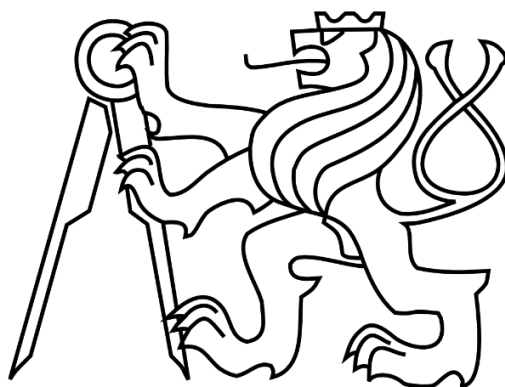


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra měření



Bakalářská práce

Použití GNSS modulů uBlox pro měření času a frekvence

Adéla Nováková

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

Studijní program: Kybernetika a Robotika

Obor: Senzory a přístrojová technika

2017

Čestné prohlášení

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

V Praze dne

.....

Podpis autora práce

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce, panu doc. Ing. Jaroslavu Roztočilovi, CSc., za vedení této práce a za neuvěřitelnou trpělivost, s jakou se této nelehké role chopil.

Dále děkuji panu Ing. Vojtěchu Vignerovi za konzultace a pomoc při řešení obtížností spojenými s vyhotovením této práce.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Adéla Nováková**

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

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

Název tématu anglicky: **Use of u-blox GNSS Modules for Time and Frequency Measurement**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte programové vybavení pro funkční vzorky etalonů času s GNSS moduly uBlox LEA-6T a LEA-M8T. Etalony vyzkoušejte v Laboratoři přesného času FEL ČVUT. Na základě měření určete nejistotu generování pulsů 1 PPS vůči časové stupnici FEL Time. Provedte analýzu dosažitelné přesnosti měření a pokuste se identifikovat jednotlivé zdroje nejistot.

Seznam odborné literatury:

- [1] NEO/LEA-M8T Data Sheet Document. No. UBX-14006196. uBlox, 09-Oct-2015.
- [2] M. A. Lombardi, L. M. Nelson, A. N. Novick and V. S. Zhang: Time and Frequency Measurements Using the Global Positioning System. Cal Lab: The International Journal of Metrology, 2001.
- [3] J. Levine: Introduction to Time and Frequency Metrology. REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, vol. 70, no. 6, pp. 2567 – 2596, 1999.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jaroslav Roztočil, CSc.**

Datum zadání bakalářské práce: **14. prosince 2015**

Platnost zadání do¹: **30. září 2017**



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



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 14. 12. 2015

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je navrhnout a vytvořit programové vybavení pro laboratoř přesného času FEL ČVUT. Tento program slouží ke komunikaci s GNSS modulem uBlox LEA-6T. Program je schopný komunikovat s GNSS modulem, měnit nastavení tohoto modulu, přijímat zprávy odeslané z modulu a následně tato data ukládat do souboru. Software je napsán v jazyce C, ve vývojovém prostředí LabWindows/CVI. Ze změřených dat je určena nejistota generování pulsů 1 PPS oproti časové stupnici FEL Time.

Klíčová slova

Etalon, GNSS, GPS, LabWindows/CVI, měření času, uBlox

Abstract

The aim of this bachelor project is to design and develop software for the laboratory of precise time at FEE CTU. This software is to communicate with GNSS module uBlox LEA-6T. Program is able to communicate with GNSS module, change its settings, receive messages and store those data into a file. Application is written in C language, in LabWindows/CVI development environment. The uncertainty of a pulse generation of 1 PPS is determined from acquired data and will be compared to the FEL Time time scale.

Key words

GNSS, GPS, LabWindows/CVI, standard, time measurement, uBlox

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Teorie měření času a frekvence	2
3. Prostředky pro měření času	3
3.1. Etalon času.....	3
3.2. GPS (GNSS) moduly.....	4
3.2.1. Metody měření času GPS přijímači.....	4
3.2.2. uBlox LEA-6T	4
3.2.2.1. Time Mode	5
Disabled (Zakázaný režim).....	5
Survey-In (Vyhledávání pozice)	5
Fixed Mode (Fixní režim).....	5
3.2.2.2. UBX Protokol.....	6
3.2.2.3. UBX identifikátory zpráv (Class a Message ID)	7
3.2.2.4. Kontrolní součet zpráv UBX	7
4. Použité zprávy UBX	7
4.1. NAV-SOL (Navigation Solution Information).....	7
4.2. NAV-TIMEGPS (GPS Time Solution).....	8
4.3. TIM-SVIN (Survey-In Data).....	9
4.4. TIM-TM2 (Time Mark Data).....	9
4.5. TIM-TP (Timepulse Timedata)	10
4.6. CFG-TMODE (Time Mode Settings).....	10
4.7. CFG-TMODE2 (Time Mode Settings 2)	11
4.8. CFG-TP (Get/Set TimePulse Parameters).....	11
5. Zapojení měřicí soustavy.....	12
6. Popis programu:.....	13
6.1. Struktura programu	13
Soubory uBloxu (uBlox.c, uBlox.h).....	13
Soubory pro zpracování zpětných volání (Event_Handling.c, Event_Handling.h)	13
Soubory grafického uživatelského rozhraní (GUI.uir, GUI_Handling.c, GUI_Handling.h, GUI.h)	13
6.2. Měřicí algoritmus	14
6.3. Popis GUI	15
7. Vyhodnocení naměřených dat	18
8. Závěr	20
9. Zdroje	21

1. Úvod

Čas je veličina, jež je důležitá nejen ve vědě, tak i v běžném životě. Čas se zaznamenával a určoval již od pravěku, kdy se k určení aktuálního období využívalo pravidelně se opakujících přírodních jevů, jako například pozice Slunce, Měsíce a hvězd. Tyto metody určování času ale nebyly přesné, a proto s postupným vývojem civilizace se vyvíjí i technika pro měření času. Od slunečních hodin, přes mechanické hodiny, až po atomové hodiny. Obzvláště v moderní době, se zvyšováním tempa životního stylu lidské rasy, přibývá i nárok na přesnost určení času a finanční dostupnost zařízení pro měření času s danou přesností měření.

V práci se zaměřím na princip měření času pomocí atomových hodin, které disponují prvenstvím v přesnosti měření, a to nejen mezi zařízeními pro měření času, ale i mezi etalony obecně. Následně rozeberu možnost měření času s pomocí GPS přijímačů. Poukážu na konkrétní model GPS přijímače LEA-6T, který sloužil jako testovací zařízení pro vývoj měřicího softwaru, a popíšu jeho hlavní funkční vybavení, díky němuž se tento modul stává vhodným adeptem pro přesná měření času.

V druhé části práce popíšu realizaci programového vybavení pro účely přesného měření času pomocí GPS přijímače.

Na závěr práce vyhodnotím nejistotu generování stupnice GPS Time vůči referenční časové stupnici FEL Time.

