

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

Použití GNSS přijímačů u-Blox pro synchronizaci měřicích procesů

Tomáš Berger

Vedoucí: Doc. Ing. Jaroslav Roztočil, CSc.
Studijní program: Kybernetika a robotika
Květen 2021

Poděkování

Děkuji Doc. Ing. Jaroslavu Roztočilovi, CSc. za vedení této práce, poskytování konzultací, ochotu a trpělivost. Dále děkuji Ing. Vojtěchu Vignerovi, Ph.D za konzultace, ochotu a za mnoho odborných rad.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 20. května 2021

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a výrobou GNSS přijímače pro generování přesného času a frekvence s GNSS modulem u-blox LEA-M8T. Dále se tato práce zabývá měřením parametrů zhotoveného přijímače proti stupnici FEL-time.

Klíčová slova:

u-blox, GPS, LEA-M8T, časová synchronizace

Vedoucí: Doc. Ing. Jaroslav Roztočil,
CSc.
FEL
Technická 1902/2
Praha 6

Abstract

This bachelor thesis is about the design and construction of a GNSS receiver for precision time and frequency generation with u-blox module LEA-M8T. In the second part of this thesis, the measurement of the parameters of the receiver in comparison to FEL-time is discussed.

Keywords: u-blox, GPS, LEA-M8T, time synchronization

Title translation: Use of u-blox receivers for synchronization of measurement processes

Obsah

1 Úvod	1	3.8 Napájení	14
2 Současný stav problematiky	3	3.9 Firmware	15
2.1 Časová synchronizace	3	3.10 Mechanické řešení.....	15
2.2 Časová stupnice	3	3.10.1 DPS.....	15
2.3 GNSS přijímače pro časovou synchronizaci	4	3.10.2 Krabička.....	16
2.4 LEA - MST	5	4 Zprovoznění přijímače	19
2.5 Měřené parametry	6	5 Zhotovený přijímač	21
2.5.1 Očekávané parametry přijímače	6	6 Měření parametrů GNSS přijímače	23
3 Návrh přijímače	7	6.1 Naměřené hodnoty	24
3.1 Požadavky na návrh	7	6.1.1 Časová odchylka PPS generovaná přijímačem proti FEL-time	24
3.2 Blokové schéma.....	8	6.1.2 Časová odchylka PPS FEL-time proti UTC(PTB)	26
3.3 LEA-MST	9	6.1.3 Časová odchylka PPS generovaná přijímačem proti UTC(PTB)	27
3.4 Výstupní budiče	11	6.1.4 Vypočtené metriky pro přijímač proti FEL-time	27
3.5 Time stamp - vstupy	11	6.1.5 Vypočtené metriky pro přijímač proti UTC(PTB)	29
3.6 RS232.....	12		
3.7 MCU	13		

6.2 Vyhodnocení parametrů přijímače	31
7 Závěr	33
A Literatura	35
B Zadání práce	37

Obrázky

2.1 Přijímač GTR51[5].....	4	3.13 Návrh zadního panelu v programu OpenScad	17
2.2 Modul LEA-M8T[6]	5	3.14 Zhotovené panely	17
3.1 Blokové schéma přijímače.	9	5.1 Pohled na přední panel přijímače	21
3.2 Schéma zapojení LEA-M8T. ...	10	5.2 Pohled na zadní panel přijímače	22
3.3 Schéma zapojení LEA-M8T - USB.....	10	5.3 Vnitřní uspořádání přijímače ...	22
3.4 Schéma zapojení - Výstupní budiče.....	11	6.1 Schéma měření	23
3.5 Schéma zapojení - Time stamp vstupy.....	12	6.2 Zjednodušené schéma synchronizace stupnic	24
3.6 Schéma zapojení - RS232	12	6.3 PPS LEA-M8T proti FEL-time průměrováno po 60s modře a lineární spojnice trendu červeně.....	25
3.7 Schéma zapojení - MCU	13	6.4 Histogram časových odchylek PPS u-blox LEA-M8T proti FEL-time 27.4.2021-28.4,2021 (24 hodin)....	25
3.8 Schéma zapojení - MCU - USB .	14	6.5 Histogram časových odchylek PPS u-blox LEA-M8T proti FEL-time 27.4.2021-1.5.2021 (96 hodin).....	26
3.9 Schéma zapojení - Napájení	14	6.6 PPS FEL-time proti UTC(PTB) modře a lineární spojnice trendu červeně	26
3.10 Vizualizace navrženého plošného spoje	15	6.7 PPS LEA-M8T proti UTC(PTB) průměrováno po 16m modře a lineární spojnice trendu červeně ..	27
3.11 Krabička Hammond Manufacturing[7]	16		
3.12 Návrh předního panelu v programu OpenScad	16		

6.8 Time Deviation - PPS - přijímač proti FEL-time	28
6.9 Time Interval Error RMS - PPS - přijímač proti FEL-time	28
6.10 Maximum Time Interval Error - PPS - přijímač proti FEL-time ...	29
6.11 Time Deviation - PPS - přijímač proti UTC(PTB)	30
6.12 Time Interval Error RMS - PPS - přijímač proti UTC(PTB)	30
6.13 Maximum Time Interval Error - PPS - přijímač proti UTC(PTB) ..	31

Tabulky



Kapitola 1

Úvod

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat GNSS přijímač pro generování přesného času a frekvence s modulem u-blox LEA-M8T. První co přijde na mysl když se řekne GNSS (Globální navigační systém) je GPS a určování polohy. Těchto systému se však vyskytuje celá řada kromě GPS také GLONASS, BeiDou a budovaný Galileo. Tyto navigační systémy určují polohu přijímače vůči několika(alespoň 4) družicím, které jsou v dosahu. Proto, aby bylo možné dosáhnout přesnosti jednotek metrů až centimetrů, je nutné aby každá družice měla velice přesný časový standard, často tvořený cesiovými nebo rubidiovými atomovými hodinami. Tyto družicové standardy jsou přesně synchronizovány s dalšími stupnicemi např. UTC. Díky tomu je možné využít GNSS také k časové synchronizaci.

Modul u-blox LEA-M8T, který je vyvinut speciálně pro měření času, je schopen se synchronizovat s několika GNSS systémy současně. Díky tomuto a dalším vylepšením oproti předchozím generacím modulů je schopen dosáhnout vyšší přesnosti. Cílem této práce bylo navrhnout a realizovat přijímač s tímto modulem a ověřit jeho parametry vůči časovému standardu FEL-time.

Navržený přijímač je schopen generovat PPS puls (Puls s periodou 1 Hz), který může sloužit k synchronizaci měřicích procesů a je také schopen generovat přesný frekvenční standard, vhodný například pro nastavení přesných oscilátorů. Dále je vybaven vstupy pro přesnou časovou identifikaci(timestamp).

Kapitola 2

Současný stav problematiky

2.1 Časová synchronizace

Časová synchronizace je synchronizace dvou či více časových stupnic, tedy minimalizace fáze mezi jednotlivými stupnicemi. K přenosu synchronizačních signálů je možné využít metalických, optických či rádiových spojů.[1]

2.2 Časová stupnice

Časové stupnice dělíme na lokální a odvozené. Lokální stupnice je odvozena od lokální časové základny (oscilátoru). Odvozená stupnice nemusí mít fyzickou reprezentaci a její hodnota je odvozena od jedné či více časových stupnic. V případě odvození od několika stupnic současně lze dosáhnout vyšší stability než mají jednotlivé stupnice.[1] Významné časové stupnice:

- International Atomic Time - TAI
Jedná se o mezinárodní časovou stupnici využívající více než 400 lokálních kvantových časových standardů rozmístěných po celém světě.[1]
- Coordinated Universal Time - UTC
UTC je odvozená stupnice sloužící jako časový standard pro celý svět.

Časová pásma jsou definována odchylkou od UTC. Například Praha UTC+1 respektive UTC+2 v případě letního času. [1]

- GPS time

GPS satelity jsou vybaveny přesnými cesiovými hodinami s relativistickou korekcí a dohromady tvoří časovou stupnici GPS time. Tato stupnice je laboratoří USNO synchronizována s UTC s přesností na několik nanosekund. Díky přesné synchronizaci je možné systém GPS využít k distribuci času UTC. Satelity GPS vysílají aktuální GPS čas a korekci vůči UTC.[1]

2.3 GNSS přijímače pro časovou synchronizaci

GNSS přijímače pro časovou synchronizaci jsou zařízení obsahující přesný oscilátor, který je synchronizován s časovým standardem systému GNSS. Typicky je využíváno systému GPS, který je synchronizován s UTC.[1]

Příkladem takového přijímače je metrologický přijímač GTR51 využívaných v laboratoři přesného času a frekvence FEL.



