostatních firem. Potvrdila se funkčnost samotného PTP, včetně Best Master Algoritmu. Byly naměřeny záznamy komunikace pro další analýzu.

Diagnostikované problémy

V rámci testování byl objeven jeden problém. Jednalo se o zahlcení jednotky při vysokém počtu PTP zpráv za sekundu. Tento problém se vyskytoval pouze v telekomunikačním profilu, pro který jednotky nebyly navrženy. Navíc je tento problém možné odstranit filtrováním zpráv na nižší úrovni ISO modelu.

Záznam komunikace

Pro účely pozdějšího zpracování bylo provedeno několik záznamů komunikace s účastí našich modulů. Tyto záznamy slouží jako důležitý podklad pro vyhodnocení funkčnosti implementace PTP protokolu, a to pod zátěží odpovídající reálnému systému.

12.4. Software pro měření a kalibraci časových stupnic

12.4.1. Popis software

V průběhu realizace projektu je nutné provést řadu měření. Mnoho z nich trvá dlouhou dobu (řádově dny, nebo týdny). Měřicí přístroje lze ovládat vzdáleně přes různá rozhraní a je tedy možné vyčítat naměřenou hodnotu případně nahrávat přednastavení pro určité úkoly.

Většina přístrojů, které používáme, obsahuje jinou sadu ovládacích příkazů a jiné fyzické rozhraní pro jejich připojení. Na druhou stranu, měřicí úlohy, které nad nimi provádíme, jsou velice podobného charakteru. Většinou jde o nahrání konfigurace do přístroje před spuštěním odměru a následně periodické vyčítání naměřené hodnoty. Každý přístroj vrací jednu nebo více naměřených hodnot ve specifickém formátu a ten je třeba převést na jednotný formát vhodný pro další zpracování.

Aby byla celá knihovna jednoduše rozšiřitelná, je napsána objektově v jazyce Python. Jednotlivé typy komunikace jsou rozděleny do komunikačních tříd a jednotlivé modely přístrojů mají také své třídy. Tímto způsobem lze výsledné objekty vzájemně kombinovat.

12.4.2. Implementace knihovny

Knihovna je rozdělena na základní části do jednotlivých modulů: modul komunikace, modul přístrojů, modul měření a modul logování.

Modul komunikace

Modul komunikace sjednocuje přístup k jednotlivým rozhraním. Je podporováno rozhraní UART, Ethernet a GPIB. Každé z těchto rozhraní disponuje funkcemi pro otevření, zápis, čtení a uzavření komunikace.

Komunikační modul UART slouží k nastavení a realizaci komunikace po sériovém portu. Nastaví se požadovaná rychlost komunikace, oddělovač jednotlivých řádků/zpráv, případně další parametry. Komunikační modul Ethernet umožňuje navázat TCP spojení k přístroji na požadované adrese a portu. Komunikační modul GPIB umožňuje ovládat zařízení na sběrnici GPIB.

Komunikační moduly jsou vzájemně záměnné, protože implementují shodné API. Toho využívají moduly přístrojů, které mohou použít libovolný komunikační modul.

Modul přístrojů

Modul přístrojů sjednocuje přístup k jednotlivým přístrojům. Je možné implementovat jednorázové nastavení při připojení. Následně každý modul pro konkrétní přístroj obsahuje funkci pro zápis měřicího příkazu a pro vyčtení odpovědi. Knihovna obsahuje základní ovládání přístrojů: Čítač Picotest UA6200A, Rubidiový standard Stanford Research Systems FS725, Čítač Stanford Research Systems SR620, GPS uBlox LEA-6T.

Čítače například používají standard SCPI pro komunikaci a definici datových struktur, rubidiový standard a GPS ale používají zcela jiné protokoly.

Modul měření

Modul měření se stará o zautomatizování procesu vyčítání údajů ze zařízení. Jedná se v podstatě o šablonu, která je podle potřeby upravena pro konkrétní měření. Dělí se na základní části: inicializace přístrojů, periodické vyčítání hodnot, uzavření komunikace.

Modul logování

Modul logování je napsán pomocí interpretera BASH. Jedná se o jednoduchý nástroj, který umožní spustit měření na pozadí, hlídá, aby nikdo nespustil nové měření, dokud neukončí to předchozí a ukládá naměřená data do systematicky pojmenovaných souborů podle data vytvoření.