2. Teorie měření času a frekvence

Z fyzikálního hlediska se jedná o jednu ze sedmi základních veličin, vyjadřující následnost událostí a umožňující vyjádření změn a pohybů. Má jednotku s (sekunda), která je časovým intervalem, definovaným jako doba trvání 9 192 631 770 period záření, které odpovídá přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cesia 133.^[5]

S pomocí času, jakožto základní veličiny, lze odvodit některé další veličiny, jako například metr, coulomb, a další.

Pojem „čas“ taktéž používáme, pokud máme na mysli dobu mezi dvěma jevy, takzvaný časový interval.

Čas (nebo, přesněji řečeno, časový interval) lze ze všech základních veličin změřit nejpřesněji. Díky cesiovým hodinám lze při měření dosáhnout relativní přesnosti až 2×10^{-14} .^[1] Což znamená, že takovéto hodiny by se za zhruba 14 miliónů let rozcházely nejvýše o dvě sekundy. Jedná se o nejpřesnější standard, jaký k dnešnímu dni existuje.

Frekvence (též kmitočet) je fyzikální veličina, která udává počet opakování periodického děje za daný časový úsek. Její jednotka Hz (Hertz) je pak určena odvozením z definice sekundy, jako počet periodicky se opakujících dějů za jednu sekundu.

^[5] (Howe, 1979)

^[1] (Levine, 1999)

3. Prostředky pro měření času

Nejpřesnějším zařízením pro měření času jsou atomové hodiny. Jejich princip je založen na využití přechodu elektronu v atomovém obalu ze stavu s nižší energií do stavu s vyšší energií. Atomové hodiny obsahují elektrický oscilátor, který budí mikrovlnné elektromagnetické pole s danou frekvencí. Na vstup k rezonátoru s elektromagnetickým polem jsou přivedeny atomy, jež elektromagnetické pole při průchodu rozděluje na „slabé magnety“ a „silnější magnety“. Atomy s elektrony ve stavu s nižší energií jsou vpuštěny do dutiny rezonátoru. Pokud je frekvence oscilátoru správná, přejdou elektrony v atomech pohlcením fotonů do stavu s vyšší energií. Za rezonátorem jsou atomy opět děleny magnetem. Atomy ve stavu s vyšší energií jsou poslány na detektor. Při správném nastavení frekvence oscilátoru na detektor dopadá intenzivní tok atomů. Pokud frekvence není nastavena správně, není na detektoru signál a je třeba měnit frekvenci oscilátoru tak, abychom získali největší možný signál. Udrží se tak velmi stabilní přesná frekvence a počítáním kmitů dostáváme velmi přesný časový údaj. Doposud nepřesnější zjištěná frekvence přechodu elektronu je v atomu cesia, proto se tento prvek využívá k definici sekundy.^[3]

Atomové hodiny jsou ale velmi nákladným a náročným zařízením, proto je důležité najít řešení, kterým by se dal měřit čas s přesností (blízkou) atomových hodin, ale s výrazně nižšími pořizovacími náklady.

GPS, neboli Global Positioning System, přestože jeho základním účelem je určování polohy, se taktéž stal primárním systémem pro přenos přesného času, časových intervalů a frekvence. Každý satelit obsahuje své vlastní atomové hodiny a informaci o přesném čase vysílání signálu zasílá přijímačům spolu s údaji o poloze. Právě pro tento fakt se začaly vyrábět GPS přijímače, které jsou přizpůsobené pro přesné měření času. GPS přijímače se tak stávají významnými prvky v telekomunikačních sítích a kalibračních a testovacích laboratořích. Díky nim je možná synchronizace hodin a kalibrace oscilátorů v jakémkoliv objektu, kde lze umístit ven anténu, která by přijímala GPS signál.

3.1. Etalon času

Jako referenční stupnice pro vyhodnocení odchylky stupnice GPS Time byla použita lokální časová stupnice FEL Time. Tato časová stupnice je generována cesiovým normálem HP5071A. Stupnice je porovnávána se stupnicí UTC(TP)¹ generovanou Státním etalonem času a frekvence ČR, respektive s dalšími stupnicemi, především se stupnicí UTC(PTB)². Etalon umožňuje kontinuální měření odchylky GPS stupnice od lokální časové stupnice pomocí interního čítače LEA-6T.

Porovnání se realizuje pomocí přijímače GTR-51 metodou Common View.

^[3] (Wagner, nedatováno)

¹ UTC(TP) = Coordinated Universal Time, Tempus Pragense; Pražský koordinovaný čas, jenž je udržován ve shodě se světovým koordinovaným časem UTC

² UTC(PTB) = Coordinated Universal Time, Physikalisch-Technische Bundesanstalt;

GTR51 je aparatura, určená pro porovnávání časových stupnic. Zařízení využívá signály družicových navigačních systémů GPS, GLONASS, GALILEO a SBAS. Aparatura je určena především pro porovnávání primárních etalonů času a frekvence, provozovaných v metrologických laboratořích. Nachází však uplatnění i v řadě jiných aplikací, kde je třeba udržovat velmi přesný jednotný čas na velkém území, tj. typicky v telekomunikacích. Zařízení podporuje současné zpracování celkem třinácti signálů v pěti různých frekvenčních kanálech, a to jak měření zpoždění dálkoměrného kódu, tak měření fáze nosné vlny. Díky velké šířce pásma přijímače je zajištěna sub-nanosekundová přesnost i v případě kódového měření.

3.2. GPS (GNSS) moduly

GPS přijímačů používaných v metrologii je nesčetně různých modelů, všechny ale fungují na stejném principu. GPS satelity vysílají signál na dvou nosných frekvencích: L1 na frekvenci 1575.42 MHz a L2 na frekvenci 1227.6 MHz. Většina přijímačů, pro použití v metrologii, využívá C/A³ kódu na frekvenci L1 jako referenci pro měření času a frekvence. Většina přijímačů sleduje 8 až 12 satelitů a získává z nich údaje o čase a frekvenci. Z těchto údajů pak odvozují výslednou informaci, která je průměrem hodnot od všech satelitů, jež přijímač vidí. Většina těchto přijímačů má elektrický výstup, jenž generuje pulsy 1 PPS⁴. Tyto pulsy lze snadno synchronizovat s UTC, zavedením konstantního zpoždění, jež kompenzuje zpoždění antény, přijímače a kabelového propojení.

3.2.1. Metody měření času GPS přijímači

Existují tři hlavní kategorie pro měření času a frekvence GPS přijímači: One-way, Common View a Carrier Phase.

3.2.2. uBlox LEA-6T

Jako funkční GNSS modul pro příjem časové značky byl pro práci vybrán modul uBlox LEA-6T. Jedná se o modul z rodiny samostatných GPS přijímačů s vysoce výkonným polohovacím enginem u-blox 6, který je navržen pro použití se stacionární anténou a přizpůsoben k přesnému měření času.