Obrázek 2.1: Přijímač GTR51[5]

Existují však také "levné" GNSS přijímače ve formě finálních produktů či vestavných modulů. Zástupcem této kategorie může být u-blox LEA-M8T, kterým se zabývá tato práce. Cena tohoto modulu je přibližně 60 eur.



Obrázek 2.2: Modul LEA-M8T[6]

Tyto přijímače jsou vybaveny jedním či více konfigurovatelnými výstupy časových pulzů odvozených od vnitřního oscilátoru. Typicky generovaným signálem je PPS a 10 MHz. Dále mohou být vybaveny vstupy pro přesnou časovou identifikaci (timestamp). Časové stupnice odvozené od GPS vynikají dlouhodobou stabilitou. Krátkodobá stabilita závisí na použitém vnitřním oscilátoru.[1]

Přesnost těchto přijímačů závisí na mnoha okolnostech jako je například viditelnost oblohy, počet dostupných satelitů, umístění v městské zástavbě či zda je přijímač umístěn staticky na jedné pozici. Pokud je přijímač (anténa) umístěn staticky je možné provozovat ve fixním režimu, což vede ke zvýšení přesnosti. Pro určení přesné polohy lze využít survey-in mód, který v průběhu desítek minut až hodin zaměří polohu antény.[1]

■ 2.4 LEA - M8T

Modul LEA - M8T je modul vyráběný firmou u-blox, sloužící pro časovou synchronizaci pomocí GNSS systémů. Modul podporuje všechny významné GNSS a to GPS, GLONASS, BeiDou a budované Galileo. Udávaná přesnost časových pulzů za ideálních podmínek je lepší než 20 ns.[2]

Modul je vybaven dvěma konfigurovatelnými výstupy, schopných generovat synchronizační signály, typicky se jedná například o PPS či frekvenci 10 MHz. Modul dále nabízí dva vstupy pro time-stamp, pomocí nichž je možné změřit čas kdy došlo k náběžné/sestupné hraně na vstupu. Modul je vybaven množstvím komunikačních linek a to SPI, I2C, UART a Full Speed USB . Je schopen komunikovat protokoly UBX a NEMA.[2]

■ 2.5 Měřené parametry

Základním měřeným parametrem je okamžitá časová odchylka PPS. V případě delšího měření lze na těchto datech provést statistické zkoumání, určit krátkodobou a dlouhodobou stabilitu přijímače.

V případě stabilních stupnic, kde je vliv prostředí (např. teploty) zanedbatelný se používají převážně následující metriky[1]:

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

■ 2.5.1 Očekávané parametry přijímače

Výrobce uvádí přesnost synchronizačních pulzů lepší než 20 ns[2] za ideálních podmínek, tedy za dobré viditelnosti oblohy. Dále výrobce uvádí jitter časových pulzů a to ± 11 ns[2] . Za vhodných podmínek lze tedy očekávat přesnost časových pulzů lepší než 31 ns.

Přijímač bude měřen vůči atomovým hodinám stupnice FEL-time, jejichž odchylka se vůči stupnici UTC mění a to přibližně o několik nanosekund týdně.

Kapitola 3

Návrh přijímače

3.1 Požadavky na návrh

Napájení:

- Napájecí 9 V-26 V
- Ochrana proti přepólování
- Možnost napájení přes USB

Komunikace:

- USB - pro komunikaci s GNSS modulem
- USB - pro komunikaci s mikrokontrolerem
- RS232 - pro komunikaci s GNSS modulem

Výstupy PPS:

- 5 V úroveň
- Výstupní impedance 50Ω
- Rychlé hrany $< 1 \text{ ns}$
- Dva výstupy pro každý kanál
- SMA konektory

Time stamp vstupy:

- 5 V úroveň
- Vstupní impedance 50Ω
- SMA konektory

Anténa:

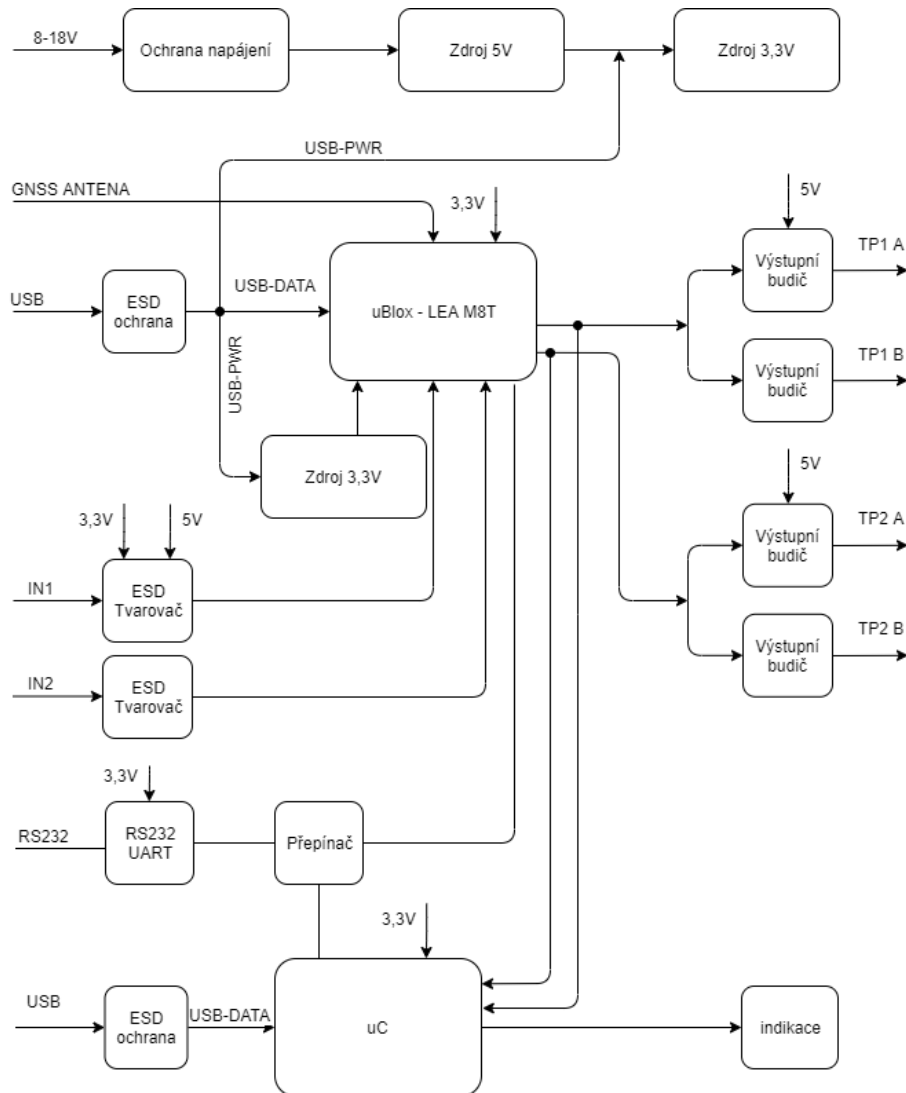
- SMA konektor
- Napájení aktivní antény

3.2 Blokové schéma

Podle předchozích požadavků bylo navrženo blokové schéma přijímače. Přijímač je navržen pro co největší univerzálnost.

Přijímač je vybaven dvěma USB vstupy. První slouží jednak pro nastavení GNSS modulu a též je možné z tohoto portu přijímač napájet. Je tedy možné přijímač provozovat pouze s připojením k PC a s anténou. Dále je přijímač vybaven druhým USB konektorem, který slouží ke komunikaci s mikrokontrolerem a k jeho programování. Alternativně k napájení přes USB je možné přijímač napájet z externího zdroje 9 V-26 V pro dlouhodobé experimenty.

Přijímač je taktéž vybaven vstupem RS232, který slouží jako alternativa ke komunikaci přes USB s GNSS modulem, je tak možné přijímač propojit s dalšími zařízeními a získávat tak další informace poskytované GNSS modulem (poloha, korekce. . .). Alternativně lze sériová linka do GNSS modulu spojit s mikrokontrolerem a zpracovávat tak některá data přímo v modulu.



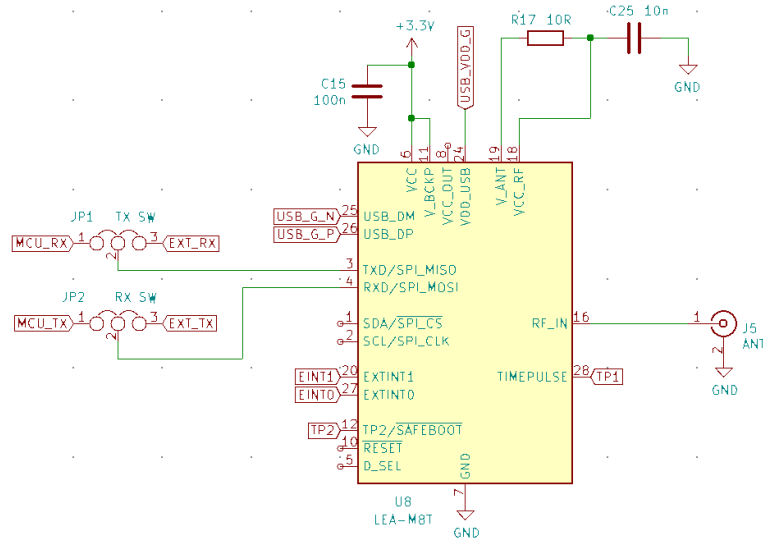
Obrázek 3.1: Blokové schéma přijímače.