12.4.3. Použití

Použití knihovny spočívá v upravení šablony měření a navržení vlastního sledu měření. V první části se nejprve inicializují jednotlivé přístroje. To je možné provést jednoduchým zavoláním konstruktorů příslušných objektů.

```
d = Picotest(Ethernet("10.20.30.3", 5025))
```

V proměnné `d` máme nyní připojený přístroj Picotest UA6200A. Pokud potřebujeme zapsat příkaz pro měření, stačí zavolat následující příkaz.

```
d.write()
```

Načtení výsledku obstará jednoduchý příkaz, který také převede hodnotu do požadovaného formátu. V následujícím příkladu je výsledek přímo vytištěn na obrazovku.

```
print d.read()
```

Nejjednodušší skript pro periodické vyčítání hodnoty tak může vypadat například takto

```
d = Picotest(Ethernet("10.20.30.3", 5025))
while True:
    s.write()           #zapsani prikazu
    print d.read()     #cekani na vysledek a vypsani
```

Vzhledem ke zvolenému skriptovacímu jazyku je jednoduché program modifikovat a přidávat další přístroje. Celé měření se spustí pomocí příkazu `./run.sh`, který spustí měření na pozadí a na obrazovku začne vypisovat naměřená data. Program automaticky vytvoří soubor pro ukládání výsledků a aktuálně naměřená data zobrazuje i na standardní výstup. Program využívá sadu standardních unixových příkazů pro práci se standardním výstupem. Je použit program `screen`, pro spuštění úlohy na pozadí. Dále je použit program `tee` pro přesměrování výstupu do souboru a je použit program `tail` pro sledování zapisovaných dat. Tato architektura umožňuje na jedné straně bezpečné sledování měřených dat a na druhé straně umožňuje odhlášení aktuálního uživatele a měření na pozadí.

12.4.4. Knihovna pro zpracování dat

Knihovna je napsána jako ToolBox pro prostředí MATLAB. Skládá se z dílčích funkcí sloužících ke zpracování naměřených dat.

Allan deviation

Funkce allan slouží k výpočtu Allanovy odchyly.

Vstupy:

- data.freq: pole naměřených hodnot
- data.rate: konstantní rychlost vzorkování dat
- tau: pole hodnot tau, pro která se má provést výpočet

Výstupy:

- směrodatná odchyly
- Allan deviation
- Overlapping Allan deviation
- Modified Allan deviation
- Timed Allan deviation

Nahrazení hodnot NaN v datech

- inpaint_nan: Funkce do 1D pole dopočte hodnoty, které jsou NaN. Využívá k tomu řešení rovnice.
- naninterp: Funkce provede kubickou interpolaci dat a nahradí NaN

Metriky

- MTIE: Výpočet metriky Maximum Time Interval Error pro zvolená Tau.
- TIE RMS: Výpočet metriky Time Interval Error RMS

Tauspace

Vytvoření pole hodnot tau pro funkce MTIE, TIE_RMS a Allan. Hodnoty tau jsou automaticky vypočteny podle zvolených kritérií a podle předložených dat.

- Auto: Vytvoří N tau pro pokrytí celého datového vzorku
- Decade: Vytvoří hodnoty tau po dekadách
- Octave: Vytvoří hodnoty tau po oktávách

plot_opt

Funkce slouží výpisu velkého množství dat. Z dat jsou vybrána minima a maxima po určitém intervalu tak, aby se vizuální podoba grafu nezměnila, ale aby obsahovala menší množství datových bodů, to je hodné pro export do vektorových formátů.

12.5. Sleepy Cat IDE

Vývojové prostředí Sleepy Cat IDE, SC-IDE, vzniklo jako odpověď na neexistenci programátorsky přívětivého vývojového prostředí pro mikrokontroléry. Všechna dosud existující vývojová prostředí nedisponovala komfortem, na který je zvyklý například programátor z PC platformy.

Vývojové prostředí vzniklo za podpory grantu FRVŠ 2011/2011. Zásluhou tohoto grantu vzniklo vývojové prostředí pro výuku mikroprocesorové techniky. Díky dobré použitelnosti byly všechny další funkční vzorky, nástroje a knihovny pro mikrokontroléry programovány v tomto prostředí.

Vývojové prostředí umožňuje základní strukturování projektu do virtuálních složek a tím např. rozlišit jednotlivé knihovny. Lze tak mít přehledně v jednom projektu více různých knihoven. Častá vada různých vývojových prostředí je, že není možné mít dva soubory se stejným názvem, ale v jiných adresářích. Při kompilaci nastane kolize a projekt nelze celý sestavit. V tomto prostředí je to elegantně vyřešeno tak, že každý soubor se kompiluje do vnořené složky podle adresáře, ve kterém je uložen. Tím je zaručena bezkolizní kompilace souborů se stejným názvem ale v různých knihovnách.