Tento modul má speciální režim Time Mode, který zajišťuje vysokou přesnost měření času. V tomto režimu GPS přijímač předpokládá stacionární 3D polohu, jež může být nastavena buď manuálně, nebo může být určena z vlastního hledání polohy GPS přijímače v režimu Survey-In.

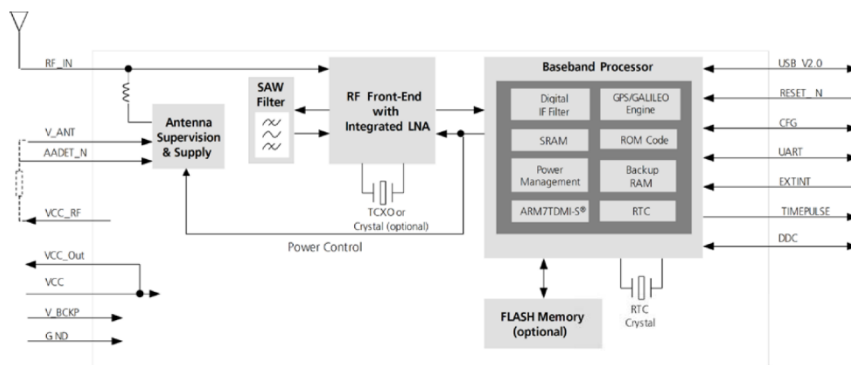
Pomocí vestavěné časové značky a vestavěného čítače lze provádět přesná měření času externích vstupních událostí. Tento konkrétní model také disponuje dvěma výstupy časových pulsů, které mohou být nastaveny v rozpětí 0,25 Hz až 10MHz. Výstupy tak lze použít například jako 1 PPS

³ C/A = Coarse Acquisition code; Kód, pod kterým předávají satelity na frekvenci L1 své zprávy.

⁴ 1 PPS = 1 Pulse per Second; Výstup generuje puls každou sekundu.

synchronizační puls a druhý jako referenční frekvence pro megahertzové pásmo. Časový puls v megahertzovém pásmu poskytuje vynikající dlouhodobou přesnost a stabilitu kmitočtu.

Při využití informace o chybě kvantování tak, aby se kompenzovala zrnitost časového pulsu, lze dosáhnout přesnosti měření až 15ns.^[7]



Obrázek 1 Blokový diagram GPS modulu LEA-6T

3.2.2.1. Time Mode

Time Mode může být, pomocí zpráv CFG-TMODE a CFG-TMODE2, nastaven do tří různých režimů:

Disabled (Zakázaný režim)

Nastaví modul do výchozí PVT⁵ činnosti.

Survey-In (Vyhledávání polohy)

GPS přijímač v rámci definovaného časového intervalu počítá údaj o průměrné pozici, dokud nedosáhne předdefinované maximální standardní odchylky, nebo nevyprší čas. Následně je přijímač automaticky přenastaven do fixního režimu (Fixed Mode) a funkce pro měření času jsou aktivovány.

Fixed Mode (Fixní režim)

Tento režim předpokládá fixní 3D polohu a znalost standardní odchylky. Funkce pro měření času jsou aktivovány. Fixní režim může být aktivován dvěma způsoby. Buď přednastavením souřadnic polohy v ECEF⁶ formátu do přijímače, nebo vyhledáním polohy v režimu Survey-In. Ve fixním režimu je časový puls GPS přijímače zbaven chyby z polohování a je možné získávat platná data i jen z jediného satelitu.

^[7] (u-blox 6 Receiver Description including Protocol Specification Document, 18-Apr-2013)

⁵ PVT = Position, Velocity and Time; česky pozice, rychlost a čas

⁶ ECEF = Earth Center Earth Fixed; Kartézský souřadnicový systém, sloužící k vyjádření polohy těles vůči Zemi.

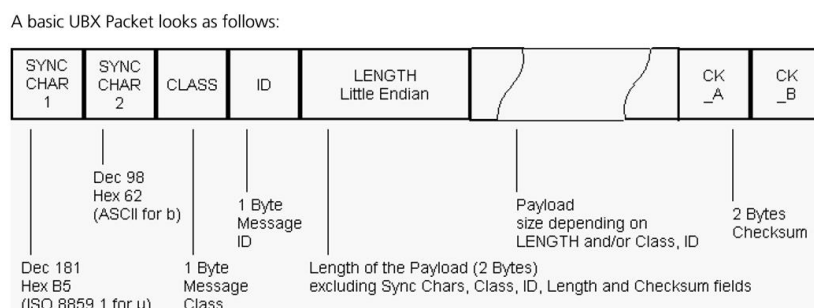
3.2.2.2. UBX Protokol

GPS přijímače uBlox používají vlastní patentovaný protokol pro přenos GPS dat do hostitelského počítače a pro změny nastavení přijímače, využívající asynchronní sériovou komunikaci. Klíčové vlastnosti tohoto protokolu jsou:

- Kompaktnost – protokol využívá 8-bitová binární data
- Kontrolní součet – protokol využívá nízko-nákladového algoritmu kontrolního součtu
- Modularita – protokol využívá dvoufázový identifikátor zpráv (Class a Message ID)

Pro komunikaci s uBloxem program využívá UBX zpráv, pomocí nichž lze například přenastavovat posílání dat z GPS modulu nebo změnit aktuální režim pro měření času.

UBX zprávy jsou posílány v následujícím tvaru:



Obrázek 2 Struktura zprávy UBX

Každá zpráva sestává z:

- Dvou úvodních synchronizačních bytů (0xB5 a 0x62, reprezentující znaky mikro a B).
- 1 byte pro třídu (Class) - třída definuje základní podskupinu, do které zpráva patří.
- 1 byte pro ID zprávy – definuje typ zprávy, která následuje.
- 2-bytové pole s informací o délce zprávy. (Jedná se o informaci pouze o délce pole vlastní zprávy. Tato informace nezahrnuje synchronizační byty, třídu, ID, ani kontrolní součty.)
- Obsah zprávy (Payload) má proměnlivou velikost pole, kterou udává informace o délce zprávy (length).
- CK_A a CK_B jsou 16-ti bitové kontrolní součty.

Pro případ nastavení parametrů přijímače, vztahujících se k dané zprávě, je pole Payload vyplněno hodnotami podle detailního popisu zpráv v sekci níže. V případě požadavku na vyčítání dat z přijímače je pole Payload prázdné a délka zprávy je nastavena na nulu.

3.2.2.3. UBX identifikátory zpráv (Class a Message ID)

Zprávy UBX, které spolu obsahově souvisí, jsou seskupeny dohromady a jednotlivé podskupiny jsou pak rozlišeny podle identifikátoru třídy. Následující tabulka ukazuje jednotlivé třídy a popisuje zprávy v nich obsažené.

Jméno	Třída	Popis
NAV	0x01	Navigační data: pozice, rychlost, čas, přesnost, aktivní satelity, řídnutí přesnosti
RXM	0x02	Zprávy správce přijímače: stav satelitů, stav RTC ⁷
INF	0x04	Informační zprávy: Výpisové zprávy typu chyba, varování, oznámení
ACK	0x05	Potvrzovací zprávy konfiguračních zpráv CFG
CFG	0x06	Vstupní konfigurační zprávy: konfigurace přijímače a výpis aktuálních hodnot konfigurace
MON	0x0A	Monitorovací zprávy: Komunikační stav, zatížení CPU ⁸ , využití zásobníku, stav úloh
AID	0x0B	Pomocné zprávy AssistNow
TIM	0x0D	Zprávy měření času: Výstup časového pulsu, výsledky časové značky
ESF	0x10	Zprávy externího senzoru: měření externím senzorem a informace o stavu

Tabulka 1 Tabulka tříd zpráv UBX

3.2.2.4. Kontrolní součet zpráv UBX

Pro ověření správného přijetí zprávy, ať už na straně přijímače, nebo na straně operačního počítače, se používá dvou hodnot kontrolního součtu na konci každé zprávy. Tyto hodnoty jsou vypočítané za použití algoritmu Fletcherova kontrolního součtu přes packet zprávy začínající polem třídy (včetně) a končící s koncem obsahu zprávy (payload).

4. Použité zprávy UBX

Následuje detailní popis zpráv, jež jsou využity v práci pro nastavení získávání údajů o měření času.

4.1. NAV-SOL (Navigation Solution Information)

Tato zpráva obsahuje údaje o pozici, rychlosti a časovém řešení ve formátu ECEF, včetně údajů o přesnosti.

Header	ID	Length (Bytes)	Payload	Checksum
0xB5 0x62	0x01 0x06	52	Viz níže	CK_A CK_B

Data zprávy (Payload):

- iTOW (4 byty): Milisekundový údaj o GPS Time of Week

⁷ RTC = Real-Time Clock; česky hodiny reálného času

⁸ CPU = Central Processing Unit; česky centrální výpočetní jednotka

- fTOW (4 byty): Frakční zbytek ze zaokrouhlení iTOW v ns, rozsah -500000 .. 500000
- week (2 byty): GPS week (čas GPS)
- gpsFix (1 byte): GPSfix, rozsah 0..5
 - 0x00 = No Fix
 - 0x01 = Dead Reckoning only
 - 0x02 = 2D-Fix
 - 0x03 = 3D-Fix
 - 0x04 = GPS + dead reckoning combined
 - 0x05 = Time only fix
 - 0x06..0xFF: rezervováno
- Flags (1 byte): Vlajky pro Fix Status (GPSfixOK, DiffSoln, WKNSET, TOWSET)
- ecefX (4 byty): ECEF X souřadnice
- ecefY (4 byty): ECEF Y souřadnice
- ecefZ (4 byty): ECEF Z souřadnice
- pAcc (4 byty): Odhad přesnosti určení 3D polohy
- ecefVX (4 byty): ECEF X rychlost
- ecefVY (4 byty): ECEF Y rychlost
- ecefVZ (4 byty): ECEF Z rychlost
- sAcc (4 byty): Odhad přesnosti pro rychlost
- pDOP (2 byty): DOP⁹ určení polohy
- reserved1 (1 byte): Rezervovaný byte
- numSV (1 byte): Počet aktivních satelitů
- reserved2 (4 byty): Rezervované byty

4.2. NAV-TIMEGPS (GPS Time Solution)

Tato zpráva obsahuje informace o čase GPS, získané GPS přijímačem ze satelitů.

Header	ID	Length (Bytes)	Payload	Checksum
0xB5 0x62	0x01 0x20	16	Viz níže	CK_A CK_B

Data zprávy (Payload):

- iTOW (4 byty): Milisekundový údaj o GPS Time of Week
- fTOW (4 byty): Frakční zbytek ze zaokrouhlení iTOW v ns, rozsah -500000 .. 500000
- week (2 byty): GPS week (čas GPS)
- leapS (1 byte): Leap seconds¹⁰ (pro převod GPS-UTC)

⁹ DOP = Dilution of Precision; česky řídnutí přesnosti

- valid (1 byte): Vlajky platnosti (Valid Time of Week, Valid Week Number, Valid Leap Seconds)
- tAcc (4 byty): Odhad přesnosti určení času

4.3. TIM-SVIN (Survey-In Data)

Tato zpráva obsahuje informace o parametrech vyhledávání polohy.

Header	ID	Length (Bytes)	Payload	Checksum
0xB5 0x62	0x0D 0x04	28	Viz níže	CK_A CK_B

Data zprávy (Payload):

- dur (4 byty): Čas uplynulý od začátku režimu Survey-In
- meanX (4 byty): Aktuální střední hodnota souřadnice ECEF X v režimu Survey-In
- meanY (4 byty): Aktuální střední hodnota souřadnice ECEF Y v režimu Survey-In
- meanZ (4 byty): Aktuální střední hodnota souřadnice ECEF Z v režimu Survey-In
- meanV (4 byty): Aktuální střední hodnota rozptylu 3D pozice v režimu Survey-In
- obs (4 byty): Platný čas, uplynulý během Survey-In
- valid (1 byte): Vlajka označení platnosti pozice v režimu Survey-In
- active (1 byte): Vlajka označení aktivního režimu Survey-In
- reserved1 (2 byty): Rezervované byty

4.4. TIM-TM2 (Time Mark Data)

Tato zpráva obsahuje informace pro vysoce přesné časové značkování (time stamping) / počítání pulsů. Do výsledných údajů o čase, poskytovaných touto zprávou, jsou započteny také údaje o zpoždění a časové základně, které lze nastavit ve zprávě CFG-TP (viz níže).

Header	ID	Length (Bytes)	Payload	Checksum
0xB5 0x62	0x0D 0x03	28	Viz níže	CK_A CK_B

Data zprávy (Payload):

- ch (1 byte): Označení kanálu 0 nebo 1
- flags (1 byte): Bitmaska
- count (2 byty): Čítač náběžných hran
- wnR (2 byty): Číslo týdne poslední náběžné hrany
- wnF (2 byty): Číslo týdne poslední sestupné hrany

¹⁰ Skokové sekundy; Jedná se o kompenzaci nepravidelné rychlosti rotace země

- towMsR (4 byty): TOW¹¹ náběžné hrany
- towSubMsR (4 byty): Milisekundová část TOW při náběžné hraně v ns
- towMsF (4 byty): TOW sestupné hrany
- towSubMsF (4 byty): Milisekundová část TOW při sestupné hraně v ns
- accEst (4 byty): Odhad přesnosti

4.5. TIM-TP (Timepulse Timedata)

Tato zpráva obsahuje informace pro velmi přesné měření času. Obsah této zprávy je platný, pouze pokud je hodnota časového pulsu nastavena na jeden puls za sekundu.

Header	ID	Length (Bytes)	Payload	Checksum
0xB5 0x62	0x0D 0x01	16	Viz níže	CK_A CK_B

Data zprávy (Payload):

- towMs (4 byty): Time of week časového pulsu podle časové základny
- towSubMs (4 byty): Submillisekundová část TOWMS
- qErr (4 byty): Chyba kvantování časového pulsu
- week (2 byty): Číslo týdne časového pulsu podle časové základny
- flags (1 byte): Bitmaska (timebase GPS/UTC, utc availability)
- reserved1 (1 byte): Rezervovaný byte

4.6. CFG-TMODE (Time Mode Settings)

Pomocí této zprávy lze vyčítat nebo nastavovat parametry režimu Time Mode.

Header	ID	Length (Bytes)	Payload	Checksum
0xB5 0x62	0x06 0x1D	28	Viz níže	CK_A CK_B

Data zprávy (Payload):

- timeMode (4 byty): Přenastaví aktuální režim pro měření času:
 - 0 = Disabled
 - 1 = Survey-In
 - 2 = Fixed Mode
- fixedPosX (4 byty): Nastaví fixní pozici souřadnice X v ECEF formátu
- fixedPosY (4 byty): Nastaví fixní pozici souřadnice Y v ECEF formátu
- fixedPosZ (4 byty): Nastaví fixní pozici souřadnice Z v ECEF formátu
- fixedPosVar (4 byty): Nastaví fixní 3D odchylku

¹¹ TOW = Time of Week

- svinMinDur (4 byty): Nastaví minimální dobu trvání hledání pozice v režimu Survey-In
- svinVarLimit (4 byty): Nastaví limit odchylky určení polohy v režimu Survey-In

4.7. CFG-TMODE2 (Time Mode Settings 2)

Pomocí této zprávy lze vyčítat nebo nastavovat parametry režimu Time Mode.

Header	ID	Length (Bytes)	Payload	Checksum
0xB5 0x62	0x06 0x3D	28	Viz níže	CK_A CK_B

Data zprávy (Payload):

- timeMode (1 byte): Přenastaví aktuální režim pro měření času:
 - 0 = Disabled
 - 1 = Survey-In
 - 2 = Fixed Mode
- reserved1 (1 byte): Rezervovaný byte
- flags (2 byty): Vlajky časového režimu Time Mode, přepínají následující tři parametry
- ecefXOrLat (4 byty): Souřadnice X v WGS84 ECEF formátu nebo zeměpisná šířka
- ecefYOrLon (4 byty): Souřadnice Y v WGS84 ECEF formátu nebo zeměpisná délka
- ecefZOrAlt (4 byty): Souřadnice Z v WGS84 ECEF formátu nebo nadmořská výška
- fixedPosAcc (4 byty): Nastaví fixní přesnost 3D polohy
- svinMinDur (4 byty): Nastaví minimální dobu trvání hledání pozice v režimu Survey-In
- svinAccLimit (4 byty): Nastaví limit přesnosti určení polohy v režimu Survey-In

4.8. CFG-TP (Get/Set TimePulse Parameters)

Pomocí této zprávy lze vyčítat nebo nastavovat parametry časového pulsu.

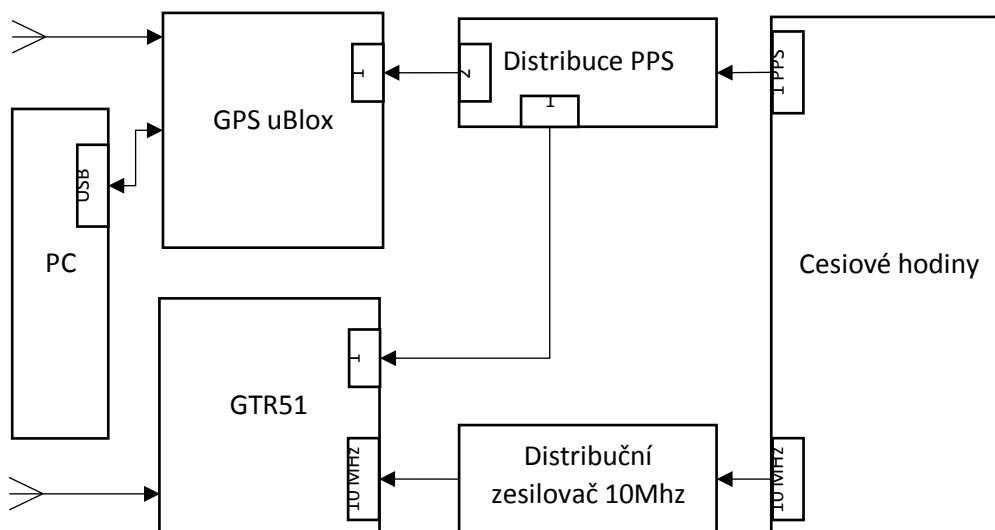
Header	ID	Length (Bytes)	Payload	Checksum
0xB5 0x62	0x06 0x07	20	Viz níže	CK_A CK_B

Data zprávy (Payload):

- interval (4 byty): Časový interval časového pulsu
- length (4 byty): Délka časového pulsu v mikrosekundách
- status (1 byte): Konfigurace nastavení časového pulsu
 - +1 = kladný
 - 0 = vypnuto
 - -1 = záporný
- timeRef (1 byte): Seřízení na referenční čas:

- 0 = čas UTC
 - 1 = čas GPS
 - 2 = místní čas
- Flags (1 byte): Bitmaska (syncMode)
 - Reserved1 (1 byte): Rezervovaný byte
 - antennaCableDelay (2 byty): Zpoždění kabelu antény v ns
 - rfGroupDelay (2 byty): Radiofrekvenční skupinové zpoždění přijímače v ns
 - userDelay (4 byty): Uživatelem definované zpoždění měření časového pulsu (kladné zpoždění znamená dřívější puls)

5. Zapojení měřicí soustavy



Obrázek 3 Schéma zapojení měřicí soustavy

Cesiové hodiny HP5071A generují referenční puls 1 PPS. Tento signál prochází přes distribuční zesilovač a přichází na vstup do GPS přijímače uBlox LEA-6T, kde je signál zpracován. Z GPS přijímače jsou každou sekundu odeslány zprávy TM (TimeMark časová značka na vstupu INT) a TP (TimePulse korekce PPS pulsu) přes sběrnici USB do operačního počítače. Zařízení GTR51 v zapojení slouží, jako reference pro cesiové hodiny.

6. Popis programu:

Program byl vytvořen za účelem přijímání dat z GPS modulu LEA-6T a jejich zaznamenávání do souboru, pro možnosti dalšího zpracování. Program se snaží o záznam co nejpřesnějších údajů z GPS signálu tím, že maximálně využívá možností modulu LEA 6T pro co nejpřesnější měření času.

Program je napsaný v jazyce C, ve vývojovém prostředí LabWindows/CVI. Toto vývojové prostředí je vhodné pro realizaci programů pro komunikaci se zařízeními pro měření/sběr dat, neboť obsahuje velké množství předdefinovaných knihovnických funkcí, speciálně navržených právě pro komunikaci s měřicími přístroji.

Pro účely měřicí aplikace je GPS modul nastaven tak, aby periodicky vyčítal data zpráv:

- TIM-TP: vyčítání GPS času výstupní korekce
- TIM-TM2: vyčítání GPS času vstupního pulsu
- TIM-SVIN: vyčítání údajů o poloze pro účely Survey-In
- NAV-TIMEGPS: vyčítání údajů o platnosti GPS času
- NAV-SOL: vyčítání údajů o viditelných satelitech a GPSfix

6.1. Struktura programu

Soubory uBloxu (uBlox.c, uBlox.h)

Namapování vnitřních registrů GPS modulu LEA-6T, nadefinování struktur UBX zpráv a definování funkcí pro zasílání zpráv do a přijímání zpráv z modulu.¹²

Soubory pro zpracování zpětných volání (Event_Handling.c, Event_Handling.h)

Funkce zpětného volání pro obsluhu programu a vyhodnocení přijatých dat.

Spravují komunikaci se sériovým portem, a tedy s GPS modulem. Zajišťují zpracování přijatých zpráv a zobrazování dat v grafickém uživatelském rozhraní.

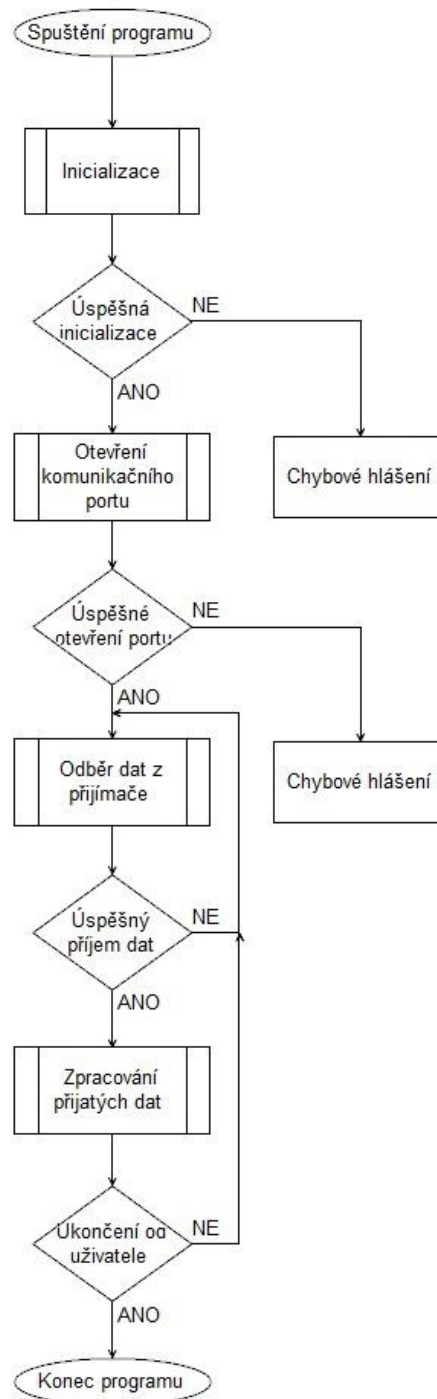
Soubory grafického uživatelského rozhraní (GUI.uir, GUI_Handling.c, GUI_Handling.h, GUI.h)

Namapování objektů grafického uživatelského rozhraní, vytvořených v editoru GUI¹³ programu LabWindows/CVI, namapování funkcí zpětného volání GUI a funkce pro předávání handleru GUI.

¹² Soubory převzaty, s laskavým svolením autora, Ing. Vojtěcha Vignera, z předchozí verze softwaru pro příjem dat z GPS modulu LEA, a aktualizovány pro potřeby současné aplikace

¹³ GUI = Graphical User Interface

6.2. Měřicí algoritmus



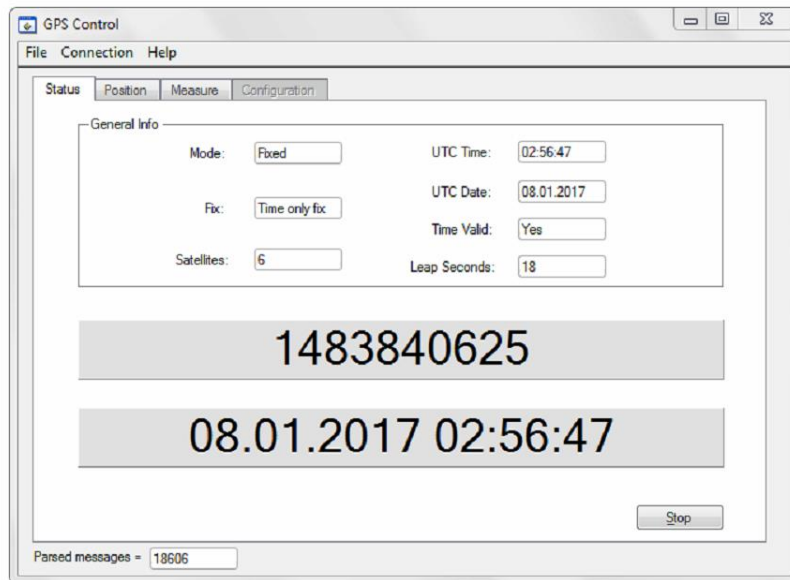
Obrázek 4 Vývojový diagram aplikace pro komunikaci s GPS přijímačem

Po zapnutí programu má uživatel možnost najít obsazené sériové porty a navázat spojení přes sériovou linku s GPS modulem, pod záložkou Connection v liště programu. Po vybrání příslušného portu program otevře sériový port a naváže spojení s GPS modulem. Po otevření sériového portu dojde k inicializaci uBloxu, kdy je do GPS modulu vyslána sekvence s nastavením vnitřních registrů. Takto

nastavený modul začne periodicky posílat patřičné informace po sériové lince zpět do operačního počítače (na kterém běží náš program). Počítač začne přijímat data, která lze pomocí programu, na kartě Measure, ukládat do *.csv souborů a následně zpracovat.

Zpracování dat po přijetí zprávy probíhá okamžitě. Ke zprávám z uBloxu jsou přiřazeny funkce zpětného volání, které se provedou vždy, jakmile program přijme danou zprávu.

6.3. Popis GUI



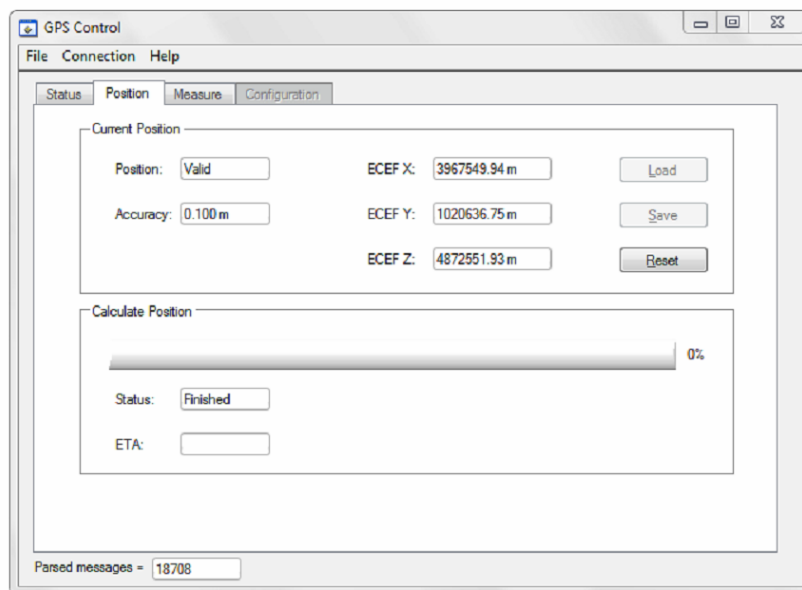
Obrázek 5 Karta Status aplikace pro komunikaci s GPS přijímačem

Karta Status slouží k zobrazení základních informací z GPS přijímače.

Pole Mode zobrazuje, v jaké fázi režimu Time Mode se aktuálně přijímač nachází. Fix zobrazuje, jaké údaje jsou pevně určeny. Satellites zobrazuje počet momentálně viditelných satelitů. UTC Time a UTC Date zobrazují GPS čas převedený na UTC. Time Valid označuje, zda je GPS čas platný. Leap Seconds zobrazuje nutnou sekundovou korekci pro přepočtení mezi stupnicí GPS a UTC.

Na prvním velkém zobrazovači je promítnuta informace o aktuálním čase z GPS přijímače, převedená do formátu UNIX. Na spodním velkém zobrazovači je tato informace převedena do UTC formátu v podobě aktuálního data a času. Tlačítko Stop slouží k zastavení aktuálně probíhaného měření.

Okénko Parsed messages, v dolní liště programu, zobrazuje počet přijatých zpráv z uBloxu.

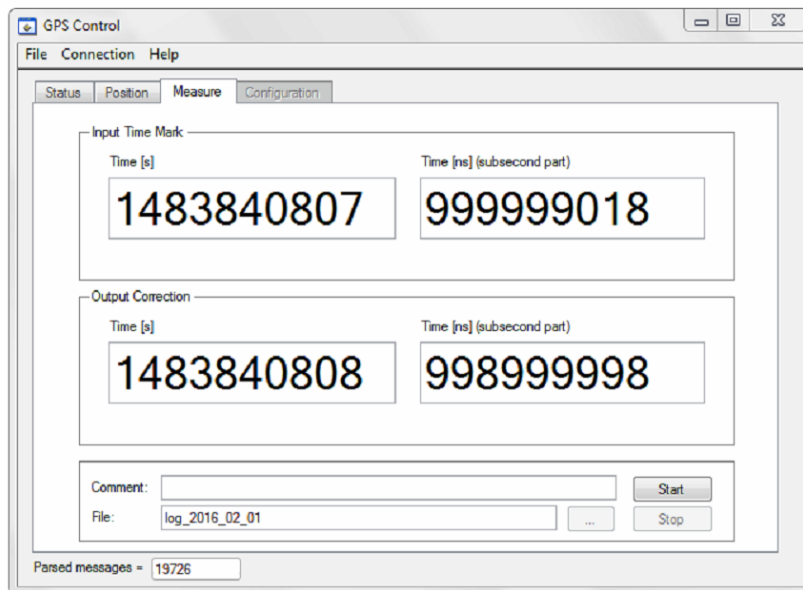


Obrázek 6 Karta Position aplikace pro komunikaci s GPS přijímačem

Karta Position zobrazuje aktuální pozici antény GPS přijímače a přesnost, s jakou je daná pozice určena. Tato karta slouží k informaci o průběhu režimu vyhledávání polohy (Survey-In).

Režim vyhledávání polohy je automaticky aktivován při zapnutí GPS přijímače, je-li rozptyl 3D polohy větší, než stanovený limit. Aktivaci režimu lze taktéž vynutit stisknutím tlačítka Reset. Je-li režim vyhledávání polohy aktivní, přijímač se snaží získat polohu antény, dokud není hodnota rozptylu pozice, parametr meanV zprávy TIM-SVIN, v definovaném limitu. Režim je pak aktivní nejméně po dobu definovanou parametrem svinMinDur, zprávy CFG-TMODE2, nebo tak dlouho, dokud není pozice zaměřena dostatečně přesně. Nárok na přesnost je definován parametrem fixedPosAcc, zprávy CFG-TMODE2.

V průběhu režimu Survey-In se periodicky vyčítají údaje o poloze, uplynulém čase od zahájení Survey-In, aktuální přesnost určení polohy a vlajky stavu režimu Survey-In a platnosti pozice. Všechny tyto informace jsou obsažené ve zprávě TIM-SVIN.



Obrázek 7 Karta Measure aplikace pro komunikaci s GPS přijímačem

Karta Measure slouží k pozorování měřených časových známek a k jejich ukládání do *.csv souboru.

GUI zobrazuje data zprávy TIM-TM2 převedené do formátu Unix pro vstupní časovou značku. A data zprávy TIM-TP, pro výstupní korekci.

Měření dat může uživatel spustit tak, že do pole „File“ zadá požadovaný název souboru a stiskne tlačítko Start. Lze taktéž přidat doplňující komentář k měření, v poli „Comment“.

Zastavit měření lze pomocí tlačítka Stop na kartě Measure, dále pak tlačítkem Stop na kartě Status, nebo úplným vypnutím programu.

Měřená data se ukládají zvlášť do souboru pro vstupní časovou známku (data na vstupu INT) a pro výstupní časovou známku GPS modulu (výstupní korekce). Data jsou pak dělena do souborů po dnech, kdy na konci kalendářního dne se uzavřou stávající soubory pro ukládání dat a vytvoří se nové, pro ukládání dat následujícího dne.

7. Vyhodnocení naměřených dat

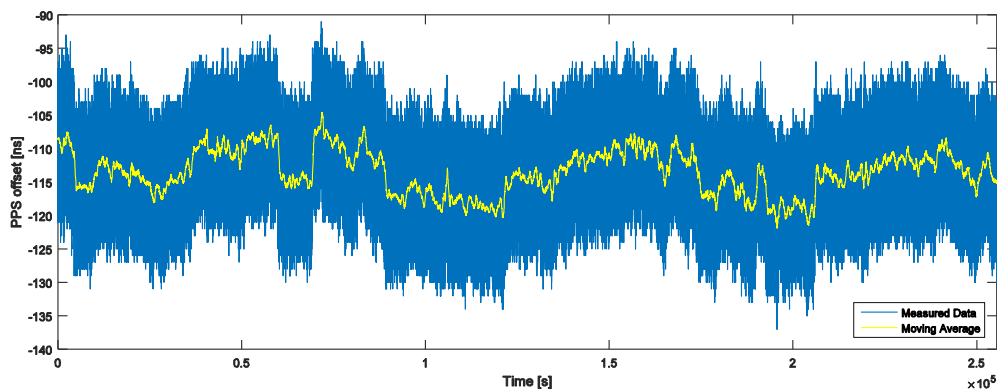
Naměřená data jsou uložena v souboru v následujícím formátu:

Unix čas [s]	Unix čas [ns]
1483612531	99999987
1483612532	99999989
1483612533	99999988
1483612534	99999988

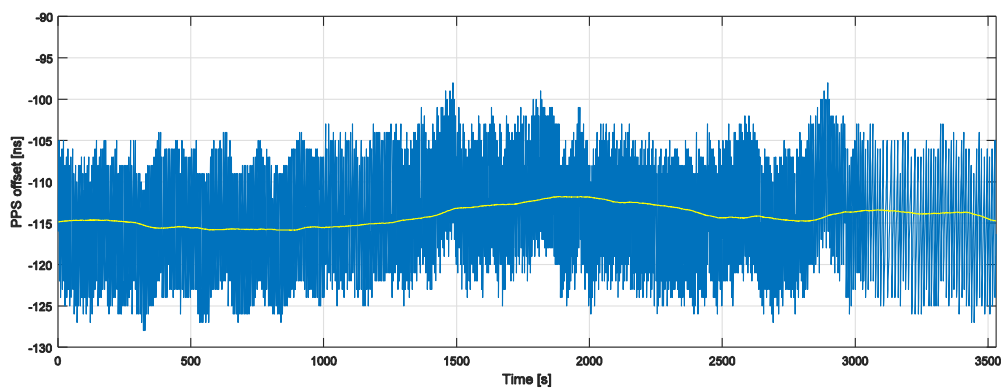
Tabulka 2 Ukázka naměřených dat

Okamžik měření je převeden z GPS času do Unix času a ten je následně zaznamenáván do souboru, po sloupcích obsahujících sekundovou část a nanosekundovou část.

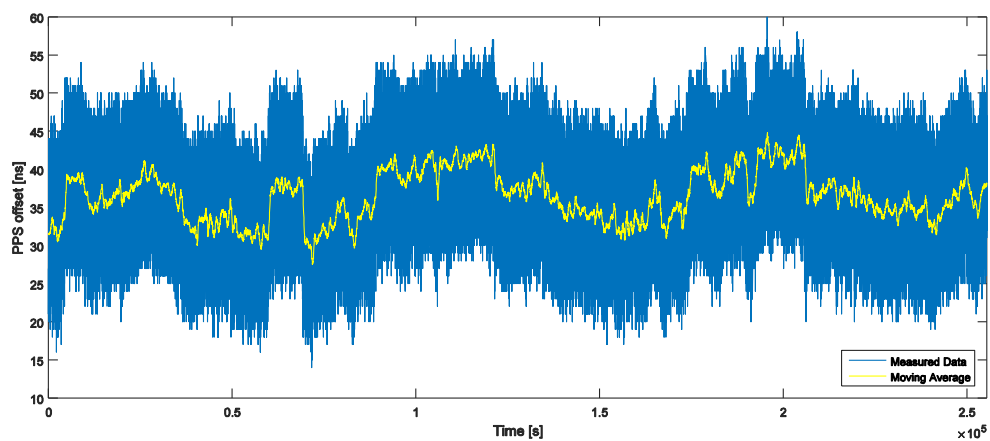
Pro vyhodnocení naměřených dat jsem ke každému vzorku vypočítala odchylku pulsů PPS referenční stupnice. Kvůli pilovitému průběhu frekvence oscilátoru v GPS přijímači, typické vlastnosti oscilátorů GPS přijímačů, zavádím klouzavý průměr přes deset minut. Takto zpracovaná data za období tří dnů a jedné hodiny lze vidět na grafech níže.



Obrázek 8 Odchylka 1 PPS v časovém intervalu 72 hodin



Obrázek 9 Odchylka 1 PPS v časovém intervalu 1 hod



Obrázek 10 Odchylka 1 PPS v intervalu 72 hodin po korekci anténního zpoždění

Vypočítané výsledky:

Počet vzorků	420011
Střední hodnota	36.48 ns
Směrodatná odchylka	3.24 ns

Tabulka 3 Střední hodnota a směrodatná odchylka 1 PPS signálu z cesiových hodin (měřeno přijímačem uBlox s korekcí zpoždění anténního kabelu a přijímače)

8. Závěr

Cílem závěrečné práce bylo navrhnout a realizovat programové vybavení pro funkční vzorky etalonů času s GNSS moduly μ Blox LEA-6T a LEA8-T. Program byl vyhotoven tak, aby přijímal a vyhodnocoval zprávy z GPS přijímače a byl schopný měnit jeho nastavení pomocí konfiguračních zpráv. Program byl zkompletován a otestován při sérii měření dat. Pro testování programu bylo využito etalonu HP5071A, který generoval časové pulsy na vstup GPS přijímače LEA-6T. GPS přijímač LEA-8T nemá katedra k dispozici, a proto na něm program nemohl být otestován.

V kapitole 7 (Vyhodnocení naměřených dat) jsou vykresleny grafy s offsety vstupních pulsů 1PPS signálu z cesiových hodin.

9. Zdroje

- [1] J. Levine: Introduction to Time and Frequency Metrology. REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, vol. 70, no. 6, pp. 2567 – 2596, 1999.
- [2] LEA-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet Document. No. UBX-14044797. uBlox, 07-Sep-2015.
- [3] Vladimír Wagner. Přesnost atomových hodin, GPS a teorie relativity. Ústav jaderné fyziky AV ČR: Domovská stránka Vladimíra Wagnera. [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/gps/gps.html>
- [4] Dana, Peter H., and Bruce M. Penrod, “The Role of GPS in Precise Time and Frequency Dissemination,” GPS World, July/August 1990.
- [5] M. A. Lombardi, L. M. Nelson, A. N. Novick and V. S. Zhang: Time and Frequency Measurements Using the Global Positioning System. Cal Lab: The International Journal of Metrology, 2001.
- [6] George Kamas and Sandra L. Howe, Time and Frequency User's Manual, National Bureau of Standards Special Publication 559, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1979.
- [7] u-blox 6 Receiver Description including Protocol Specification Document, No. GPS.G6-SW-10018-F. uBlox, 18-Apr-2013.