3.3 LEA-M8T

Modul uBlox LEA-M8T ke svému provozu potřebuje pouze napájení 3.3 V. Rezistor R17 a kondenzátor C25 slouží k napájení aktivní antény interním

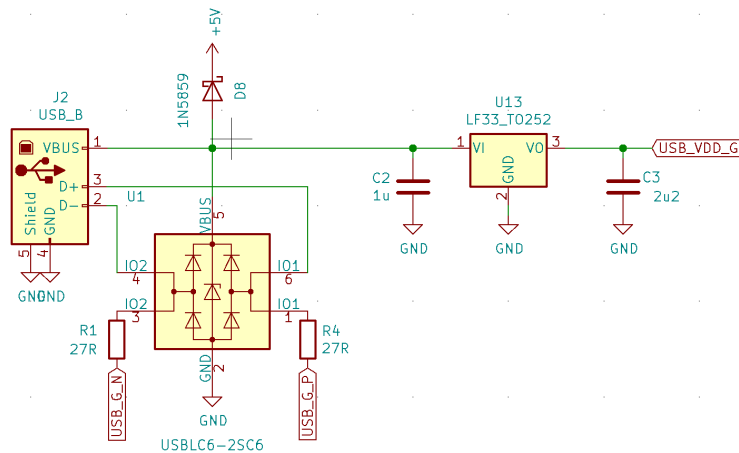
3. Návrh přijímače

napájecím napětím z modulu. [3] Přepínače JP1 a JP2 slouží k výběru komunikace sériové linky, a to tak že přijímač může komunikovat s externím zařízením po lince RS232 nebo může komunikovat s mikrokontrolerem v přijímači. Dále jsou k modulu připojeny PPS výstupy TP1 a TP2, které jsou přivedeny k výstupním budičům a timestamp vstupy EINT1 a EINT2 připojené k externím vstupům s tvarovači.



Obrázek 3.2: Schéma zapojení LEA-M8T.

K modulu je také připojen USB vstup, který slouží ke konfiguraci modulu. Dle integračního manuálu[4] modulu je též zapotřebí 3.3 V napájení, které je aktivní pouze, když je přijímač připojen k USB zařízení. K tomuto napájení slouží stabilizátor U13 (LF33). K ESD ochraně byl zvolen obvod USBLC6-2SC6.

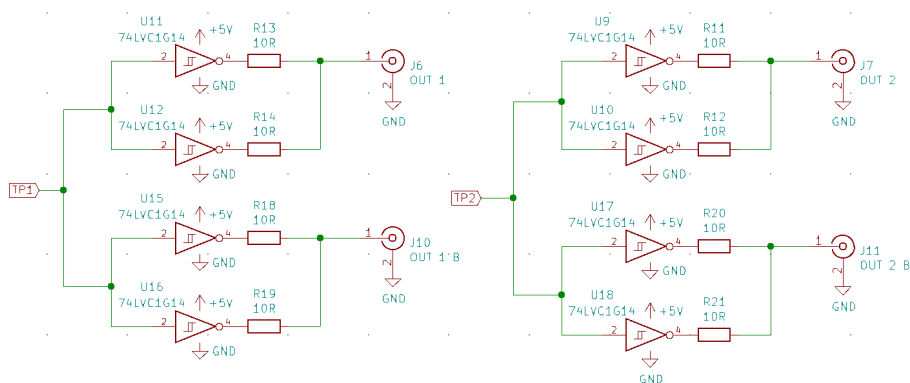


Obrázek 3.3: Schéma zapojení LEA-M8T - USB.

3.4 Výstupní budiče

Pro výstupní budiče byly zvoleny rychlé invertory Nexperia 74LVC1G14. Tyto budiče navíc mají na vstupu Schmittův obvod, jehož úroveň umožňují i při napájení 5 V, aby byl obvod řízen 3.3 V signálem generovaným GNSS modulem. Pro dosažení rychlejší přechodové hrany byly spojeny dva invertory paralelně přes sériový odpor 10 Ω.

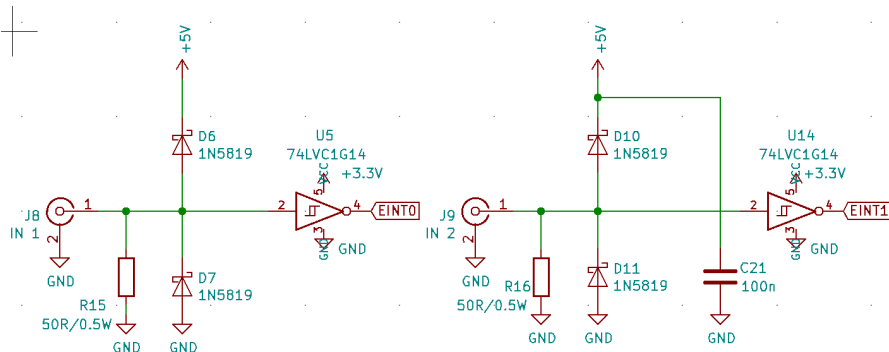
GNSS modul umožňuje generování pulzů na dvou různých kanálech, každý kanál má zdvojený výstup se samostatnými budiči. Celkem je přijímač osazen čtyřmi výstupy - po dvou na každý kanál.



Obrázek 3.4: Schéma zapojení - Výstupní budiče

3.5 Time stamp - vstupy

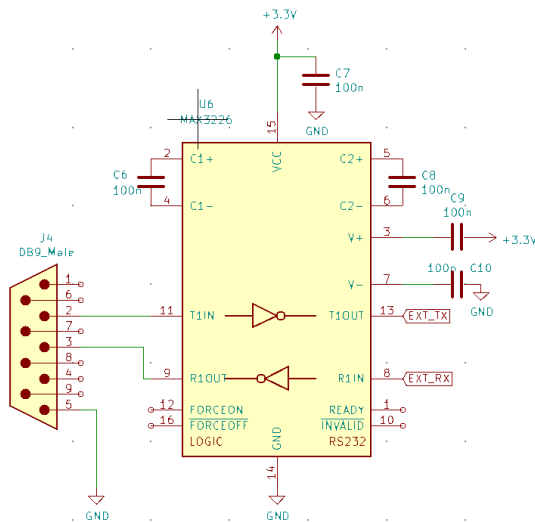
Time stamp vstupy mají vstupní úroveň 5 V. Tuto úroveň je nutno přizpůsobit na 3.3 V, které vyžaduje GNSS modul. K tomuto účelu byly vybrány rychlé invertory Nexperia 74LVC1G14, které při napájení 3.3 V mají vhodné výstupní úrovně a zároveň jsou 5 V tolerantní. Inverze signálu nezpůsobuje žádný problém, protože v GNSS modulu lze volit detekci náběžných/sestupných hran. Pro impedanční přizpůsobení jsou na vstup též připojeny rezistory 50 Ω a pro ESD ochranu jsou připojeny dvojice schottkyho diod proti 5 V a GND.



Obrázek 3.5: Schéma zapojení - Time stamp vstupy

3.6 RS232

Pro převod z úrovní RS232 na USART 3.3 V byl využit obvod MAX3226, který je 3.3 V variantou často používaného MAX232. Obvod je použit v základním zapojení dle datasheetu. Obvod pouze vyžaduje připojení 3.3 V napájení a čtveřici kondenzátorů C6,C8,C9 a C10 pro nábojovou pumpu.