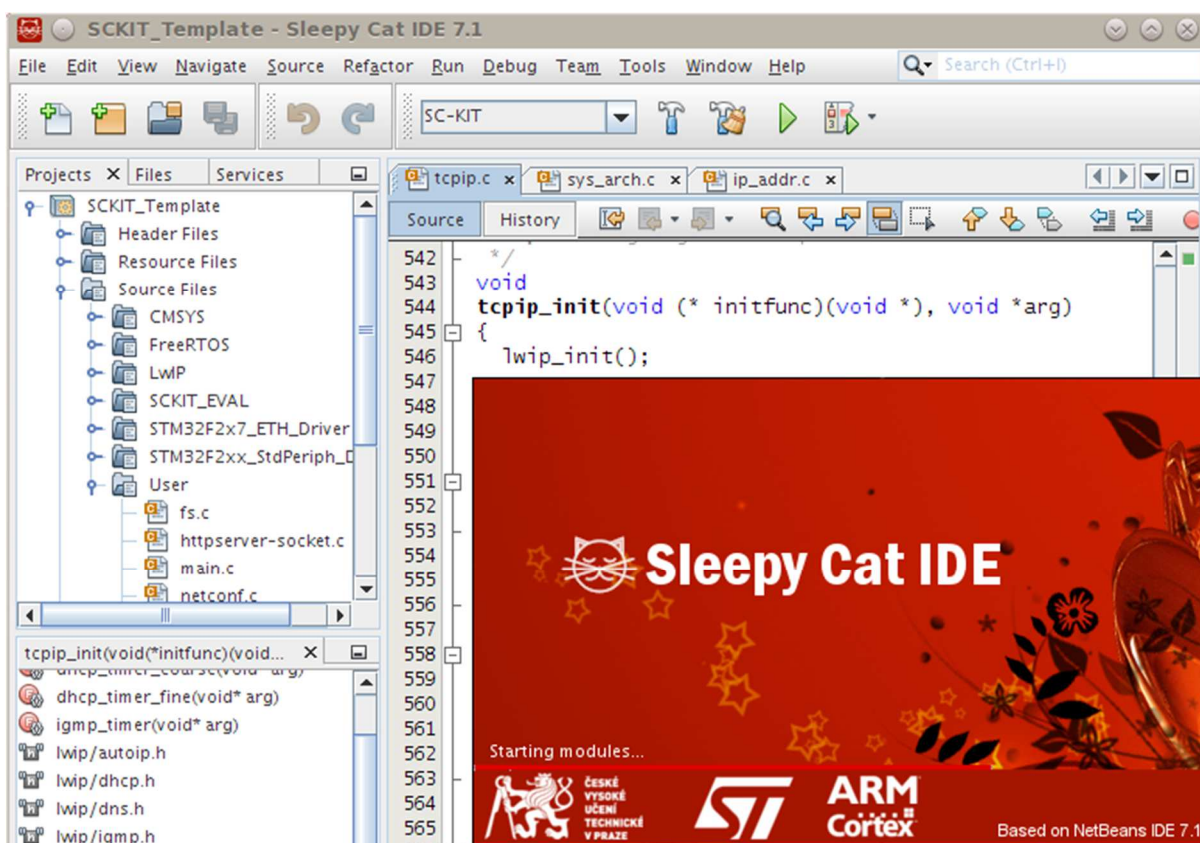
Vývojové prostředí disponuje sadou kompilačních profilů, lze tak jednoduše přepínat různé varianty sestavení. Typické využití je sestavení pro produkční nastavení nebo pro ladění. Tyto profily lze ale využít i pro vytváření binárního firmware pro různé typy hardware, který sdílí stejný kód, ale liší se jen několika direktivami preprocesoru.

Všechny soubory projektu jsou využity pro generování automatického doplňování. Není tak třeba pamatovat si přesné názvy funkcí v projektu nebo používat vyhledávání. Při otevření souboru lze navíc použít navigátor, díky kterému lze zobrazit seznam všech funkcí, proměnných a datových typů a jednoduše je v souboru lokalizovat.

Lze definovat vzory pro automatické generování kódu pro různé zkratky. Po zapsání např. `/**<Enter>` nad deklarací funkce se vytvoří automaticky komentář dané funkce a připraví se položky pro jednotlivé parametry a návratovou hodnotu. Komentáře se generují ve formátu JavaDoc a lze pomocí nich vygenerovat dokumentaci ke zdrojovým kódům.

Vývojové prostředí disponuje funkcí ladění kódu, kdy lze přidávat kukátka na proměnné. Lze kód kdykoli zastavit a pouhým najetím myši na proměnnou se zobrazí její hodnota. Lze přidávat breakpoint, který slouží k zastavení programu při průchodu daným místem a watchpoint, který slouží k zastavení programu při čtení/zápisu paměťového místa.

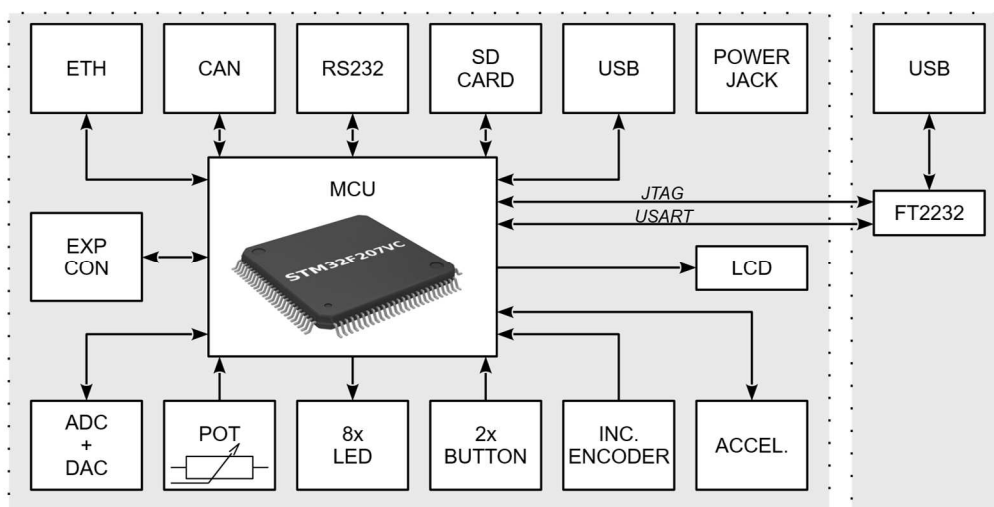
Při ladění lze zobrazovat běžící procesy podporovaných RTOS včetně základní diagnostiky obsazené paměti apod.



Obrázek 12.8: Sleepy Cat IDE

12.6. Sleepy Cat KIT

Za podpory grantu FRVŠ 2011/2011 vznikl vývojový kit pro výuku mikroprocesorové techniky s mikrokontrolérem ARM Cortex-M3. Vývojový kit disponuje integrovaným JTAG adaptérem pro nahrávání a ladění kódu a integrovaným USB/UART převodníkem pro přímé vypisování ladících informací. Jak JTAG, tak převodník UART/USB jsou vyvedeny do společného USB, ze kterého je možné kit napájet. Stačí tedy pouze jeden propojovací kabel.



Obrázek 12.9: Blokové schéma Sleepy Cat KITu

Na obrázku 12.9 je znázorněno blokové schéma a všechny vyvedené periferie. Pro tuto práci je především důležitý expanzní konektor, který bylo možné použít pro připojení externí ethernetové PHY. Díky tomu se tento kit stal platformou pro vývoj zařízení s přesnou časovou synchronizací jak přímo na procesoru, tak i s využitím speciální ethernetové PHY.

Na obrázku 12.10 je vidět fotografie výsledného kitu. Zajímavé jsou na něm integrovaný maticový displej a analogové vstupy a výstupy vyvedené přes BNC konektory. Veškeré expanzní konektory byly řešeny tak, aby je nebylo snadné zničit.

Vývojový kit byl vybaven vlastním vývojovým prostředím, které je popsáno v kapitole 12.5. Aby se studentům s kitem dobře pracovalo, byl vybaven i krabičkou na přenášení, do které se vešel kit, napájecí zdroj, kabeláž a případně malé nepájivé pole. Krabička s kitem je vyobrazena na obrázku 12.11.

Pro studenty vznikly i podklady pro výuku a zadání úloh. Za dobu výuky vzniklo mnoho zajímavých úloh, zejména osciloskop ve webovém rozhraní, magická kreslicí tabulka, automaticky generované bludiště ovládané nakláněním desky, zobrazení jednoduché obrázkové prezentace apod.

Pro kit byly dostupné vzorové příklady. Byly zprovozněny vzorové příklady od STMicroelectronics na ovládání periferií. Byl vytvořen příklad na komunikaci po TCP/IP – jednoduchý webserver a byl vytvořen příklad pro použití operačního systému FreeRTOS na kitu.



Obrázek 12.10: Sleepy Cat KIT



Obrázek 12.11: Krabička pro přenášení kitu pro studenty