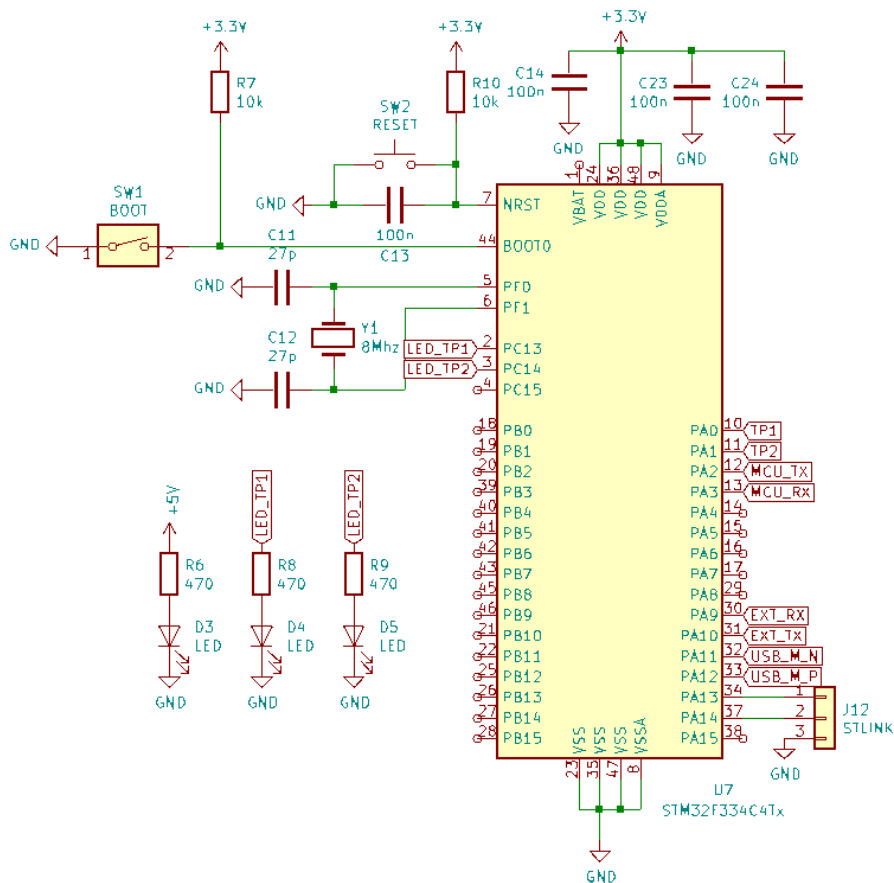
Obrázek 3.6: Schéma zapojení - RS232

3.7 MCU

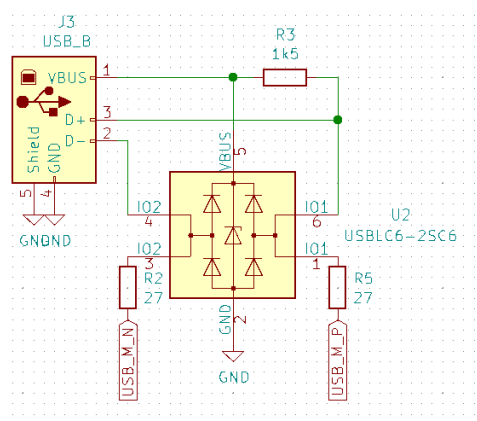
MCU byl do návrhu zařazen hlavně pro prozkoumání možnosti korekce PPS pulzů pomocí vnitřního časovače HRTIM, pro tuto možnost na konec nebyl využit. Zůstává pro řízení indikace a jako možnost budoucího experimentování s přijímačem.

Procesor byl zvolen STM32F334. Procesor je napájen 3.3 V. Je doplněn o resetovací tlačítko SW2 a spínač pro přepnutí procesoru pro nahrání firmwaru SW1. Dále je doplněn o externí krystal 8 MHz, a dvě indikační LED pro zobrazení PPS. Procesor je programovatelný pomocí ST-link konektoru J12.

Procesor může komunikovat po sériové lince s GNSS modulem. Také ho je možné připojit pomocí USB k PC a komunikovat s ním pomocí virtuální sériové linky či upgradovat firmware.



Obrázek 3.7: Schéma zapojení - MCU

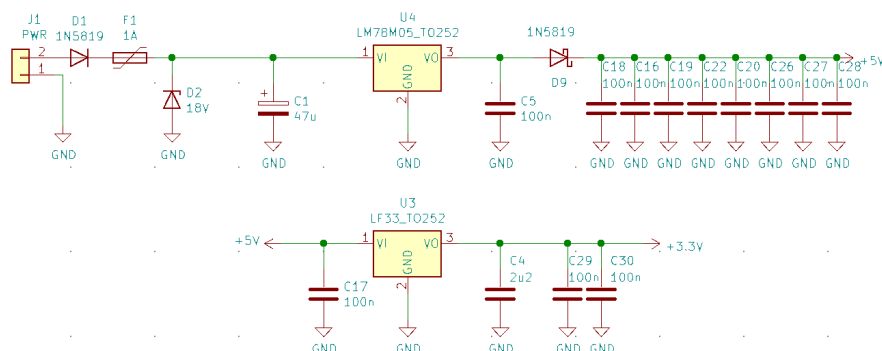


Obrázek 3.8: Schéma zapojení - MCU - USB

3.8 Napájení

Komponenty přijímače vyžadují dvě napájecí napětí, a to 5 V a 3.3 V. Napájení přijímače je řešeno tak, že napětí 5 V může pocházet ze dvou zdrojů. Za prvé může pocházet z USB a pak je přiváděno na 5 V větev přes diodu D8. Za druhé může být získáno z externího napájecího zdroje (9 V-26 V), které je sníženo na napětí 5 V stabilizátorem U4 (LM7805) a následně přivedeno přes diodu D9 na 5 V napájecí větev. Napětí 3.3 V je získáváno z 5 V napájecí větve pomocí stabilizátoru U3 (LF33).

K ochraně externího napájecího vstupu slouží dioda D1, která zabraňuje přepólování přijímače. Navíc je přijímač vybaven ochranou proti přepětí tvořenou polyswitchem F1 a transilem D2. V případě přepětí se transil otevře a nadproud přeruší polyswitch F1. Polyswitch F1 slouží zároveň k ochraně přijímače v případě poruchy.



Obrázek 3.9: Schéma zapojení - Napájení

Napájení je navrženo tak, že součet odebíraných proudů z 5 V a 3.3 V větve nesmí překročit 1 A.

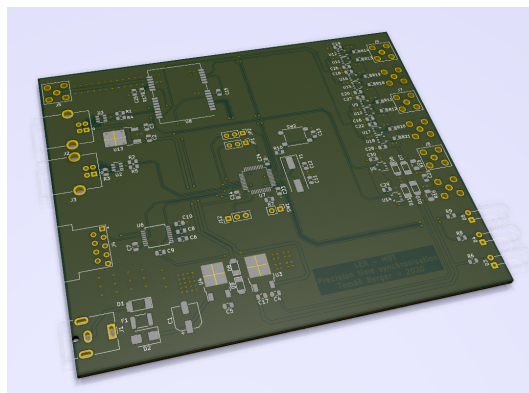
3.9 Firmware

Firmware pro integrovaný mikroprocesor je napsán v jazyce C. Ve verzi pro tuto bakalářskou práci je funkce MCU omezena na řízení indikace na přední straně přijímače. Jedná se tedy o jednoduchý program, který pomocí v případě náběžné hrany pulzu z modulu LEA-M8T indikuje tuto skutečnost rozsvícením LED.

3.10 Mechanické řešení

3.10.1 DPS

Plošný spoj je navrženo jako dvouvrstvý s prokovením z materiálu FR4 o síle 1.5 mm. Velikost desky 98 mm × 119 mm byla určena požadavky na umístění konektorů a možnost zabudování do dostupné krabice. Rozložení konektorů bylo zvoleno tak, že výstupy PPS, timestamp vstupy a indikace jsou umístěny ve předu desky. Naopak Anténa, 2x USB, RS232 a napájení jsou umístěny vzadu.



Obrázek 3.10: Vizualizace navrženého plošného spoje

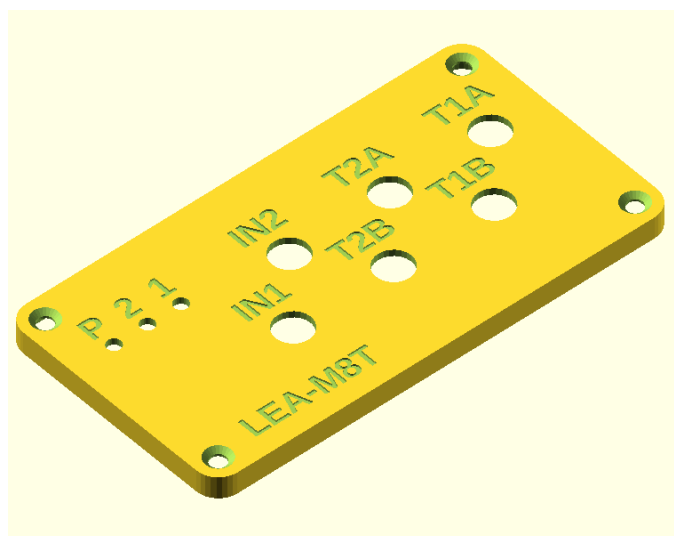
3.10.2 Krabička

Přijímač je navržen, tak aby ho bylo možné vložit do hliníkové krabičky IP54 120x103x53mm od Hammond Manufacturing. Krabička má hliníkové extrudované tělo a plastové panely.

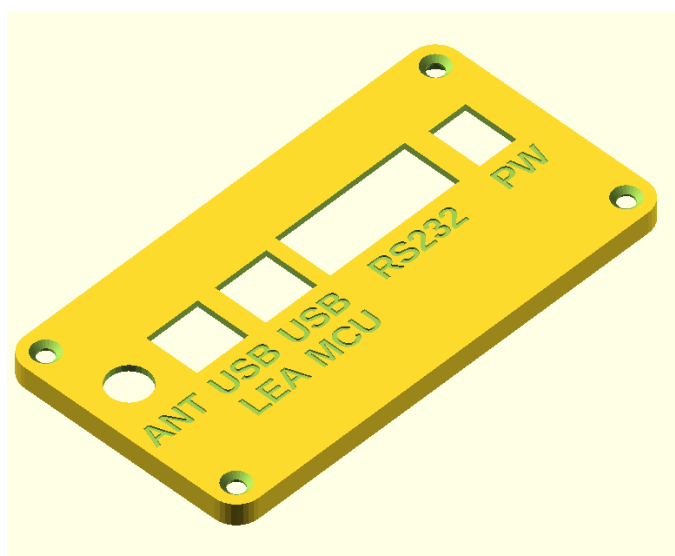


Obrázek 3.11: Krabička Hammond Manufacturing[7]

Originální panely přístrojové krabičky jsou nahrazeny panely zhotovenými pomocí 3D tisku. Panely jsou navrženy v programu OpenSCAD. Panely byly navrženy pro tisk na více-materiálové tiskárně, tak že popisy panelů jsou vytvořeny přímo při tisku, odlišnou barvou tiskového materiálu.

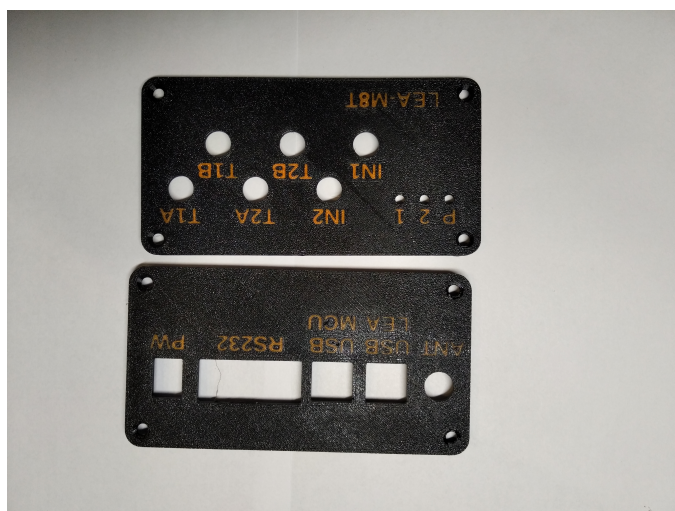


Obrázek 3.12: Návrh předního panelu v programu OpenScad



Obrázek 3.13: Návrh zadního panelu v programu OpenScad

Zhotovení panelů proběhlo na tiskárně Prusa MK3S MMU2 s využitím černého (podklad) a oranžového (popis) PETG filamentu.



Obrázek 3.14: Zhotovené panely

Kapitola 4

Zprovoznění přijímače

V případě zprovoznění prvního testovaného přijímače byl zvolen postup postupného zprovoznění jednotlivých částí přijímače zvláště, tak aby v případě chyby v návrhu nedošlo k poškození více komponent současně.

První část přijímače, která se osadila bylo napájení, na kterém ostatní komponenty závisejí. Přijímač byl pak připojen k laboratornímu zdroji s omezením proudu a byla změřena napětí na napájecích větvích 3.3 V a 5 V. Tato napětí byla v tolerancích daných výrobcem stabilizátorů.

Další osazenou částí byly vstupní a výstupní budiče. Zde byla provedena kontrola vstupních odporů, tak aby po pozdějším připojení modulu LEA nedošlo k poškození jeho výstupů a byla provedena zběžná kontrola funkčnosti přivedením signálu na vstup a pozorováním výstupu osciloskopem.

Dále byly osazeny ESD ochrany vstupů a budič RS232, zde byla provedena opět kontrola odporu vůči zemi a zkontrolována správná funkce po připojení napájení.

Po důkladné kontrole byl osazen modul LEA. Byla zkontrolována funkce za pomoci laboratorního zdroje a změření odebíraného proudu. Následně byl přijímač připojen pomocí USB k PC a byla nahrána konfigurace modulu LEA pomocí softwaru u-center. Byla připojena anténa a na výstup přijímače byl připojen osciloskop pro přibližnou kontrolu generovaného signálu. Přijímač generoval signál na první zapojení a mohlo se tak přistoupit k další části.

Kapitola 5

Zhotovený přijímač



Obrázek 5.1: Pohled na přední panel přijímače



Obrázek 5.2: Pohled na zadní panel přijímače



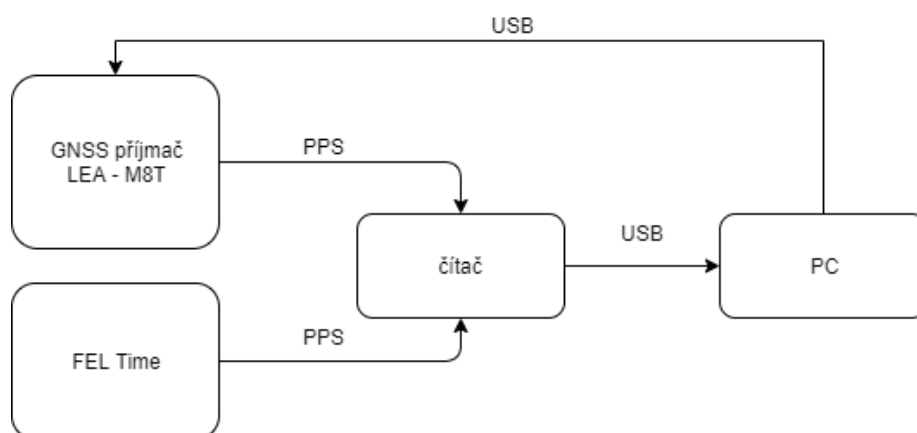
Obrázek 5.3: Vnitřní uspořádání přijímače

Kapitola 6

Měření parametrů GNSS přijmače

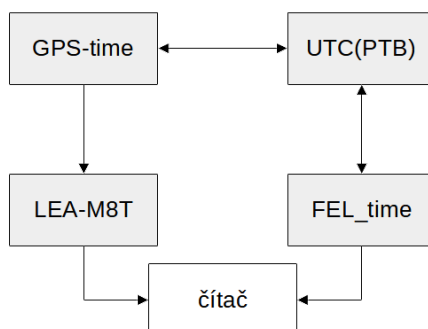
Pro stanovení parametrů přijmače bylo provedeno měření v Laboratoři přesného času a frekvence FEL. Přijímač byl zde porovnán vůči časové stupnici FEL-time. Porovnání stupnic bylo provedeno čítačem, který měřil časový rozdíl mezi PPS signálem generovaným přijímačem a PPS signálem stupnice FEL-time.

Toto měření mělo za účel změřit stabilitu přijmače, nebylo tedy provedeno zkalibrování středních hodnot obou stupnic. Měření probíhalo s přijímačem nastaveným pouze pro synchronizaci s GPS a k měření nebylo využito korekčních hodnot generovaných přijímačem.



Obrázek 6.1: Schéma měření

Pro vyhodnocení dále bylo využito dat odchylek stupnice FEL-time proti stupnici UTC(PTB), která je velmi přesně synchronizována se stupnicí GPS-time a v rámci tohoto měření jsou považovány za totožné.



Obrázek 6.2: Zjednodušené schéma synchronizace stupnic

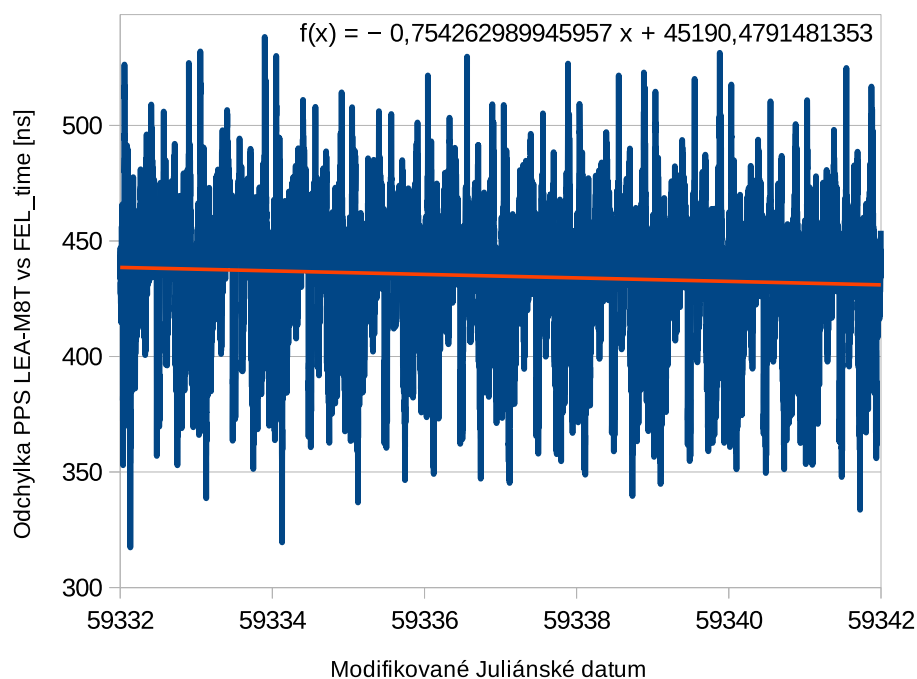
Pro získání přesnějších výsledků bylo od dat odchylek přijmače proti FEL-time třeba odečíst odchylku FEL-time proti GPS-time (aproximováno UTC(PTB)). Protože odchylky FEL-time proti UTC(PTB) jsou zaznamenávány s periodou 16 minut, byly odchylky přijmače proti FEL-time zprůměrovány po 16 minutových oknech a následně odečteny.

Pro vyhodnocení dat bylo použito vlastních skriptů, tabulkového procesoru a pro výpočty jednotlivých metrik bylo použito programu Stable32.

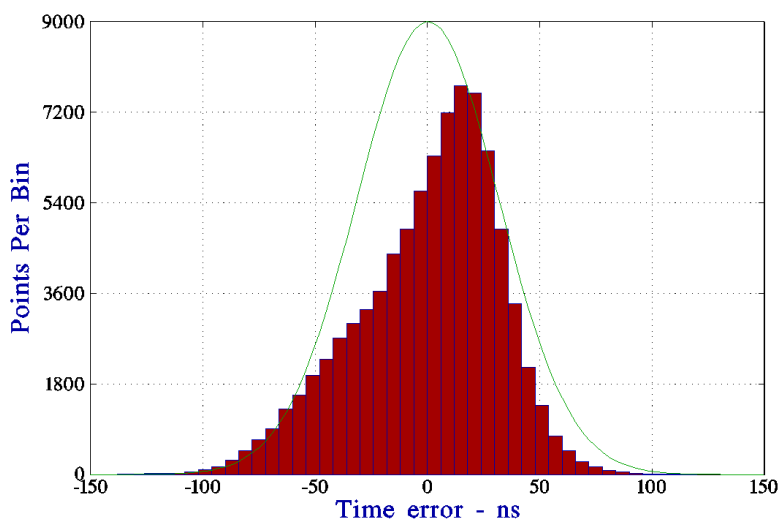
6.1 Naměřené hodnoty

6.1.1 Časová odchylka PPS generovaná přijmačem proti FEL-time

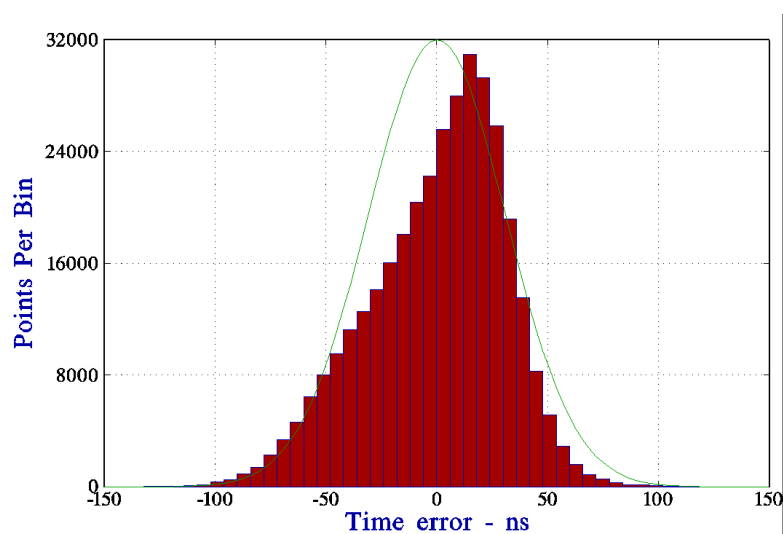
Následující naměřené hodnoty byly pořízeny mezi 12:00 27.dubna 2021 a 12:00 8.května 2021. V Laboratoři přesného času a frekvence FEL. Měření bylo prováděno vůči atomové stupnici FEL-time. K přijímači byla připojena aktivní anténa u-blox umístěná na okenním parapetu laboratoře.



Obrázek 6.3: PPS LEA-M8T proti FEL-time průměrováno po 60s modře a lineární spojnice trendu červeně

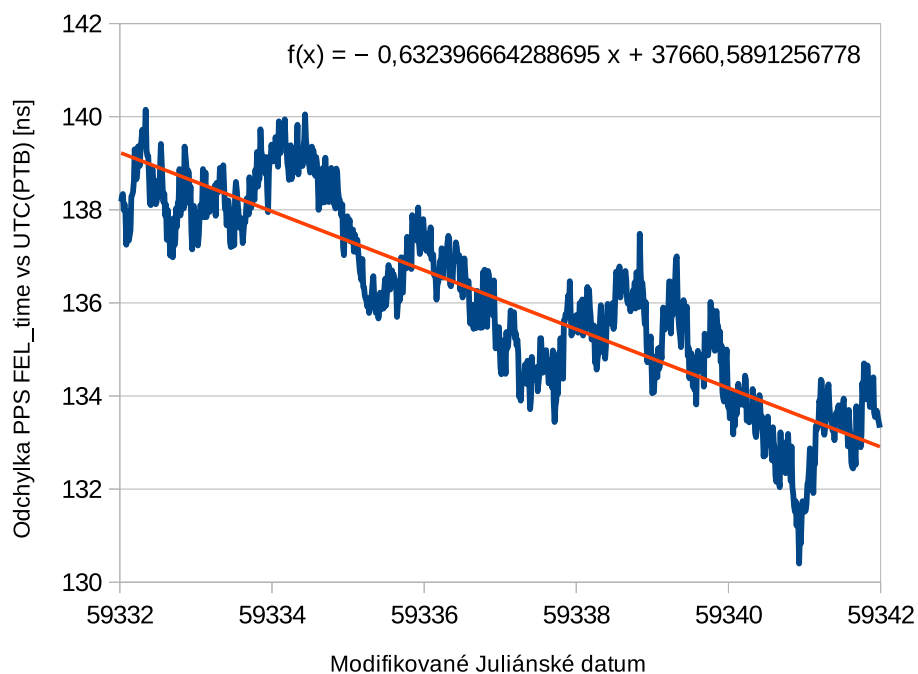


Obrázek 6.4: Histogram časových odchylek PPS u-blox LEA-M8T proti FEL-time 27.4.2021-28.4,2021 (24 hodin)



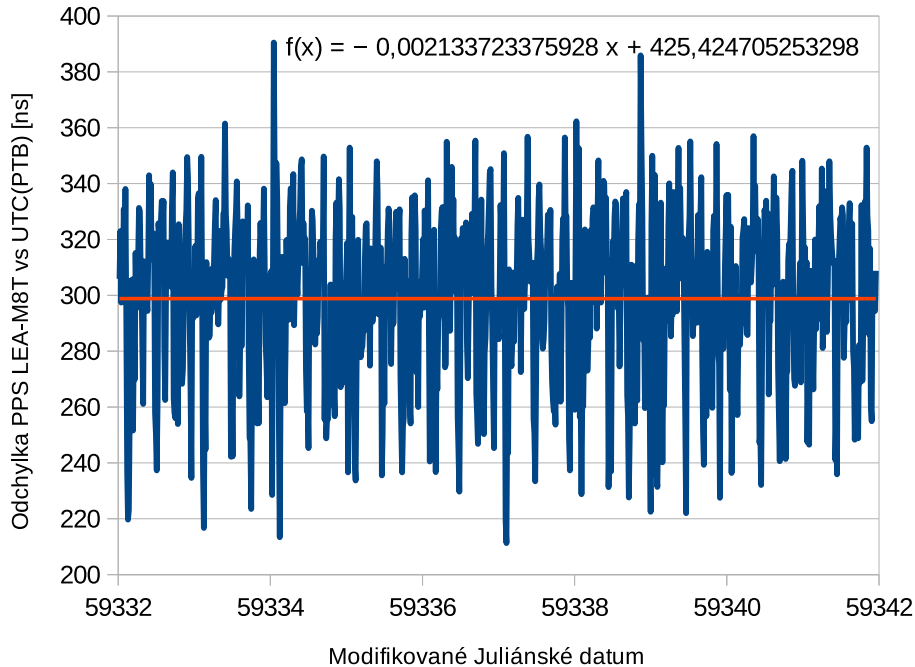
Obrázek 6.5: Histogram časových odchylek PPS u-blox LEA-M8T proti FEL-time 27.4.2021-1.5.2021 (96 hodin)

6.1.2 Časová odchylka PPS FEL-time proti UTC(PTB)



Obrázek 6.6: PPS FEL-time proti UTC(PTB) modře a lineární spojnice trendu červeně

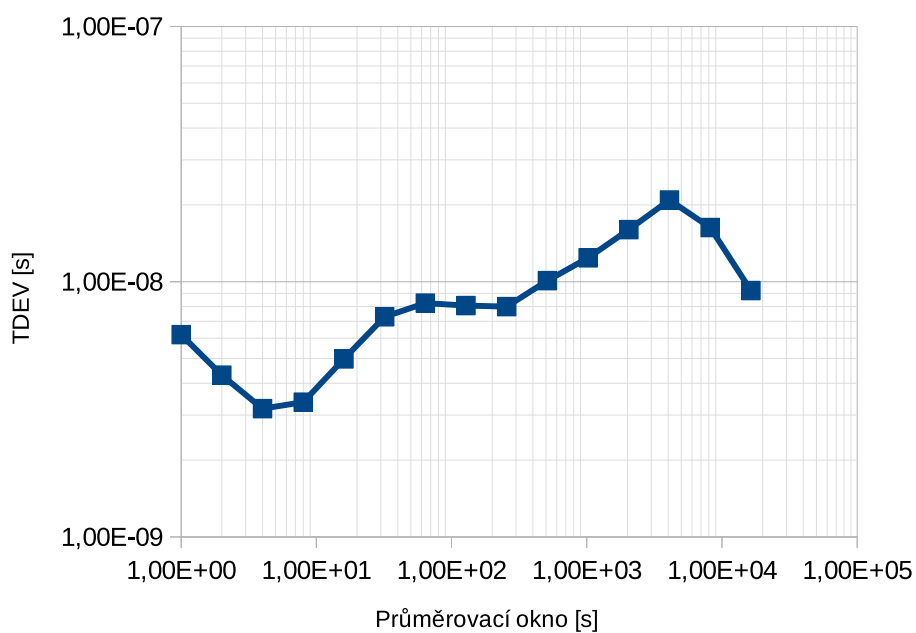
6.1.3 Časová odchylka PPS generovaná přijímačem proti UTC(PTB)



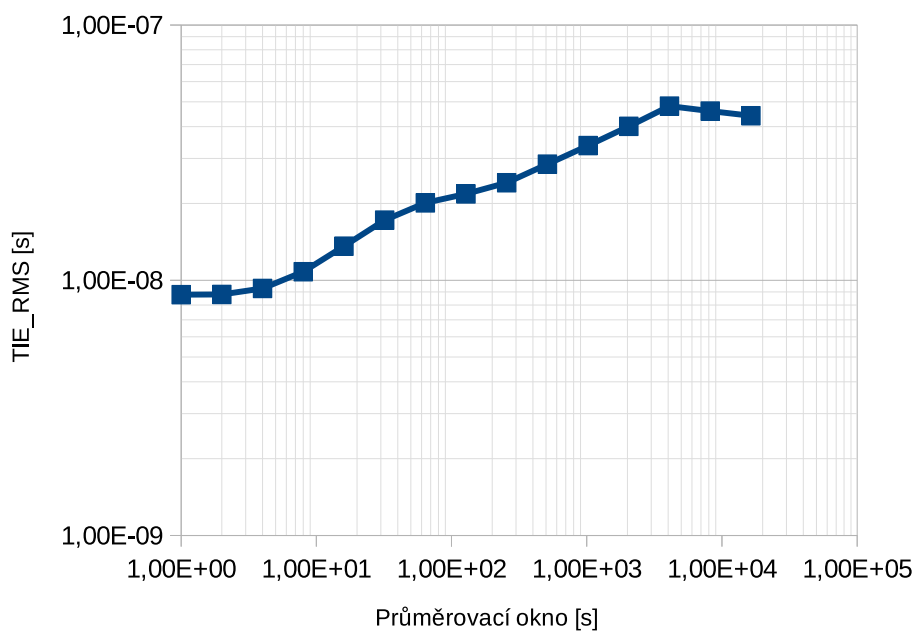
Obrázek 6.7: PPS LEA-M8T proti UTC(PTB) průměrováno po 16 m modře a lineární spojnice trendu červeně

6.1.4 Vypočtené metriky pro přijímač proti FEL-time

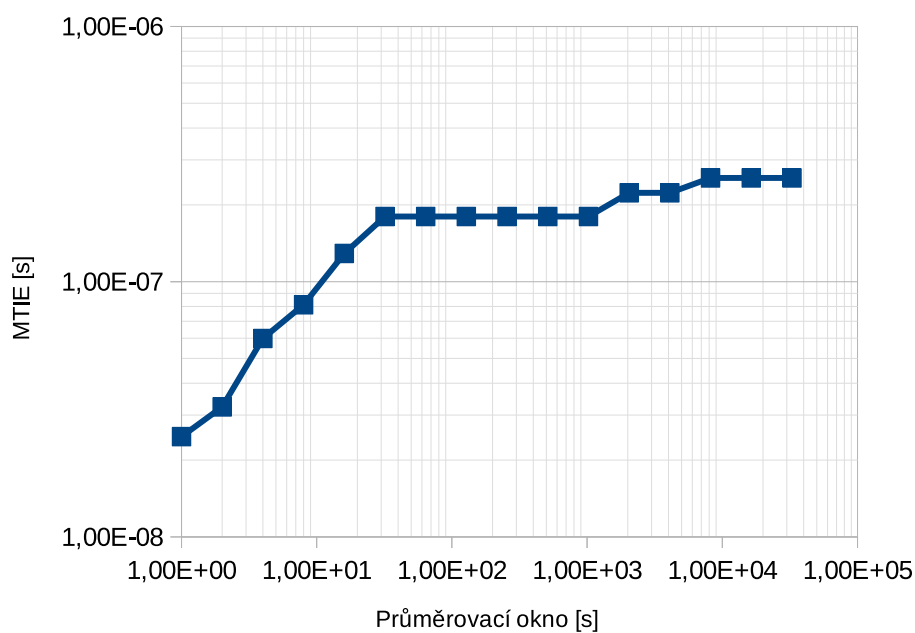
Následující hodnoty byly vypočteny z dat o délce 24 hodin v rozmezí 27.4.2021 10:00 UTC až 28.4.2021 10:00 UTC. Data byla naměřena s periodou 1 s a nebyla průměrována.



Obrázek 6.8: Time Deviation - PPS - přijímač proti FEL-time



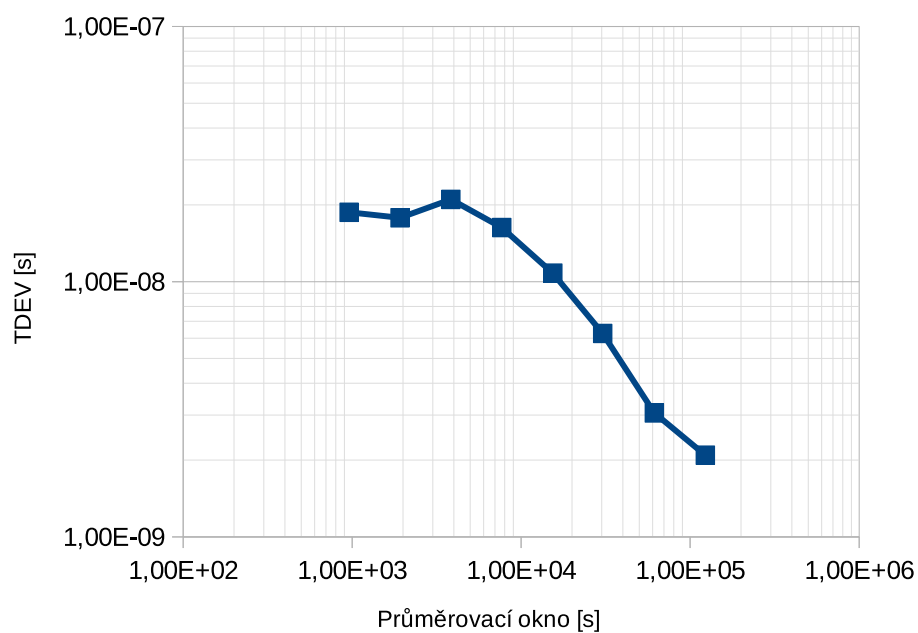
Obrázek 6.9: Time Interval Error RMS - PPS - přijímač proti FEL-time



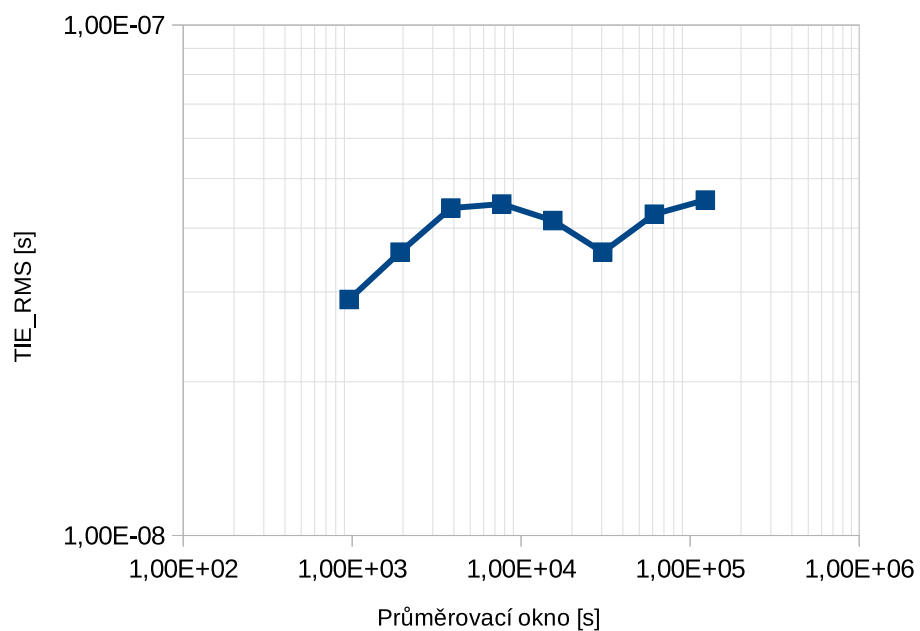
Obrázek 6.10: Maximum Time Interval Error - PPS - přijímač proti FEL-time

■ 6.1.5 Vypočtené metriky pro přijímač proti UTC(PTB)

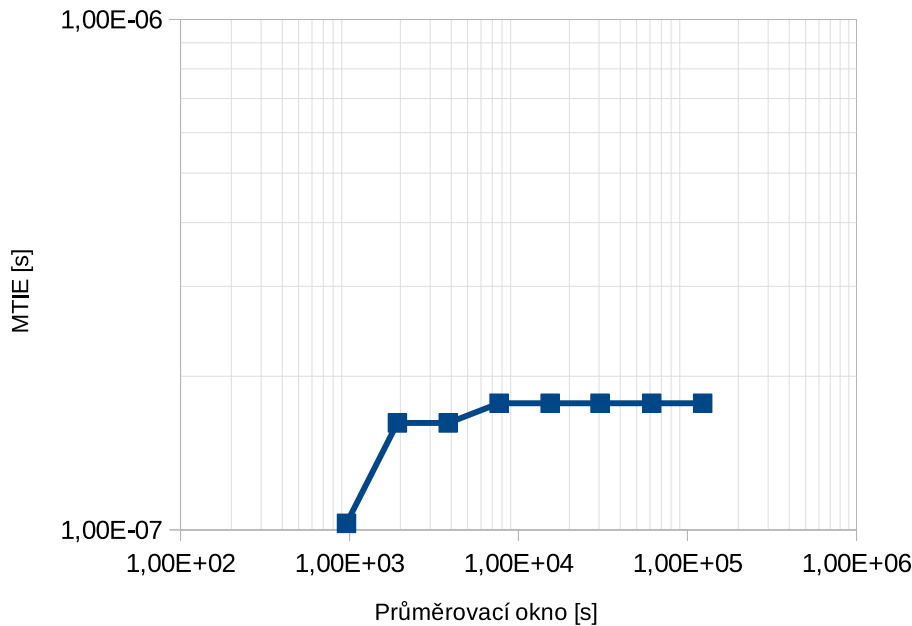
Následující hodnoty byly vypočteny z dat o délce 10 dnů v rozmezí 28.4.2021 00:00 UTC až 8.5.2021 00:00 UTC. Data byla předem zprůměrována po 16 minutách.



Obrázek 6.11: Time Deviation - PPS - přijímač proti UTC(PTB)



Obrázek 6.12: Time Interval Error RMS - PPS - přijímač proti UTC(PTB)



Obrázek 6.13: Maximum Time Interval Error - PPS - přijímač proti UTC(PTB)

6.2 Vyhodnocení parametrů přijímače

Z grafů 6.13 a 6.10 můžeme vidět, že se maximální časová odchylka pohybuje v rozmezí 150 ns – 250 ns což je výrazně více než očekávaných 31 ns za ideálních podmínek. Měření však probíhalo v městské zástavbě s anténou umístě na stěně budovy. Výhled antény na oblohu byl tedy značně omezen, což mohlo vést ke snížení přesnosti PPS.

Z dlouhodobého hlediska je zajímavé porovnat drift stupnice FEL-time proti UTC(PTB) a drift změřený pomocí testovaného přijímače a GPS-time. Pokud porovnáme směrnice lineárních spojnic trendu pro naměřené hodnoty z grafů 6.3 a 6.6, zjistíme že průměrný drift změřený přímo byl -0.63 ns/den a pomocí testovaného přijímače -0.75 ns/den. Rozdíl v těchto dvou směrnících je velice malý a může být způsoben nedokonalou synchronizací UTC(PTB) a GPS-time, toto vypovídá o výborných vlastnostech přijímače pro dlouhodobá měření, kde se krátkodobá nestabilita neprojevívá.

Po odečtení korekce 6.6 od naměřených dat 6.3 dostáváme korigovaná data 6.7, která jsou vztažena přímo k UTC(PTB). Zde můžeme vidět téměř nulový průměrný drift (směrnice spojnice trendu -2.1 ps/den).



Kapitola 7

Závěr

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout a realizovat GNSS přijímač pro přesné generování času a frekvence s modulem u-blox LEA-M8T. Návrh a realizace přijímače byla úspěšná a je připraven pro budoucí experimenty.

Parametry přijímače byly změřeny v Laboratoři přesného času a frekvence FEL oproti časové stupnici FEL-time a nepřímo také proti stupnici UTC(PTB). Dle očekávání byla dlouhodobá synchronizace s UTC vynikající, naproti tomu krátkodobá stabilita nedosáhla katalogových hodnot a to pravděpodobně pro nevhodnou pozici antény při měření, na boční straně budovy.

Příloha A

Literatura

- [1] VIGNER, V. Přesný čas a synchronizace procesů v průmyslových distribuovaných systémech , 2017. Disertace. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta Elektrotechnická.
- [2] Product Summary NEO/LEA-M8T series: u-blox M8 GNSS timing modules [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.u-blox.com/en/docs/UBX-16000801>
- [3] NEO/LEA - M8T: u-blox M8 concurrent GNSS timing modules Data sheet [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.u-blox.com/en/docs/UBX-15025193>
- [4] LEA - M8S / LEA - M8T: u - blox M8 concurrent GNSS modules Hardware integration manual [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.u-blox.com/en/docs/UBX-15030060>
- [5] Gtr51jpg. Mesitasd.cz [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.mesitasd.cz/defence-katalog-produktu/gtr51jpg/@@resize?width=800&height=533&ratio=keep>
- [6] [Lea-m8t]. U-blox.com [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.u-blox.com/en/product/neolea-m8t-series>
- [7] Hliníková krabice IP54 120x103x53mm 1455N1202. GME [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/hlinikova-krabicka-u-ha1455n1202>

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Berger** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **452603**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Použití GNSS přijímačů u-Blox pro synchronizaci měřicích procesů

Název bakalářské práce anglicky:

Use of u-Blox GNSS receivers for synchronization of measurement processes

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte GNSS přijímač na bázi modulu u-Blox LEA-M 8T pro generování přesného času a frekvence. Dále navrhněte a realizujte modul konverze elektrického signálu (1 PPS a 10 MHz) na optický signál pro přenos jednovlákenným optickým vláknem. S realizovanými obvody proveďte ověřovací měření v Laboratoři přesného času a frekvence FEL.

Seznam doporučené literatury:

- [1] M. A. Lombardi, L. M. Nelson, A. N. Novick and V. S. Zhang: Time and Frequency Measurements Using the Global Positioning System. Cal Lab: The International Journal of Metrology, 2001.
- [2] NEO/LEA-M8T u-blox M8 concurrent GNSS timing modules. Data Sheet Document No. UBX-15025193 - R03.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **12.02.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce:

do konce letního semestru 2021/2022

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta