

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

Synchronizace času pomocí GPS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

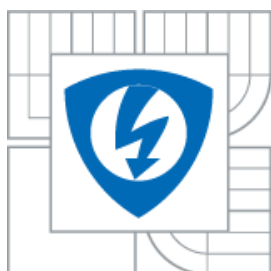
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Petr Švábeník

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

SYNCHRONIZACE ČASU POMOCÍ GPS

SYNCHRONIZATION OF THE TIME USING THE GPS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR ŠVÁBENÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PAVEL VYSKOČIL

BRNO, 2010

ORIGINÁLNÍ ZADÁNÍ

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Petr Švábeník
Bytem: Útěchovská 55, Brno, 644 00
Narozen/a (datum a místo): 14. října 1985 v Brně

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací
technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
 - ☒ diplomová práce
 - ☐ bakalářská práce
 - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Synchronizace času pomocí GPS

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Pavel Vyskočil

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- | | | |
|--|---|--------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> v tištěné formě | – | počet exemplářů: 2 |
| <input checked="" type="checkbox"/> v elektronické formě | – | počet exemplářů: 2 |

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Anotace:

Tento projekt pojednává o využití celosvětového družicového systému GPS k časové a frekvenční synchronizaci. Studie pojednává o základních principech GPS systému, jeho segmentech a dále možnosti jeho využití. Dále jsou popsány GPS přijímače vhodné k příjmu časových značek, které se dají dále využít k časové synchronizaci. Je popsán postupný návrh zapojení, které bude přijímat časové značky, snímat průběh externího signálu a vzorkovaný a označený přesnými časovými údaji jej posílat do PC ke zobrazení a dalšímu zpracování. Práce popisuje návrh hardwarové i softwarové části modulu a vytvoření obslužného programu na PC.

Klíčová slova:

GPS přijímač, střední oběžná dráha MEO, družice, NMEA, SiRF, fázový závěs PLL, napěťově řízený oscilátor VCO, signál PPS, ATmega128, FTDI, USART, sériová komunikace, ASCII, MATLAB.

Abstract:

This thesis discusses about using the worldwide satellite system GPS for time and frequency synchronization. This thesis presents study about basic principles of the GPS system, its segments and ways of using this system. Some GPS receivers suitable for receiving the time marks (pulses) used for time synchronization are described. Thesis contents designing of the circuit that will receive time marks and it will digitalize and record external signal and send it with precision time information to PC for displaying and post processing. Thesis also discusses about both hardware and software development of the synchronization module and software used in PC.

Keywords:

GPS receiver, medium elevation orbit MEO, satellite, NMEA, SiRF, phase locked loop PLL, voltage controlled oscillator VCO, PPS signal, ATmega128, FTDI, USART, serial communication, ASCII, MATLAB.

Bibliografická citace:

ŠVÁBENÍK, P. *Synchronizace času pomocí GPS: diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 59 stran, 4 přílohy. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Vyskočil.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Synchronizace času pomocí GPS jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Vyskočilovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....
podpis autora

Obsah

Obsah.....	8
Seznam obrázků	10
1 Úvod.....	11
2 Synchronizace	12
3 Systém GPS.....	13
3.1 Úvod k systému GPS.....	13
3.1.1 Vesmírný segment.....	13
3.1.2 Pozemní řídicí segment	14
3.1.3 Uživatelský segment	15
3.1.4 Navigační zpráva.....	16
3.1.5 SiRF, NMEA a Motorola protokoly.....	16
3.1.6 Výstup časových značek	18
4 GPS přijímač	20
Přijímač i-Lotus M12M Timing	20
Přijímač Navman Jupiter T	21
Přijímač Trimble Resolution T.....	21
Přijímač Leadtek 9101	22
5 Návrh zapojení	23
5.1 Blokové zapojení.....	23
5.2 Reálné zapojení	24
5.3 První verze.....	25
5.4 Druhá verze	25
6 Hardwarové vybavení	26
6.1 Obvod fázového závěsu PLL	26
6.2 Napětově řízený oscilátor	27
6.2.1 Oscilátor VCXO CFPV-45.....	28
6.2.2 Oscilátor TCVCXO CFPT-125	29
6.3 Dělička kmitočtu 4059	29
6.3.1 Návrh dělicích poměrů děličky	31
6.4 USART převodník FT232	32
6.5 Převodník úrovně ADG3300.....	33
6.6 Mikroprocesor ATmega 128	34
6.7 Stabilizátor LP2951	35
7 Programové vybavení.....	37
7.1 Program pro MCU ATMEGA128.....	38
7.1.1 Hlavní program, vyhledání začátku sekundy v signálu 100 PPS.....	38
7.1.2 Příjem dat z GPS přijímače (sériová linka USART).....	40
7.1.3 Příjem dat z A/D převodníku	41
7.1.4 Časování vzorků.....	41
7.1.5 Formát dat pro vysílání do PC.....	42
7.2 Přijímač dat na PC - terminál	42
7.3 Přijímač dat na PC v prostředí MATLAB.....	43

8	Měření modulu	46
8.1	PPS signál.....	46
8.2	Fázový závěs	47
8.3	Synchronizace mikroprocesoru	49
8.4	Sériová datová linka	50
9	Závěr.....	51
10	Použitá literatura	52
11	Seznam použitých symbolů a zkratk	54
	Příloha 1 – ASCII tabulka	55
	Příloha 2 – Schéma zapojení	57
	Příloha 3 – Deska plošných spojů, osazovací plán.....	58
	Příloha 4 – Seznam součástek	59

Seznam obrázků

Obr. 1 Data synchronizovaná signálem Clock nebo data jako Manchester kód [15]	12
Obr. 2 Oběžné dráhy družic GPS [2]	13
Obr. 3 Ilustrace GPS družice [2]	14
Obr. 4 Ilustrace Slunečního větru a jeho působení na magnetické pole Země [3].....	15
Obr. 5 Blokové schéma přijímače GPS.....	15
Obr. 6 Výstup 1 PPS a sériového portu v obvodu M12MT [7]	18
Obr. 7 Průběh signálu 100 PPS při příchodu celé sekundy u M12MT [7]	19
Obr. 8 Výstup 10 kHz u přijímače Jupiter T [9]	19
Obr. 9 Modul M12MT	20
Obr. 10 Přijímač Jupiter T.....	21
Obr. 11 Přijímač Resolution T	21
Obr. 12 Kvantizační chyba PPS signálu u Resolution T [11]	22
Obr. 13 Přijímač Leadtek LR-9101	22
Obr. 14 Blokové schéma přijímače	24
Obr. 15 Obvod 74HC4046.	26
Obr. 16 Výstupní napětí fázového závěsu PC2 v obvodu 4046.	26
Obr. 17 Funkční průběh signálů na fázovém závěsu obvodu 4046.	27
Obr. 18 Křivka závislosti změny frekvence na řídicím napětí oscilátoru VCO [10]	28
Obr. 19 Výstupní signál napěťově řízeného oscilátoru	28
Obr. 20 Napěťově řízený oscilátor CFPV-45 v SMD provedení [13]	28
Obr. 21 Napěťově řízený oscilátor CFPT-125 v SMD provedení [13].....	29
Obr. 22 Logický diagram děličky 4059 a pouzdro SO24W [14]	30
Obr. 23 Obvody FT232 [16]	32
Obr. 24 Zapojení FT232 [16]	33
Obr. 25 Mikroprocesor ADG3300 v pouzdře TSSOP-20 a jeho vnitřní zapojení [18]	33
Obr. 26 Mikroprocesor ATmega128-16A, 64 TQFP	35
Obr. 27 Stabilizátor LP2951 a jeho doporučené zapojení [21]	36
Obr. 28 Jeden komunikační rámec vysílání GPS přijímače	37
Obr. 29 Vývojový diagram hlavní části programu	38
Obr. 30 Vývojový diagram programu pro detekci sekundy v signálu 100 PPS.....	39
Obr. 31 Vývojový diagram programu pro příjem zpráv z GPS přijímače	40
Obr. 32 Vývojový diagram příjmu dat z A/D převodníku	41
Obr. 33 Vývojový diagram programu pro časování vzorků (vzorkovací frekvenci)	41
Obr. 34 Okno terminálu pro příjem dat z mikroprocesoru pomocí USB	43
Obr. 35 Program pro příjem a vykreslení dat v prostředí MATLAB.....	44
Obr. 36 Exportovaný obrázek z grafu	45
Obr. 37 Signál 1 PPS.....	46
Obr. 38 Signál 1 PPS – nástupná hrana.....	46
Obr. 39 Signál 1 PPS – sestupná hrana	47
Obr. 40 Signál oscilátoru a PPS signál.....	47
Obr. 41 Synchronizace sekundy na pulsy 100 PPS, časová osa 200 ms/dílek.....	48
Obr. 42 Synchronizace sekundy na pulsy 100 PPS, časová osa 5 μ s/dílek.....	48
Obr. 43 Synchronizace sekundy na pulsy 100 PPS, časová osa 5 ms/dílek.....	49
Obr. 44 Synchronizace sekundy na pulsy 100 PPS, časová osa 1 μ s/dílek.....	49
Obr. 45 Vysílání dat do PC (USART TX) synchronizované s příchodem sekundy	50
Obr. 46 Vstupní a výstupní data na převodníku úrovní ADG3300.....	50

1 Úvod

Tento projekt se zabývá časovou synchronizací, při které je využit systém GPS. Synchronizace je stav, kdy jsou dva nebo více systémů součinných v čase. Mohou tak proto fungovat koordinovaně. Časová synchronizace je důležitá pro některé systémy, kde by stav bez této koordinace neumožnil správnou činnost těchto systémů. Toto je důležité například v zařízeních, kdy existují dva vysílače vysílající signál na jediném rádiovém kmitočtu a je potřeba zajistit současné vysílání těchto signálů – např. v systémech diverzitního příjmu s využitím ochranného intervalu v OFDM.

K časové synchronizaci je možné použít mnoho metod. Při datové komunikaci dvou zařízení po vodičích se přenáší hodinový signál *clock*, nebo je signál přenášen vhodným linkovým kódem. I při této komunikaci dochází k určité synchronizaci. V případě použití elektrických vodičů na krátkou vzdálenost je tento systém nejvhodnější. Na středně velké vzdálenosti je dobré použití linkových kódů. Na velmi velké vzdálenosti nebo tam, kde nemůžeme vybudovat pozemní spoje, je potřeba signalizaci přenášet rádiovým signálem. Buď zvolíme vlastní systém přenosu (relativně složitý), nebo můžeme využít dostupných prostředků, tj. synchronizace pomocí GPS.

GPS je celosvětově dostupný systém pro navigaci a časovou synchronizaci. Díky této technologii je možné zajistit určení přesného času s přesností několika mikrosekund nebo i nanosekund. V této práci je popsán základní princip funkce GPS, jeho segmenty a dále jeho dosažitelné možnosti. Budou zde probrány parametry této technologie, její výhody, nevýhody a jedinečné vlastnosti.

Dále se tento projekt zaměří na zkoumání parametrů přijímačů GPS signálu, především těch, které jsou určeny právě pro časovou synchronizaci. Jsou zde popsány dostupné možnosti některých přijímačů, které lze k tomuto účelu využít. Protože existují různé typy modulů, jsou zmíněny i varianty přijímačů, které pro tento účel nejsou příliš vhodné.

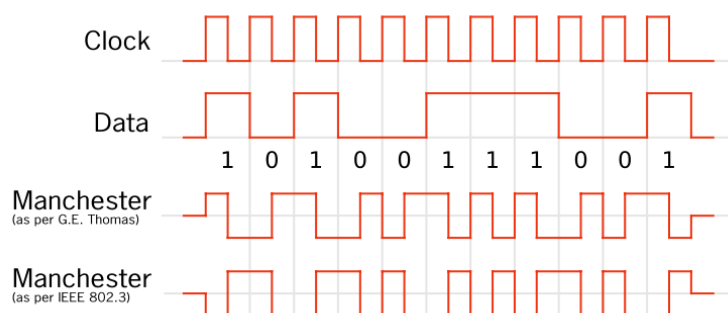
Je navrženo blokové schéma obvodu, který bude za pomoci fázového závěsu regulovat kmitočet oscilátoru na přesnou hodnotu. Za pomoci tohoto frekvenčního normálu se bude s přesnými časovými intervaly vzorkovat a digitalizovat externí signál. Blokové schéma je dále nahrazeno konkrétním zapojením obvodu obsahující všechny potřebné části od zvoleného GPS přijímače, frekvenčního normálu synchronizovaného pomocí fázového závěsu, vstupu synchronizačních impulsů PPS až po mikroprocesor, který bude naměřená data předávat do PC k dalšímu zpracování. Obslužný program mikroprocesoru zajistí příjem časových značek a informací o čase z GPS modulu. Tyto data zpracuje a dále předá po sériové lince ve vlastním formátu dat do PC. Program v prostředí MATLAB je přizpůsoben formátu dat, která jsou mikroprocesorem vysílána a po jejich přijmutí je zobrazí. Program umožňuje také uložení průběhů nebo přijatých dat k dalšímu zpracování.

2 Synchronizace

V aktuální době je v mnoha vědních oborech nezbytné zajistit s dostatečnou přesností informace o aktuálním času, datu a dalších globálních dat.

Datové přenosové systémy mohou pracovat asynchronně nebo synchronně. Zpočátku se využívaly synchronní systémy, které byly jednodušší na konstrukci, ale bylo nutné mezi počátečním a koncovým zařízením přenášet synchronizační signál. Bohužel tento signál vyžaduje další „paralelní“ spojení. V některých případech je tato varianta vhodná, například na velmi krátké vzdálenosti. Ale vzdálené spoje by vedení dalšího vodiče nebo obsazení dalšího kmitočtového pásma znamenalo větší finanční náklady. Proto se v určitých oblastech přešlo k asynchronním systémům. Ty mohou pracovat s jediným datovým tokem, který obsahuje jak přenášenou informaci, tak potřebná synchronizační data. I přes sníženou účinnost (rychlost informačních dat) je asynchronní systém výhodnější právě z důvodu současného přenosu synchronizačních dat.

Příkladem zajištění synchronizace dat je *Clock* signál nebo *Manchester kód*:



Obr. 1 Data synchronizovaná signálem Clock nebo data jako Manchester kód [15]

V některých případech kdy se nepřenáší žádný datový tok, ale je potřeba v přesně daný okamžik ovládat dva polohově odlišné systémy, je nutné nějakým způsobem zajistit příjem informace o času. K tomuto nám s výhodou poslouží GPS systém, který je dostupný po celém povrchu Země a jeho obsahem je také aktuální světový čas s velmi vysokou přesností.

3 Systém GPS

Existuje několik družicových navigačních systémů: GPS, GLONASS, GALILEO, LORAN a další. GPS je dnes nejpoužívanějším systémem, protože je funkční, odzkoušený, je volně k dispozici a dosahuje velmi dobrých parametrů. Propracovanost tohoto navigačního systému jej předurčuje pro řadu aplikací nejen pro polohovou navigaci na Zemi, ale také pro navigaci v blízkosti Země a například i jako časová nebo frekvenční reference. Právě tento přesný časový normál bude referenčním bodem k časové synchronizaci.

3.1 Úvod k systému GPS

NAVSTAR GPS, anglicky NAVigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System, je americký systém vytvořený a určený především pro určování polohy na povrchu Země a zjištění světového času. Toto jsou dva základní parametry zjišťované GPS přijímačem. Dalšími jednoduchými výpočty můžeme zjistit např. rychlost pohybu objektu (přijímače). Hlavními segmenty jsou 3 části: vesmírná, řídicí a uživatelská.

3.1.1 Vesmírný segment

Nejdůležitějšími subjekty je 21 základních a 3 záložní družice obíhající Zemi na šesti středních oběžných drahách (tzv. IEO – Intermediate elevation orbit) posunutých o 60° s inklinací 55° ve výšce přibližně 20 183 km. Doba oběhu družic je polovina hvězdného dne, tj. cca 11 hodin a 58 minut. Touto kombinací je zajištěno, aby byl za předpokladu přímé viditelnosti v každém místě na Zemi vždy signál alespoň čtyř družic (4 družice jsou minimum pro úplné zaměření). Maximální počet viditelných družic v jeden okamžik je 12, proto jsou přijímače (popsány dále) konstruovány tak, aby mohly současně přijímat až 12 satelitů.



Obr. 2 Oběžné dráhy družic GPS [2]

Každá družice nepřetržitě vysílá směrem k Zemi sled navigačních zpráv, které obsahují čas vyslání signálu, informace o orbitu (tzv. efemerid, angl. ephemeris) a další doplňkové informace o stavu satelitů (almanac). Přijímač GPS dokáže z těchto dat a zpoždění datové informace spočítat svoji polohu. Pro spolehlivé určení umístění je nutné přijmout signál alespoň ze třech družic, navíc pro zjištění nadmořské výšky je potřeba přijímat signál minimálně ze čtyř družic.

Pro potřeby této práce je důležité získat z družic přesné časové informace. UTC čas zajišťovaný samotnými družicemi pomocí atomových hodin je vysílán každou družicí. Přijímač v této chvíli i z jedné družice zná UTC čas, ale dokud není zasynchronizovaný alespoň na 4 družice, nebude znát svoji polohu vůči družicím v daném 3D prostoru, a proto nemůže spočítat časové zpoždění přijatého signálu. Pro získání přesného času je tedy nutné, aby byl přijímač zafixován alespoň na 4 družice. S větším počtem družic bude známa přesnější poloha přijímače a potom i aktuálního času



Obr. 3 Ilustrace GPS družice [2]

3.1.2 Pozemní řídicí segment

Jak již bylo řečeno, družice GPS obíhají zemi na orbitu IEO. Největší stabilitu mají družice na vysokých oběžných drahách. Čím menší výšku nad povrchem Země mají, tím větší rychlost musí družice mít. Při vysokých rychlostech relativně nízko nad Zemí se projevuje nezanedbatelný brzdňý vliv zbytků atmosféry na družici. Tato potom mění svoji rychlost, výšku i směr. Další vlivy na pohyb družice může mít i přitažlivost okolních planet a objektů jako je Měsíc, Jupiter nebo Slunce. Samostatnou částí je také jev zvaný sluneční vítr [3] (obecně hvězdný vítr, Slunce je pouze jedna z mnoha hvězd ve Vesmíru), kdy Slunce vystřeluje do Vesmíru proud částic o poměrně velké rychlosti 450 km/s. Sluneční vítr má vliv na stabilitu družice jako takový, ale i nepřímo například tím, že zakřivuje magnetické pole Země.



Obr. 4 Ilustrace Slunečního větru a jeho působení na magnetické pole Země [3]

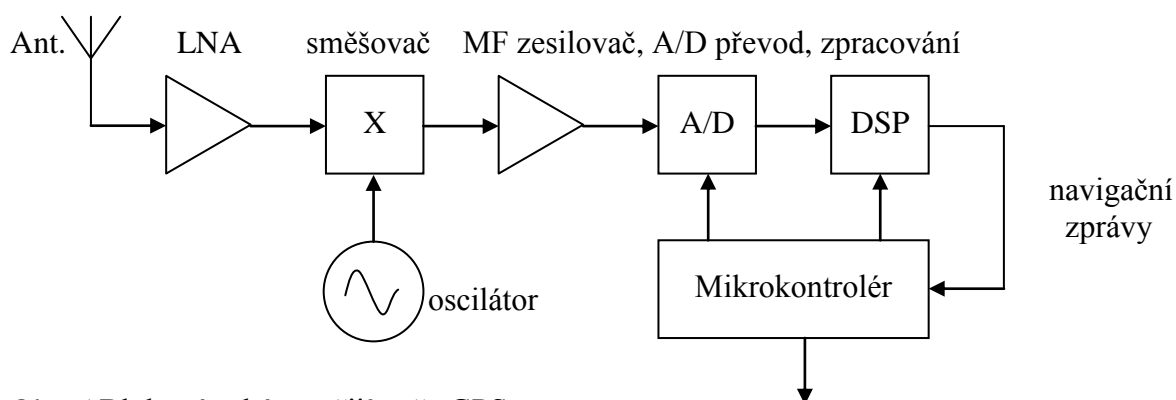
Aby byla zajištěna správná informace o poloze družice, byly na Zemi vybudovány řídicí střediska – hlavním MCS (Master Control Station) je stanice v Colorado Springs. Tato stanice přesně zaměřuje družice a vypočítává efemeridy a další parametry družic, které jsou uplinkem (směr přenosu ze Země na družici) družicím předány. Tyto parametry se potom vysílají v downlinku (směr družice – Země) k uživatelským zařízením, aby si tato zařízení mohla polohu družic předpovědět a tak správně určit i svou polohu.

V některých případech jako je počáteční umístění na oběžnou dráhu nebo pozdější opravení polohy družice může řídicí stanice dát pokyn k zažehnutí motorů na družici a posunutí v nějakém směru případně nasměrování osy otáčení.

3.1.3 Uživatelský segment

V této části jsou obsaženy všechny GPS přijímače. Z komerčního (uživatelského) hlediska se jedná o přístroj obsahující přijímač dále doplněný o ovládací software často s mapovými podklady.

Z pohledu technologického je GPS přijímačem samotný modul s anténou (příp. anténním vstupem), který zpracovává signály přijímané z dostupných družic (tzv. navigační zprávy) na frekvenci 1575,42 MHz s šířkou pásma $\pm 1,023$ MHz. Všechny družice vysílají na stejném kmitočtu, jejich signály jsou rozlišeny pseudonáhodnou frekvencí Goldových kódů, jedná se tedy o DS-CDMA systém [1].



Obr. 5 Blokové schéma přijímače GPS

Obvod z dostupných údajů a časového zpoždění signálu vypočte svoji polohu, zjistí aktuální čas, případně z těchto dvou dat dopočítá rychlost pohybu jako překonanou vzdálenost za jednotku času. Výstupem GPS přijímače je potom soubor dat o poloze, výšce, času,

rychlosti a mnoha dalších údajů. K propojení přijímače s dalšími zařízeními je jeho výstup normován do některého standardu, např. SiRF nebo NMEA. Absolutní většina přijímačů má také výstup časových značek PPS (viz 0) s periodou 1 s.

3.1.4 Navigační zpráva

Signál z družice, tzv. navigační zpráva, obsahuje blok 1500 bitů rozdělených do 5 rámců po 300 bitech. Ty jsou vysílány rychlostí 50 b.s^{-1} . Rámce jsou složeny následovně:

- Rámec 1 – GPS datum a čas, stav a kondice družice
- Rámce 2 a 3 – efemeridy
- Rámce 4 a 5 – obsahují 1/25 almanacu, která se předává postupně v 25ti blocích.

Právě z důvodu stahování těchto dat je výpočet polohy družic a následné vypočtení vlastní polohy časově náročné. V případě tzv. studeného startu, kdy přijímač nemá žádné údaje o družicích, trvá samotné stahování dat celkem: $1500 \text{ bitů} / 50 \text{ b.s}^{-1} = 30 \text{ s}$. Až po této době může GPS přijímač znát dráhy družic. Pokud má přijímač již tato data načtená (např. po novém zapnutí, kdy byl přijímač v provozu před nedlouhou dobou), zachycení trvá jen několik málo sekund (toto se označuje jako tzv. horký start).

3.1.5 SiRF, NMEA a Motorola protokoly

GPS přijímač je zajišťuje sledování družic a příjem navigačních zpráv. Výstupem přijímače je datový tok podle zvoleného protokolu, obvykle ve formátu SiRF nebo NMEA 0183. NMEA [5] (National Marine Electronics Association) vytvořila standard (interface) pro předávání zpráv mezi různými námořnickými zařízeními. Tohoto standardu se nyní právě využívá i pro předání navigačních zpráv z GPS přijímače.

NMEA

NMEA protokol se skládá z několika částí. Nejprve se rozděluje typ zprávy podle povahy samotného obsahu. Možné typy zpráv jsou zobrazeny v tabulce:

Tab. 1 Úvodní část protokolu NMEA – typ zprávy [5]

Zpráva	Význam
GGA	Čas, lokace a data o zafixování
GLL	Zeměpisná šířka, délka, UTC čas zafixování a status
GSA	Provozní mód GPS přijímače, satelity určené k získání polohy, hodnoty DOP
GSV	Počet viditelných satelitů, čísla satelitů, elevace, azimut a hodnoty S/N
MSS	Poměr signál / šum, síla signálu, frekvence a bitová rychlost
RMC	Čas, datum, pozice, směr a rychlost pohybu
VTG	Směr a rychlost vztažená k povrchu země
ZDA	Časová zpráva PPS (synchronizovaná k PPS)
150	Přípraven k vyslání zprávy
151	GPS Data a rozšířená maska efemeridu
152	Rozšířená integrita efemeridu
154	Rozšířené potvrzení efemeridu (ACK)

Zde vidíme zprávy a jejich obsah. Zprávy GGA, GLL, RMC a ZDA obsahují určité časové informace o vyslání zprávy. Zpráva ZDA je určena pro vyslání tzv. UTC času (koordinovaný světový čas, angl. Coordinated Universal Time) a několika dalších informací. V následující tabulce je rozpis zprávy ZDA.

Příklad zprávy:

\$GPZDA,181813.00,14,10,2003,00,00*4F

Tab. 2 Datový formát ZDA zprávy (NMEA)

Název	Příklad	Jednotky	Popis
ID	\$GPZDA		hlavička
UTC čas	181813.00	hhmmss.ss	Čas UTC ve formátu: hh = hodiny 00 až 23 mm = minuty 00 až 59 ss = sekundy 00 až 59
Den	14	dd	01 až 31
Měsíc	10	mm	01 až 12
Rok	2003	yyyy	1980 až 2079
Místní čas. Pásmo	00	hh	Časové pásmo UTC -13 až 13
Místní minutové pásmo	00	mm	Minutové pásmo UTC 0 až 59
Kontrolní součet	*4F		
<CR> <LF>			Konec zprávy

Motorola

Motorola protokol je formát, který podporuje GPS modul M12MT vyrobený stejnou firmou. Má určité výhody v jednoduchosti použití, ale není standardem pro jiné GPS přístroje.

Jedním z důležitých zpráv je souhrnná zpráva (@@Ha)

Příjemem je zpráva:

@@HamdyhmsffffaaaooohhhhhmmmmaaaaooohhhhhmmmmVVvvhddttim
sidd ('imsidd' série se opakuje pro 11 kanálů)
ssrrccooooTTushmvvvvvvC<CR><LF>

Tab. 3 Formát datové zprávy GPS přijímače (formát Motorola)

Znak(y)	Vysvětlivka (formát dat)
@@Ha	Počáteční znaky souhrnné zprávy
m	měsíc (1 až 12)
d	den (1 až 31)
yy	rok (1998 až 2079)
h	hodiny (0 až 23)
m	minuty (00 až 59)
s	sekundy (00 až 60)
ffff	dílky sekund (0 až 999 999 999 ns)
...	další data o pozici, rychlosti a satelitech
C	Kontrolní součet
<CR><LF>	Konec zprávy

Vysílání souhrnné zprávy je nutné nastavit vysláním této sekvence:

`@@HarC<CR><LF>`

kde

r – četnost vysílání (0x00 – jedenkrát, 0x01 až 0xFF – jedenkrát za n sekund)

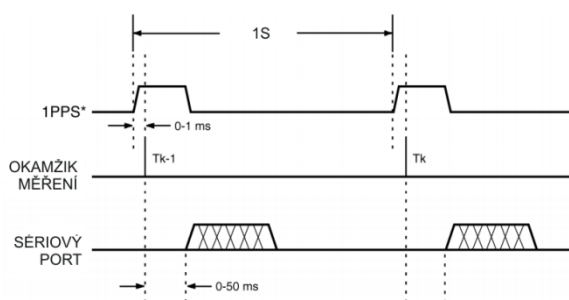
C – kontrolní součet,

`<CR><LF>` - zakončovací znaky.

3.1.6 Výstup časových značek

1 PPS

Absolutní většina modulů obsahuje speciální výstup, na kterém GPS přijímač generuje časové značky, tzv. PPS (pulse per second – impulzy za sekundu). Nejčastěji se vyskytuje výstup 1 PPS, kde se s periodou 1 s objevuje jeden impuls o délce přibližně 200 ms. Synchronizace je možná na nástupnou hranu, u sestupné hrany není zaručena časová přesnost.



*1PPS CABLE DELAY AND 1PPS OFFSET = 0

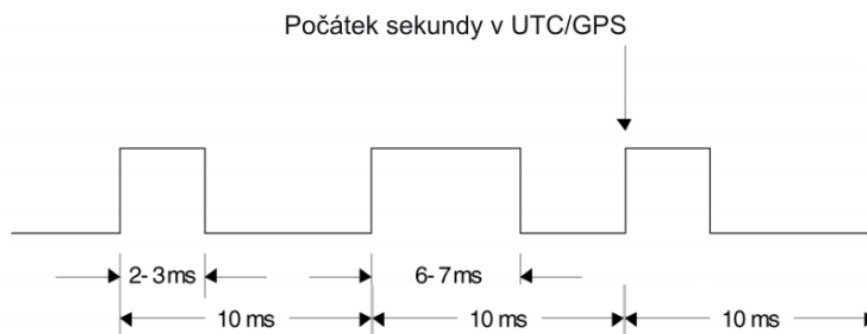
Obr. 6 Výstup 1 PPS a sériového portu v obvodu M12MT [7]

Pozor! U výstupu 1 PPS Je nutné zkontrolovat specifikaci výrobce, zdali zaručuje přesnost a použitelnost tohoto výstupu k přesnému časovému měření.

100 PPS

Některé moduly mají možnost i dalších výstupů, např. 100 PPS (u M12MT). Tento výstup se oproti 1 PPS jeví výhodněji, protože zaručuje lepší synchronizaci oscilátoru (impuls přichází každých 10 ms).

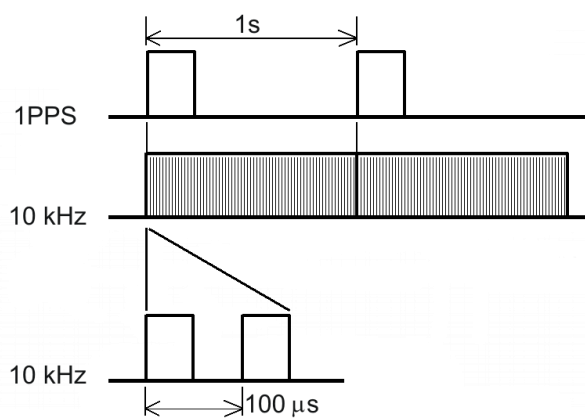
Synchronizace je možná pouze na nástupnou hranu, protože každý stý pulz (po uběhnutí 1 sekundy) má delší trvání ve vysoké úrovni (jinou střidu) – viz obr. 7. Tímto se indikuje, že následující hrana bude odpovídat nové celé sekundě.



Obr. 7 Průběh signálu 100 PPS při příchodu celé sekundy u M12MT [7]

10 kHz

Některé speciální přijímače časových značek, např. přijímač Jupiter T má výstup, na kterém je obdélníkový signál s frekvencí 10 kHz a je synchronizován nástupnou hranou s každou přichozí sekundou.



Obr. 8 Výstup 10 kHz u přijímače Jupiter T [9]

4 GPS přijímač

Samotný GPS přijímač lze již snadno obstarat jako hotový modul, který si sám po připojení napájecího napětí a signálu družic (antény) zajistí jejich sledování. Takovýto modul je samostatnou jednotkou pro příjem signálu. Jeho výstupem jsou různá získaná a vypočítaná data obvykle přenášená protokolem NMEA či SiRF. Zvláštním výstupem bývá výstup synchronizačních značek 1 PPS, 100 PPS případně jiných. Tyto musí být od výrobce určeny k řízení času nebo frekvence. Pokud výrobce nezaručuje přesnost tohoto výstupu, nebude možné jej použít jako referenci.

Přijímač i-Lotus M12M Timing

M12MT [7] je dvanáctikanálový GPS přijímač speciálně určený pro časování externích zařízení. Výrobce udává, že lze s tímto modulem získat přesnost až několik nanosekund.



Obr. 9 Modul M12MT

Modul má tyto důležité parametry

- možnost synchronizace až se 12 satelity,
- programovatelný výstup s časovými značkami 1x za sekundu (1 PPS) nebo 100x za sekundu (100 PPS) s přesností ± 25 ns
- napájecí napětí je +2,85 V až 3,15 V, proud do 52 mA,
- sériová komunikace v 3 V TTL/CMOS úrovních,
- umožňuje vysílání zeměpisné šířky, délky, výšky, rychlosti a směru pohybu, času a satelitních informací protokolem NMEA 0183 v uživatelsky daných intervalech,
- možnost zálohování napájení Lithiovou baterií na desce,
- přesnost polohy do 5 m pro 1-sigma a do 10 m pro 2-sigma,
- start (typicky): horký: 15 s, teplý: 40 s, studený: 150 s.

Teoretická přesnost času se odvíjí od znalosti polohy přijímače a časovému zpoždění signálu. V případě nepřesnosti zaměření 10 metrů pro šikmou vzdálenost se změni zpoždění signálu o:

$$t = s/c = 10 \text{ (m)} / 300\,000\,000 \text{ (m/s)} = 33,3 \text{ ns.} \quad (3.1.1)$$

Přijímač Navman Jupiter T

Jupiter-T [9] je dvanáctikanálový GPS přijímač pro časovou a frekvenční referenci. Zvláštností tohoto modulu je kromě výstupu 1 PPS také přesný kmitočet 10 kHz.



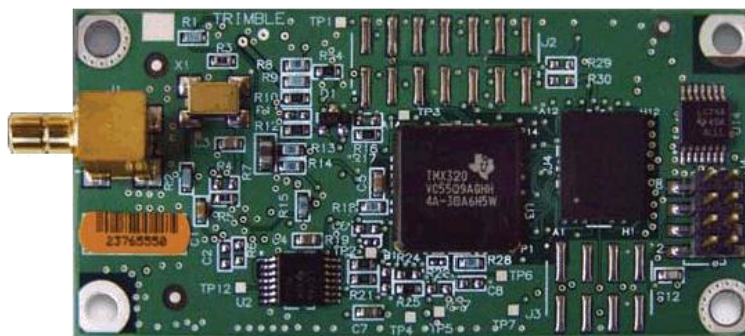
Obr. 10 Přijímač Jupiter T

Parametry:

- 12-ti kanálový přijímač,
- výstup s časovými značkami 1 PPS nebo výstup obdélníkového napětí 10 kHz synchronní s UTC časem,
- napájecí napětí +5 V, proud cca 195 mA,
- start (typicky): horký: 20 s, teplý: 48 s, studený: 120 s.

Přijímač Trimble Resolution T

Resolution T [11] je GPS přijímač určený pro časovací i navigační zařízení. Tento modul podporuje 1 PPS signály synchronní nástupnou hranou k UTC.



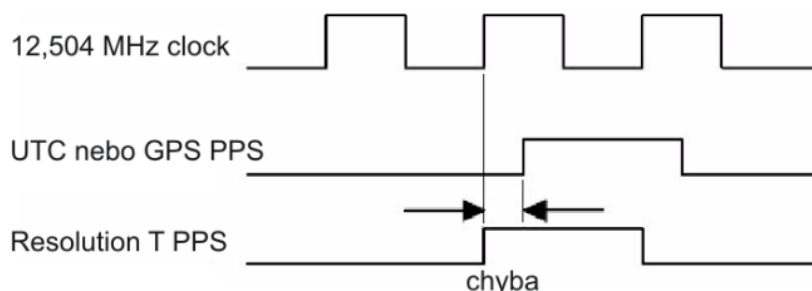
Obr. 11 Přijímač Resolution T

Parametry:

- 12-ti kanálový přijímač,
- výstup s časovými značkami 1 PPS synchronní s UTC časem,
- přesnost PPS je 15 ns (1-sigma), šířka PPS je 20 ns,

- podporuje protokol NMEA 0183 v3.0, 4800 Bd, 8-bitový; TSIP, 9600 Bd, 8-bitový,
- NMEA zprávy typu GGA, VTG, GLL, ZDA, GSA, GSV a RMC,
- napájecí napětí +3,3 V (3,0 – 3,6 V), příkon 350 mW (110 mA),
- start (prav. 90%): horký: <18 s, teplý: <45 s, studený: <50 s.

Časovací signál 1 PPS je vnitřně synchronní ke GPS času. Výstup 1 PPS je vzorkován s frekvencí 12,504 MHz a může být přepnut pouze s nástupnou a sestupnou hranou. Protože perioda vzorkovače je cca 80 ns, synchronizace výstupu bude k některé z hran jdoucí po 40 ns. V nejhorším případě, kdy bude časový vzorek přesně v půlce vzorkovače, může vzniknout chyba odpovídající polovině délky úrovně mezi hranami, tedy 20 ns.



Obr. 12 Kvantizační chyba PPS signálu u Resolution T [11]

Přijímač Leadtek 9101

GPS modul LR-9101 od firmy Leadtek [8] je 20-ti kanálový přijímač s inovovaným zpracováním signálu procesorem SiRF Star III.



Obr. 13 Přijímač Leadtek LR-9101

Parametry:

- 20-ti kanálový přijímač,
- výstup 1 PPS se šířkou 1 μ s, výstup NENÍ určen k řízení oscilátorů apod.,
- napájecí napětí 3,2 – 5 V, proud 49 mA,
- protokol NMEA-0183 nebo SiRF Binary,
- přesnost: polohově cca 10 m bez korekce, časová 1 μ s k času GPS,
- start (typicky): horký: 1 s, teplý: 35 s, studený: 42 s.

Výrobce nezaručuje přesnost výstupu 1 PPS k řízení oscilátorů a časovacích obvodů, proto tento modul není vhodný k časové referenci.

5 Návrh zapojení

Základními stavebními prvky zapojení, které bude přijímač časové značky a vzorkovat signál jsou GPS přijímač a mikroprocesor. GPS přijímač se bude starat o zajištění synchronizace s GPS družicemi, tedy s UTC časem a bude poskytovat synchronizační signál PPS a časová data. Oba tyto signály zpracuje mikroprocesor. Ten bude navíc vzorkovat externí signál A/D převodníkem. Další potřebnou součástí je oscilátor. Bude použit říditelný krystalový oscilátor VCXO. Za pomoci děliček a fázového závěsu se bude držet frekvence tohoto oscilátoru přesná a co nejvíce konstantní. Další doplňkové obvody budou popsány dále.

5.1 Blokové zapojení

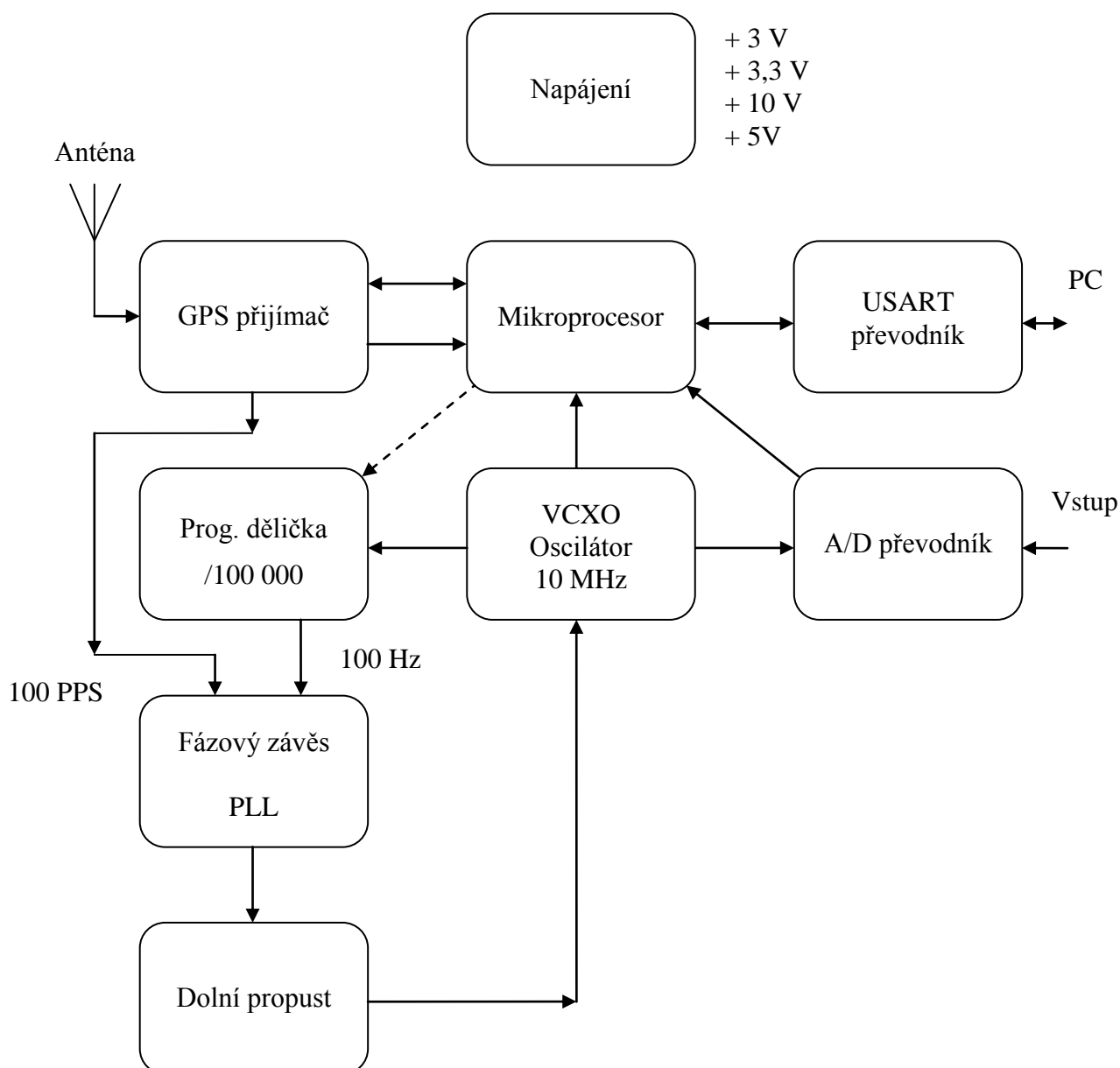
Napájení GPS přijímače vyžaduje napětí +3 V, ostatní obvody budou napájeny napětím +3,3 V, +5 V nebo +10 V. Zde se jedná o CMOS obvody řady 40xx, krystalový oscilátor, A/D převodník, mikroprocesor a další.

Z GPS přijímače použijeme výstup časových značek 100 PPS nebo 1 PPS. Fázový závěs, který bude reagovat na nástupné hrany PPS signálu a signálu oscilátoru jej bude synchronizovat na fázi 0°. Pro potlačení šumu a kolísání řídicího napětí oscilátoru bude před VCO zařazen filtr dolní propusti (integrační článek). Časovou konstantu integračního článku $\tau = R \cdot C$ zvolíme tak, aby bylo zachycení fázového závěsu dostatečně rychlé (menší τ) a zároveň aby nedocházelo k odlaďování oscilátoru při vybíjení kondenzátoru (větší τ). Předpokládá se chod v setrvalém stavu (oscilátor bude pouze na jediném kmotočtu) a jediné zpoždění, které se bude vyskytovat, je náběh oscilátoru při zapnutí.

Napájení obvodů: použité a možné

GPS přijímač M12MT	+ 3,0 V (2,85 až 3,15 V)
Anténa GPS přijímače	+ 5,0 V (3,0 až 5,0 V)
VCXO Oscilátor CFPV-45	+ 3,3 V
Mikroprocesor ATmega128	+ 5,0 V (4,5 až 5,5 V)
Dělička HEF4059	+ 10,0 V (5 až 15 V)
Fázový závěs 4046	+ 3,3 V (2,0 až 6,0 V)
USART převodník FT232	+ 5,0 V (1,8 až 5,25 V), +3,0 V data

Napájecí napětí bude dále přesněji probráno v detailech o každém obvodu.



Obr. 14 Blokové schéma přijímače

5.2 Reálné zapojení

Zapojení bylo nejprve promyšleno na základě blokového schématu, viz obr. 14. Pro kreslení konkrétního schématu a desky plošných spojů (DPS) byl zvolen program Eagle 4.15. Jedná se o velmi rozšířený program, který umožňuje vytvoření schématu pomocí mnoha součástek, a návrh desky, která odpovídá nakreslenému schématu. Program je distribuován s řadou knihoven obsahující mnoho součástek (schematická značka a reálný průmět na desku). Program umožňuje změny nebo vytváření těchto knihoven. To je také velmi vhodné, protože řada součástek použitých v tomto projektu není příliš běžná a dosud v dodaných knihovnách nebyly obsaženy. Byla proto vytvořena knihovna obsahující náhradní schematickou značku a provedení GPS přijímače Motorola M12MT. Dále byly překresleny součástky ADG3300,

CFPV-45, LP2951 a další, které nakonec nebyly použity. Byla také využita doplňková knihovna *SparkFun-3-2-07.lbr*, která je volně k dispozici na internetu [20].

5.3 První verze

V programu Eagle 4.15 bylo navrženo schéma zapojení. Vstupní napájení bylo +5 V (rozsah cca +4 V až 11 V). Zapojení obsahovalo stabilizátory ADP3334, které vytváří napětí +3 V pro GPS modul a +3,3 V pro ostatní obvody.

PLL: Další částí zapojení je oscilátor 10 MHz synchronizovaný pomocí výstupu PPS, děliček a fázového závěsu na GPS signál. Předpokládá se použití oscilátoru nejen jako zdroj další synchronizace, ale také oscilátor mikrokontroléru. Děličky jsou programovatelné propojkami pro různé synchronizační výstupy GPS modulů (1 PPS, 100 PPS, 10 kHz).

Komunikace: Nejdůležitějším prvkem je zde GPS přijímač, který je připojen sériovým portem k převodníku FT232 na USB port. Pro budoucí použití jsou zapojeny jumpery, kdy se bude předpokládat ovládání GPS modulu pomocí mikroprocesoru Freescale MCF51JM128. Nyní je modul připojen pouze k PC. Samotný mikrokontrolér by měl obsluhovat GPS přijímač a zápis dat. K jeho programování jsou zde porty BDM a USB port.

DPS: Ke schématu byla vyrobena odpovídající deska plošných spojů (DPS). Při výrobě desky došlo ke slití některých plošek DPS u mikroprocesoru. Přesto byla část zapojení osazena a testována. Pro další verzi byl z praktických důvodů změněn mikroprocesor.

5.4 Druhá verze

Při testování předchozího zapojení byly zjištěny některé nepředvídané události, které vyústily k přepracování a vylepšení schématu. Děličky kmitočtu na 10 MHz nefungovaly při napájení 3,3 V. Mikroprocesor MCF51JM128 byl nahrazen obvodem ATmega128-16 z důvodů větších pájecích plošek snadnějších na výrobu. Došlo tedy k více změnám.

Napájení: Vstupní napětí je cca +12 V. Toto napětí se dále stabilizuje obvody LP2951 na +10 V pro obvody 4059 a +3,3 V pro oscilátor VCXO a PLL 4046. Stabilizace napětí +3,0 V pro GPS přijímač a komunikační část je provedena až z napětí +5 V z důvodu velkého ztrátového výkonu na stabilizátoru (při stabilizaci z 12 V by docházelo k přetížení). Pro vytvoření +5,0 V je použit obvod 7805 v provedení D-PAK (proudové zatížení až 1 A).

PLL: Fázový závěs je složen z následujících obvodů: oscilátor CFPV-45, děličky 4059, a PLL 4046. Pro převod úrovně signálu oscilátoru z +3,3 na +10 V a na +5 V jsou použity jednoduché zesilovače s FET tranzistorem BSS123.

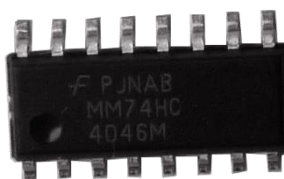
Komunikace: Ke komunikaci s GPS přijímačem pomocí PC je možné použít USB port, za kterým je zařazen USART převodník FT232. Tento má nastavenou komunikační úroveň na 3,0 V. Pro samostatnou komunikaci procesoru s GPS přijímačem bude sloužit sériové rozhraní. Pro převod dat mezi úrovněmi +3,0 V a +5,0 V je použit obvod ADG3300.

6 Hardwarové vybavení

Celý obvod smyčky fázového závěsu (PLL) se bude skládat z napěťově řízeného oscilátoru (VCO nebo VCXO – voltage controlled x-tal oscillator), děličky kmitočtu, fázového detektoru a integračního článku. Následuje popis použitého zapojení obvodů.

6.1 Obvod fázového závěsu PLL

Fázový detektor bude srovnávat kmitočet oscilátoru s kmitočtem získaný z GPS přijímače. Pro tento účel se vyrábí například obvod 4046 [12], který obsahuje fázový závěs se třemi výstupy pro různé úhly zachycení.



Obr. 15 Obvod 74HC4046.

Fázové komparátory v tomto obvodu jsou následující. Porovnává se vstup SIG (pin 14) se vstupem COMP (pin 3). U_{OUT} je střední napětí výstupu za dolní propustí.

PC1 (pin 2)

Zachycení na 0 až 180 °, střed 90 °. Obvod XOR, nutná střída 50 %.

$$U_{OUT} = \frac{V_{CC}}{\pi} (\varphi_{SIG} - \varphi_{COMP}) \quad (6.1.1)$$

PC2 (pin 13)

Zachycení na -360 až 360 °, střed 0 °. Řízený hranou, nezávisí na střídě.

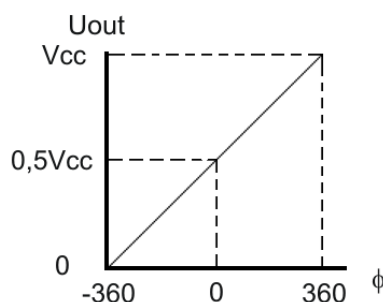
$$U_{OUT} = \frac{V_{CC}}{4\pi} (\varphi_{SIG} - \varphi_{COMP}) \quad (6.1.2)$$

PC3 (pin 15)

Zachycení na 0 až 360 °, střed 180 °. Řízený hranou, nezávisí na střídě.

$$U_{OUT} = \frac{V_{CC}}{2\pi} (\varphi_{SIG} - \varphi_{COMP}) \quad (6.1.3)$$

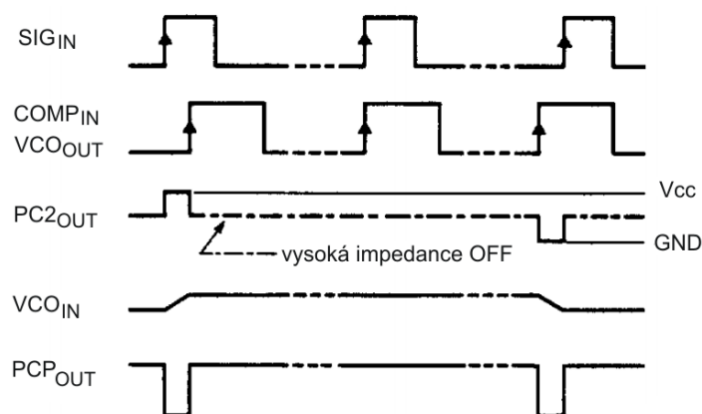
Pro toto zapojení byl vybrán fázový komparátor PC2. Je výhodný pro střední úhel zachycení 0 ° a regulaci v celém pásmu úhlů. Při zachycení je PC2 také stabilnější než PC1 nebo PC3. Výstupem fázového závěsu tedy budou impulsy, které vyfiltrujeme integračním článkem. Potom se tímto ustáleným středním napětím bude řídit VCO. Průběh výstupního napětí smyčky PLL druhého typu obvodu 4046 je na obr. 16.



Obr. 16 Výstupní napětí fázového závěsu PC2 v obvodu 4046.

Předpokládejme zachycení fázového závěsu na fázi 0° mezi vstupními signály. Potom bude výstupní napětí PLL polovina napájecího napětí, při $U_{cc} = 3,3 \text{ V}$ to bude $1,65 \text{ V}$.

Do fázového detektoru budou přicházet dva signály, první jako referenční z GPS přijímače, druhý z oscilátoru frekvenčně podělený tak, aby se frekvence shodovala s GPS časováním. Oscilátor můžeme použít s frekvencí např. $10,000 \text{ MHz}$. Pokud použijeme synchronizační výstup 100 PPS a fázový závěs reagující na nástupnou hranu, nebude nutné signály nijak tvarovat. V tomto případě bude vstupní frekvence 100 Hz , dělička za oscilátorem bude muset dělit $/100\,000$ (dále viz návrh děličky).



Obr. 17 Funkční průběh signálů na fázovém závěsu obvodu 4046.

Parametry obvodu 4046:

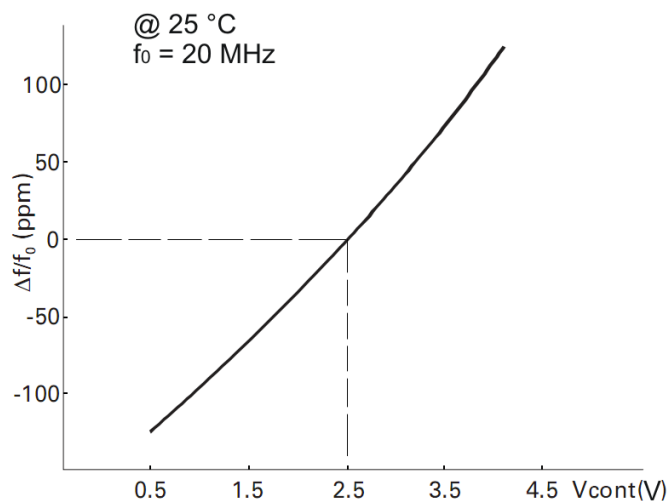
- Napájení interního VCO $3,0$ až $6,0 \text{ V}$ (typ. $5,0 \text{ V}$),
- Napájení logických obvodů $2,0$ až $6,0 \text{ V}$ (typ. $5,0 \text{ V}$), *vhodné bude napájení napětím $3,0 \text{ V}$ z důvodu kompatibility s PPS výstupem GPS přijímače a vstupem VCXO
- Pracovní kmitočet do 19 MHz .
- Vstupní kapacita $C_i = 3,5 \text{ pF}$.

6.2 Napětově řízený oscilátor

Jako zdroj kmitočtu použijí integrovaný krystalový oscilátor [10], [13] (VCO nebo VCXO). Výhodou použití tohoto typu oscilátoru je velká stabilita a přesnost, obdélníkové výstupní napětí a v malém rozsahu možnost změny kmitočtu. Kmitočet napětově řízeného oscilátoru je při řídicím napětí $\frac{1}{2} V_{cc}$ přibližně f_0 , tj. na základní frekvenci krystalu s odchylkou 0 ppm (pulses per million). Toto udává výrobce krystalů pro určitou teplotu, na obrázku níže pro 25°C .

Celý rozsah změny kmitočtu je typicky $\pm 100 \text{ ppm}$. Stabilita kmitočtu samotného oscilátoru je udávána $\pm 25 \text{ ppm}$ resp. $\pm 50 \text{ ppm}$ při $U_{CONT} = \frac{1}{2} V_{cc}$ podle typu oscilátoru. Řídicí napětí U_{CONT} může být v rozsahu (typicky):

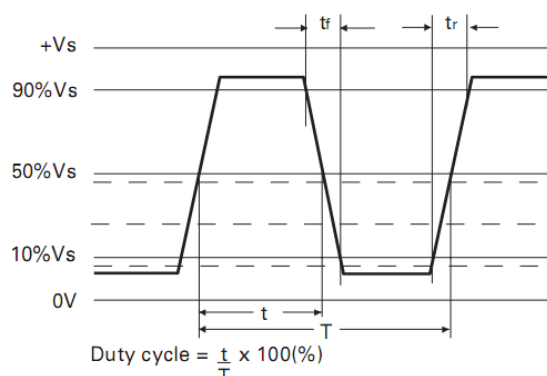
- $0,5$ až $4,5 \text{ V}$ při napájecím napětí 5 V , střední kmitočet při napětí $2,5 \text{ V}$,
- 0 až $3,3 \text{ V}$ při napájecím napětí $3,3 \text{ V}$, střední kmitočet při napětí $1,65 \text{ V}$.



Obr. 18 Křivka závislosti změny frekvence na řídícím napětí oscilátoru VCO [10]

Výstupem VCO je obvykle ořezané sinusové napětí, prakticky se dá považovat za obdélníkový signál se střídou 50 %. Výstupní napětí VCXO je znázorněno na obr. 19.

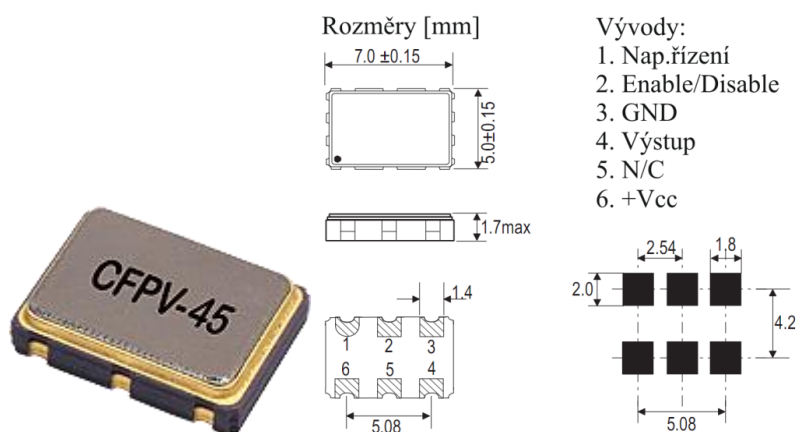
Výstup VCXO CMOS/TTL



Obr. 19 Výstupní signál napětově řízeného oscilátoru

Napětově řízený oscilátor v SMD provedení [13] použijí typ CFPV-45 nebo typ CFPT-125 (teplotně kompenzovaný řiditelný oscilátor) od firmy *IQD Frequency products*.

6.2.1 Oscilátor VCXO CFPV-45



Obr. 20 Napětově řízený oscilátor CFPV-45 v SMD provedení [13]

Parametry obvodu CFPV-45:

- Napájecí napětí 3,3 V, 50 mA,
- Výstup Tri-state HCMOS, 15 pF,
- Stabilita ± 100 ppm,
- Řízení 1,65 V $\pm 1,65$ V, řiditelnost ± 100 ppm
- Pin 2: Enable ... >2,5 V nebo nezapojeno / Disable ... <0,5 V

Měření změny kmitočtu oscilátoru CFPV-45 se středním kmitočtem 10,000 MHz:

$U_{CC} = 3,3$ V.

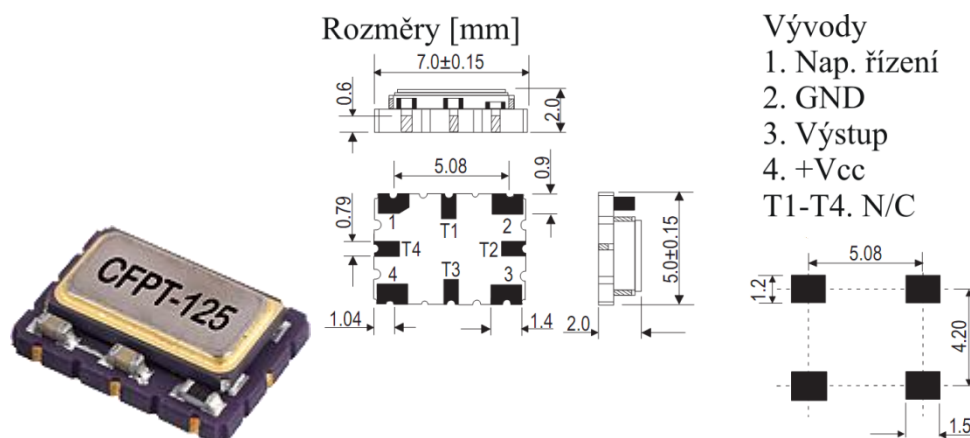
$U_{CONT} = 0$ V ... $f = 9\,998,5$ kHz

$U_{CONT} = 1,65$ V ... $f = 10\,000,0$ kHz

$U_{CONT} = 3,00$ V ... $f = 10\,001,5$ kHz

Při tomto měření byla potvrzena funkce řízení VCXO. Důvodem měření bylo zjištění, v jakých mezích je oscilátor schopen rozladění. Toto odladění je možné o přibližně 1,5 kHz, což je pro účel zapojení dostačující.

6.2.2 Oscilátor TCVCXO CFPT-125



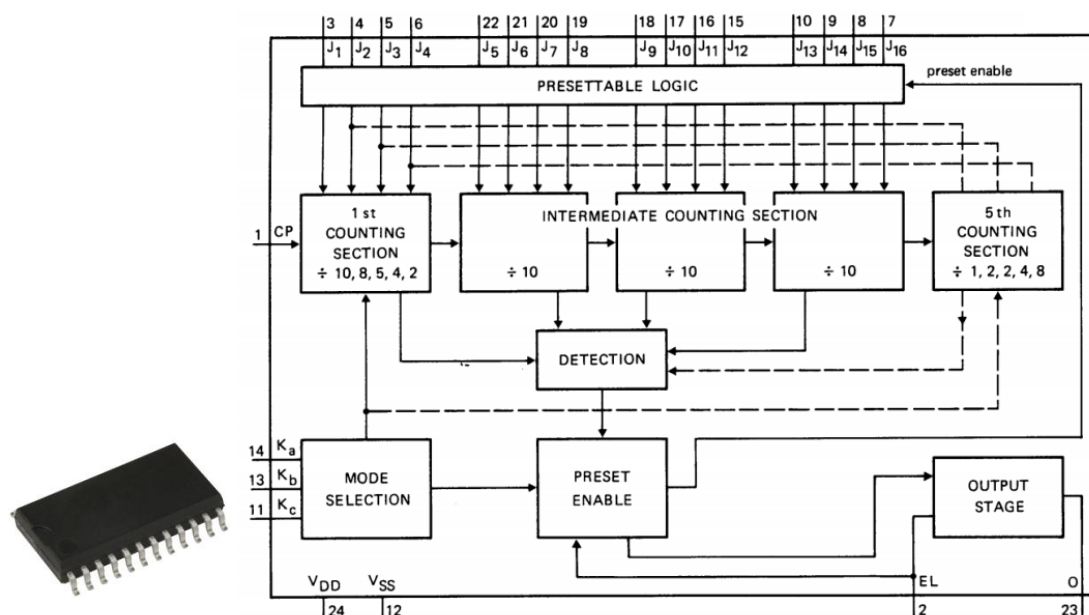
Obr. 21 Napěťově řízený oscilátor CFPT-125 v SMD provedení [13]

Parametry obvodu CFPT-125 (TCVCXO):

- Napájecí napětí 3,3 V, 3 mA,
- Výstup HCMOS, 15 pF,
- Nástupná a sestupní hrana 8 ns maximálně,
- Stabilita $\pm 0,9$ ppm,
- Řízení 1,65 V $\pm 1,0$ V, řiditelnost ± 5 ppm minimálně,

6.3 Dělička kmitočtu 4059

Dělička kmitočtu je nutná pro zajištění správného chodu fázového závěsu. Protože fázový závěs potřebuje na jeho vstupu dva signály se shodným kmitočtem (pak je frekvenčně a fázově zavěšen), musíme frekvenci krystalového oscilátoru vydělit takovým číslem, aby se shodovala s frekvencí výstupu GPS modulu. Použijí programovatelnou děličku obvodu HEF4059 verzi TTL (ne CMOS).



Obr. 22 Logický diagram děličky 4059 a pouzdro SO24W [14]

Parametry obvodu HEF4059:

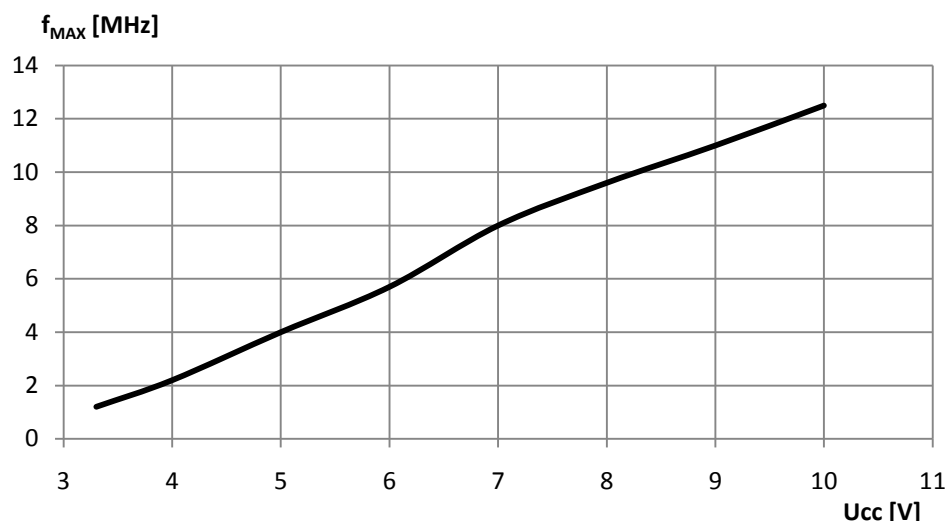
- Napájecí napětí 2,0 - 15,0 V, 3 mA,
- Výstup TTL, 15 pF,
- Zpoždění vstup→výstup: CP→O: 100 ns,
- Pracovní kmitočet typ 7 MHz (při 5 V) až max. 40 MHz (při 5 V) – dle typu IO.

Tato dělička umožní dělení kmitočtu logického signálu libovolným číslem n až do $n = 21\,327$. V případě použití oscilátoru 10 MHz je potřeba dělit až 10 000 000x, proto bude nutné použít dvě děličky. Použití dvou programovatelných děliček je výhodnější i pro možnost použití jiného GPS přijímače, který by měl výstup s jinou frekvencí.

Dělička umožňuje funkci již od 2,0 V. Při nižším napětí je ale omezen maximální vstupní kmitočet. Proto byla změřena závislost maximálního vstupního kmitočtu na napájecím napětí.

Tab. 4 Závislost max. vstupního kmitočtu na napájecím napětí obvodu HEF4059

U_{CC} [V]	f_{MAX} [MHz]
3,3	1,2
4,0	2,2
5,0	4,0
6,0	5,7
7,0	8,0
8,0	9,6
9,0	11,0
10,0	12,5



Graf 1 Závislost max. vstupního kmitočtu na napájecím napětí obvodu HEF4059

6.3.1 Návrh dělicích poměrů děličky

V následující tabulce jsou uvedeny dělicí poměry děliček kmitočtu, které budou využity pro různé synchronizační značky GPS přijímače. Vhodnou kombinací děliček je možno mít pouze dva režimy pro každou děličku.

Tab. 5 Návrh použitých dělicích poměrů pro různé výstupy z GPS

Výstup GPS	Potřebné dělení do 10 MHz	Nastavení: dělička 1	Nastavení: dělička 2
1 PPS	10 000 000	10 000	1000
100 PPS	100 000	100 nebo 10 000	1 000 nebo 10
10 kHz	1000	100	10

Nastavení děliček bude tedy následující:

- 1) $n=10\,000$, $n=100$
- 2) $n=1000$, $n=10$

n se vypočítá jako:

$$n = \langle \text{mód} \rangle * (100 \times \langle a \rangle + 10 \times \langle b \rangle + 1 \times \langle c \rangle) + \langle \text{zbytek} \rangle \quad (6.3.1)$$

Pro mód 10 je vyjádření naprogramování následující: MSB jsou vpravo, LSB vlevo

Nastavení módu: mód 10: LE=0, Ka=1, Kb=1, Kc=0

mód				c				b				a			
zbytek				1x				10x				100x			
J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13	J14	J15	J16
LSB			MSB	LSB			MSB	LSB			MSB	LSB			MSB

K_a , K_b , a K_c jsou vstupy (piny) obvodu, kterými se nastavuje mód. Vstupy J1 až J16 nastavují vlastní dělicí poměr. Dle definice módu se mění použití vstupů J1 až J4 pro různé dělicí části. Při změně módu (pinů K_a až K_c) se také změní nastavení vstupů!

Návrh konkrétních dělicích poměrů

Dělení 10:

$$n = 10 * (100 \times 0 + 10 \times 0 + 1 \times 1) + 0 = 10$$

Mód 10x				1				0				0			
zbytek				1x				10x				100x			
J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13	J14	J15	J16
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Dělení 100:

$$n = 10 * (100 \times 0 + 10 \times 1 + 1 \times 0) + 0 = 100$$

Mód 10x				0				1				0			
zbytek				1x				10x				100x			
J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13	J14	J15	J16
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Dělení 1000:

$$n = 10 * (100 \times 1 + 10 \times 0 + 1 \times 0) + 0 = 1000$$

Mód 10x				0				0				1			
zbytek				1x				10x				100x			
J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13	J14	J15	J16
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Dělení 10 000:

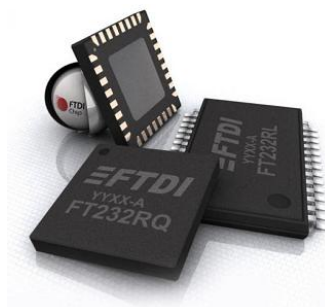
$$n = 10 * (100 \times 10 + 10 \times 0 + 1 \times 0) + 0 = 10\,000$$

Mód 10x				0				0				10			
zbytek				1x				10x				100x			
J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13	J14	J15	J16
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1

Změna dělicího poměru bude možná změnou nastavení některých řídicích vstupů. Pro děličku 1 to budou vstupy J9, J14 a J16. Dělička 2 bude řízena vstupy J5 a J13. Tato změna bude možná přepojením propojek (jumper) na desce.

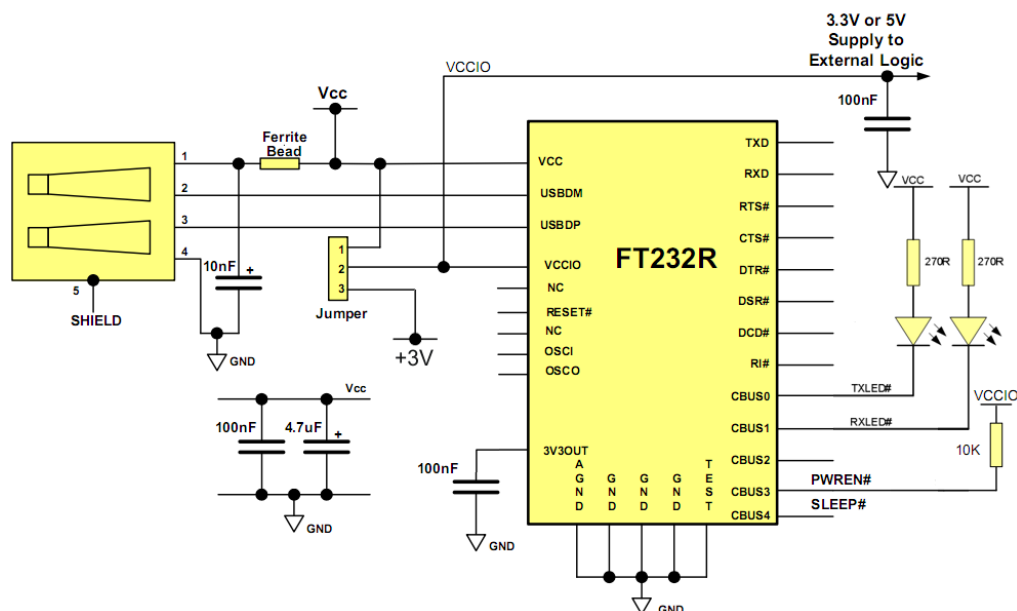
6.4 USART převodník FT232

FT232 [16] je univerzálním obvodem pro převod datové komunikace mezi rozhraním USART a USB. Velmi jednoduchým způsobem je tak možné propojit datové piny RXD, TXD a USB+, USB-.



Obr. 23 Obvody FT232 [16]

Obvod FT232 je zapojený podle doporučeného schématu (viz obr. 24). Napájení obvodu je provedeno z USB portu. Napájení komunikační části je přivedeno externě ze stabilizátoru +3,0 V (propojka jumperu mezi piny 2 a 3). Zapojení je doplněno o LED diody zobrazující datovou komunikaci.

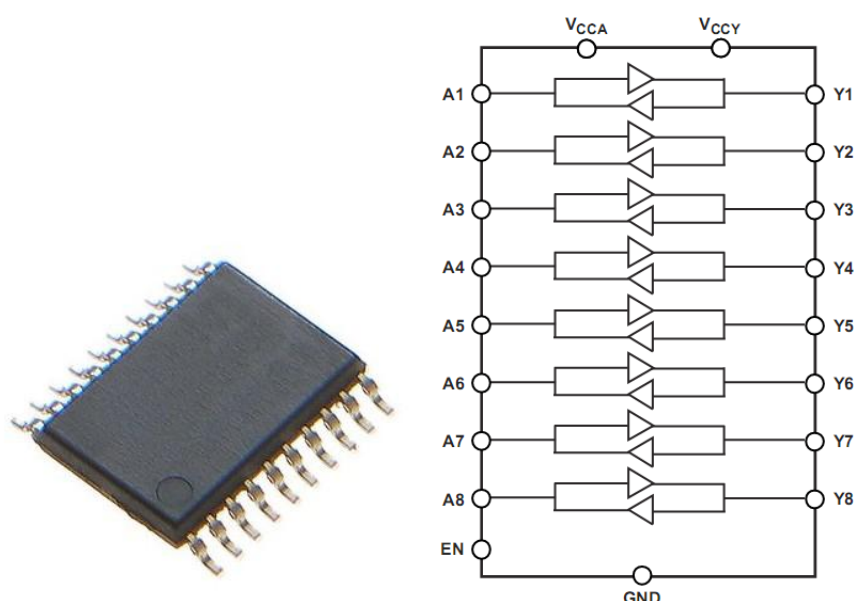


Obr. 24 Zapojení FT232 [16]

6.5 Převodník úrovně ADG3300

ADG3300 od firmy Analog Devices je 8kanálový obousměrný převodník digitální napěťové úrovně. Typické použití je při převodu úrovní v datových linkách mezi různými periferiemi.

Obvod umožňuje převádět logické úrovně napětí 1,5 až 5,5 V. Je možné využít až 8 kanálů. Všechny kanály jsou obousměrné bez nutnosti volit požadovaný směr přenosu.



Obr. 25 Mikroprocesor ADG3300 v pouzdře TSSOP-20 a jeho vnitřní zapojení [18]

Obvod vyžaduje dvě napájecí napětí, která jsou zároveň použita pro řízení úrovní na obou stranách datové linky. Obvod rozlišuje stranu A s piny A1 až A8, které jsou v úrovni napájecího napětí V_{CCA} a stranu Y s piny Y1 až Y8 v úrovni napětí V_{CCY} . Platí, že $1,15\text{ V} \leq V_{CCA} \leq V_{CCY} \leq 5\text{ V}$, periferie s vyšší hodnotou napětí by proto měly být připojeny ke straně Y, periferie s nižším napětím ke straně A. Datový přenos vždy probíhá mezi piny A1-Y1, A2-Y2 ad. v obou směrech.

Napájecí napětí i úrovně logických signálů jsou vztaženy k zemnímu potenciálu na pinu GND. Vstup EN umožňuje nastavení strany Y jako 3stavovou. Uzemněním vstupu EN se na straně A připojí pull-down rezistory $6\text{ k}\Omega$ a strana Y se nastaví do stavu vysoké impedance. Pin EN má vlastní pull-up rezistor. Logická 1 odpovídá napětí na pinu V_{CCA} .

Pro $V_{CCA} = 3,3\text{ V}$ a $V_{CCY} = 5\text{ V}$ je prodleva mezi vstupem a výstupem je cca 6 ns , nástupná a sestupná hrana výstupu 2 ns . Maximální datová přenosová rychlost může být minimálně 50 Mb/s .

Tento obvod bude využit pro převod napěťové úrovně datové linky USART mezi mikroprocesorem ($5,0\text{ V}$ – strana Y) a GPS modulem nebo USB převodníkem FT232 ($3,0\text{ V}$ – strana A).

Uvažovaná přenosová rychlost je 9600 Bd , čili $9,6\text{ kb/s}$ čemuž obvod ADG3300 vyhovuje. Pro propojení modulu s PC je zvažováno použití rychlosti okolo 115 kb/s , která je stále nízko pod mezními hodnotami obvodu.

6.6 Mikroprocesor ATmega 128

ATmega128 od firmy ATMEL je 8bitový mikrokontrolér se 128 kB flash pamětí. Tento mikroprocesor je jedním z univerzálních zástupců obvodů s množstvím funkcí a periferií. Vyrábí se v několika provedeních:

- 8 MHz , $2,7$ až $5,5\text{ V}$ATmega128L-8
- 16 MHz , $4,5$ až $5,5\text{ V}$...ATmega128-16.

Pouzdro obvodu může být:

- 64A ... 64 pinů TQFP ($14 \times 14 \times 1\text{ mm}$)
- 64M1...64 pinů MLF ($9 \times 9 \times 1\text{ mm}$).

Varianta zpracování:

- C ... komerční provedení (0 až $70\text{ }^\circ\text{C}$)
- I,U...industriální (-40 až $85\text{ }^\circ\text{C}$).

Pro tuto aplikaci byl vybrán obvod ATmega128-16AC z důvodu provozu na frekvenci alespoň 10 MHz . Obvod bude proto napájen napětím 5 V a hodinový signál bude přiveden ze synchronizovaného externího oscilátoru. Větší obvod v pouzdře TQFP 64 bude výhodnější pro snadnější výrobu desky a také ruční pájení.



Obr. 26 Mikroprocesor ATmega128-16A, 64 TQFP

Obvod dále obsahuje další paměti a vhodné periferie:

- 4 kB EEPROM,
- 4 kB vnitřní SRAM,
- dva 8bitové čítače/časovače s předděličkou,
- dva 16bitové čítače/časovače s předděličkou,
- 8kanálový 10bitový A/D převodník,
- sběrnice TWI,
- 2 USART sběrnice,
- analogový komparátor,
- programování ISP nebo JTAG
- a další.

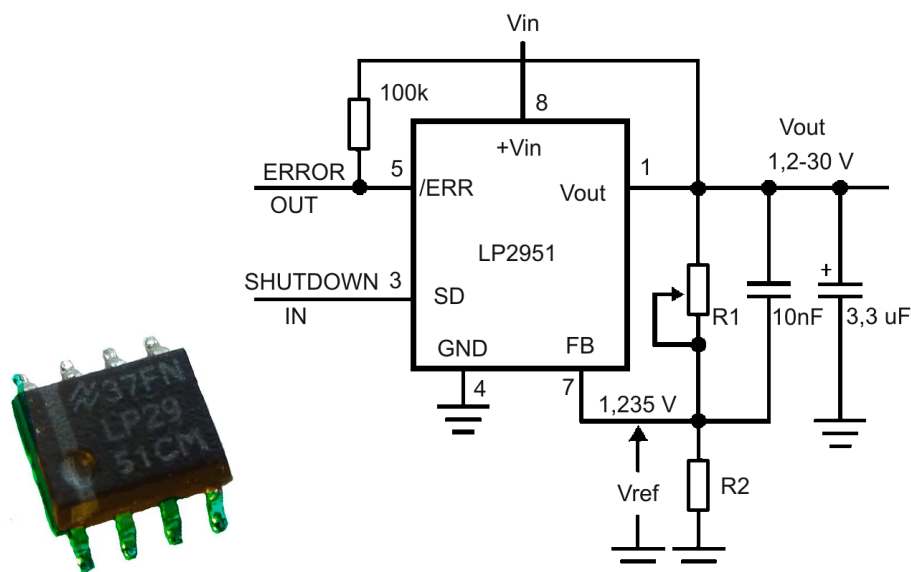
K mikroprocesoru je od stejné firmy k dispozici programovací prostředí AVR Studio. To umožňuje psaní zdrojového kódu, překlad do strojového kódu, programování přes externí programátor a případně i ladění programu přímo ve fyzickém procesoru.

6.7 Stabilizátor LP2951

LP2950 a 2951 jsou integrované obvody fungující jako stabilizátory s nastavitelným výstupním napětím. Hlavní přednosti obvodu je jeho univerzálnost, přesnost a minimální potřeba externích součástek. Maximální proud obvodem je 100 mA, při kterém je na obvodu poměrně nízký úbytek napětí 380 mV. Výstupní napětí lze řídit v rozmezí 1,24 až 29 V pomocí externích součástek (odporového děliče R1, R2).

Obvod se vyrábí v mnoha provedeních: TO92, DIL, SO8, D-Pak, WG a další.

V této práci jsou využity obvody LP2951 v SMD pouzdru SO8. Stabilizují zde vstupní napájecí napětí (cca 12 V) na napětí pro GPS přijímač (3,0 V), oscilátor (3,3 V) a děličky kmitočtu (10 V).



Obr. 27 Stabilizátor LP2951 a jeho doporučené zapojení [21]

Výstupní napětí obvodu vyjadřuje rovnice:

$$V_{OUT} = V_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + I_{FB} R_1. \quad (6.7.1)$$

Dle této rovnice byly vypočteny potřebné hodnoty rezistorů pro zmíněná napětí. Rezistory pro napětí 5 V nebyly použity, protože toto napětí bude vytvářeno jiným stabilizátorem. Proud odporovým děličem I_{FB} je dle katalogového listu potřeba nejméně 20 μA , pro větší stabilitu je možné proud ještě zvýšit. V zapojení bylo proto uvažováno, aby dosahoval alespoň 500 μA (takový proud výrazně nezatíží zdroj a je relativně malý).

Tab. 6 Navrhnuté rezistory pro stabilizátor LP2951

V_{REF} [V]	R_1 [k Ω]	R_2 [k Ω]	I_{FB} [mA]	V_{OUT} [V]
1,235	1,5	1	1,235	3,09
	8,2	4,7	0,26	3,39
	4,7	1,5	0,82	5,10
	5,1	0,68	1,82	10,50

Tyto rezistory jsou dále rozepsány v „příloha 4 – seznam součástek“. Konvence číslování respektuje tyto názvy a název přidruženého prvku (schéma~zdejší návrh). Např. integrovaný obvod IC4 a jeho rezistory R41~R1, R42~R2.

7 Programové vybavení

Před samotným programováním bylo potřeba odzkoušet komunikaci GPS modulu s PC. K tomu byl použit program Motorola WinOncore 1.2 a Terminal v1.9b 20060920β – by Br@y++ [19].

Po připojení k PC byl nalezen převodník FT232 a nainstalovaly se ovladače. Zařízení se nyní objevuje jako COM port. S využitím programů Odpověď na identifikační dotaz „@@Cj“ je tato jednorázová sekvence textu:

@ @Cj (Receiver ID) command...

Receiver ID

(c) 2006 SiRF Technology, Inc.

SFTW P/N # 61-G10628A

SOFTWARE VER # 1

SOFTWARE REV # 1

SOFTWARE DATE SEP 06 2006

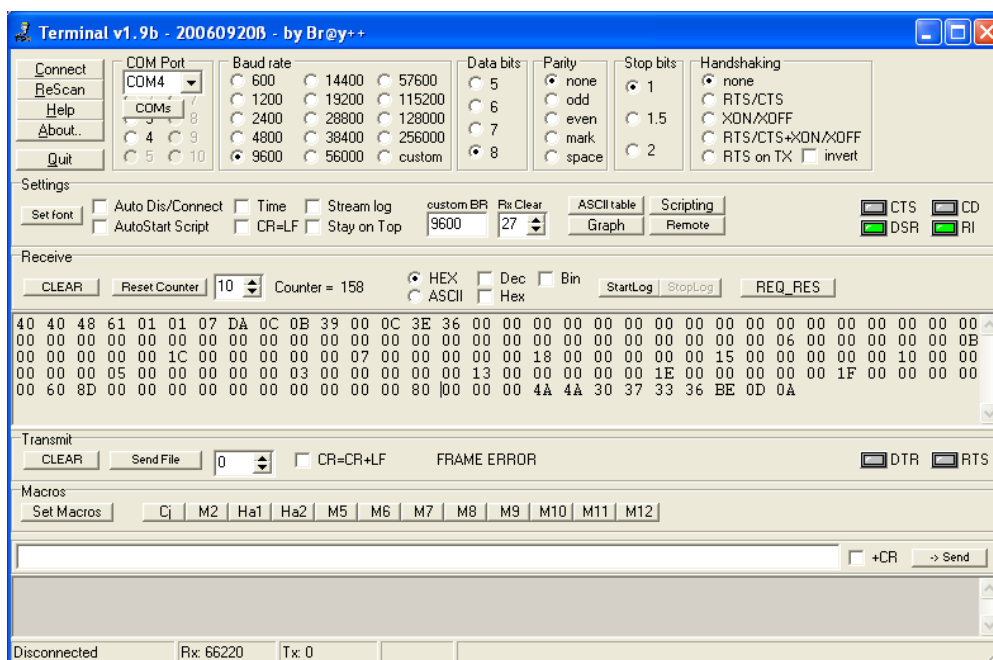
MODEL # P383T12T12

HWDR P/N # L

SERIAL # JJ0736

MANUFACTUR DATE 8F21

V běžném režimu bude GPS přijímač odesílat souhrnné zprávy s údaji o datu, čase a navigačních údajích. Jedná se o již popsanou zprávu „@@Ha“ (viz 3.1.5). Vysílání zprávy se nastaví posláním určité sekvence, příjmem budou následující data, viz obr. 28 (zde v HEX formátu). Tyto data bude přijímat mikroprocesor a vybírat si z nich časové údaje.



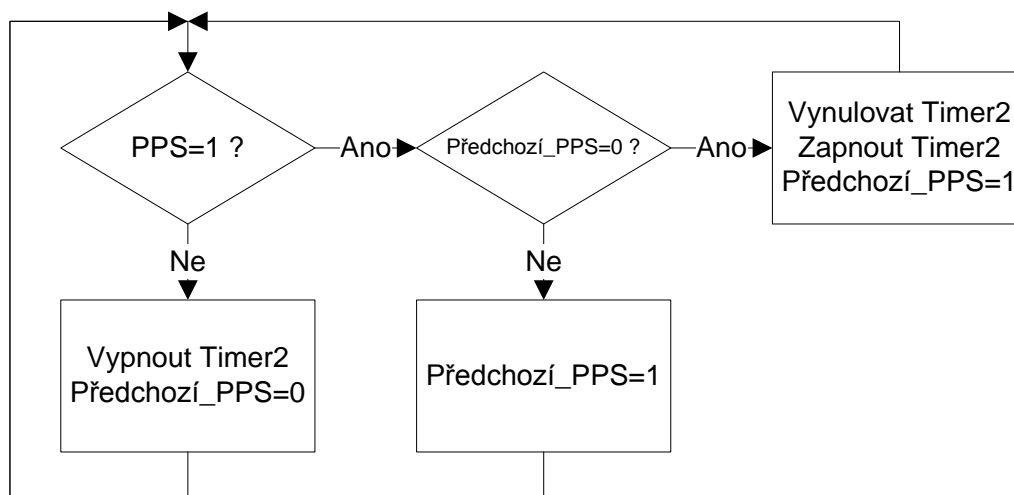
Obr. 28 Jeden komunikační rámec vysílání GPS přijímače

7.1 Program pro MCU ATMEGA128

K vybranému mikrokontroléru ATmega128 byla navržena a vyrobena DPS, která bude sloužit k propojení mezi mikroprocesorem, GPS, PC a přivádět signál PPS. Dle navržené desky bylo nutné vyvinout obslužný program pro mikroprocesor, který se bude starat o komunikaci mezi zařízeními a zpracovávat časové značky. K vývoji a programování bylo použito programovací prostředí od firmy Atmel - AVR Studio 4, verze 4.18.684, program je psaný v jazyce C. K samotnému programování byl použit USB programátor Biprog připojený na programovací vstup ISP.

Program pro mikroprocesor je psán tak, aby se jednotlivé úkony zpracovávaly pokud možno odděleně a samostatně. To je docíleno využitím vnitřních přerušení mikroprocesoru, takže příjem z linky USART a nový vzorek z A/D převodníku jsou operace nezávislé na hlavním programu. Zdrojový kód lze popsat několika vývojovými diagramy.

7.1.1 Hlavní program, vyhledání začátku sekundy v signálu 100 PPS

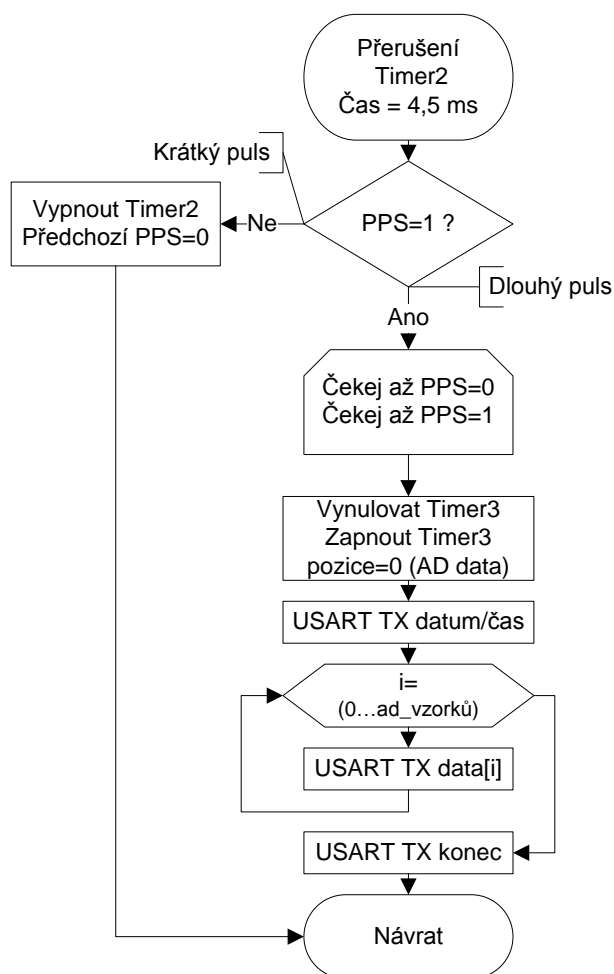


Obr. 29 Vývojový diagram hlavní části programu

Prvotními úkoly procesoru je nastavení vstupů a výstupů, inicializace USART, A/D převodníku, časovačů a další úkony.

Základní část programu se stará o vyhledání počátku sekundy, která je vysílání v PPS signálu. V případě 1 PPS je situace jednoduchá. Každá nástupná hrana označuje sekundu. V případě použití 100 PPS signálu je ze stovky impulsů nutné vyhledat správný impuls a hranu, která označuje sekundu. Tomu odpovídá následující vývojový diagram. Hlavní smyčka programu s využitím proměnné PPS (ta označuje aktuální úroveň signálu PPS) a pomocné proměnné Předchozí_PPS (označuje stav PPS od posledního průběhu smyčkou) zjišťuje nástupnou hranu, od které program čeká cca 4,5 ms (zajišťuje časovač Timer2) a poté zjišťuje aktuální úroveň. Pokud bude úroveň v log. 0, jedná se o některý z 99 krátkých impulsů. V případě log. 1 se jedná o dlouhý impuls, který naznačuje, že další nástupná hrana bude počátek nové sekundy. Rozdílnou šířku impulsu a počátek sekundy znázorňuje obr. 7.

Detekci správné hrany odpovídá následující vývojový diagram.



Obr. 30 Vývojový diagram programu pro detekci sekundy v signálu 100 PPS

V případě, že se nejedná o dlouhý impuls, časovač Timer2 je vypnut a program pokračuje v hlavním programu. Pokud je po uplynutí 4,5 ms nalezena úroveň log. 1, jedná se o dlouhý puls. Nyní program ve dvou cyklech vyčká příchodu další nástupné hrany. Zde je počátek sekundy. Vynuluje se Timer3, který odpočítává čas jednotlivých vzorků (vzorkovací frekvence externího signálu je tedy $\frac{1}{\text{čas časovače Timer3}}$).

S příchodem sekundy je také spojeno periodické vysílání dat k PC, které mikroprocesor uložil za předchozí sekundu. Vysílání dat je ve formátu uvedeného v 7.1.5. Nejprve jsou vyslány informace o datu a čase. Následuje určený počet vzorků z A/D převodníku a ukončovací sekvence znaků. Vysílání vzorků je voláno funkcí `USART_TX(data)`.

Počet možných vzorků vyslaných za jednu sekundu je omezen přenosovou rychlostí sériové linky. GPS přijímač pracuje na rychlosti 9600 Bd. Protože je stejný port USART připojen přijímacím vstupem k GPS přijímači a vysílacím pinem k PC, vysílací rychlost k PC je také 9600 Bd. Jedna sekvence bitů obsahuje 1 start bit, 8 datových bitů, 0 paritních bitů a 1 stop bit. Na jeden vzorek nebo jiný znak tedy připadá $1+8+0+1 = 10$ bitů. Dle zvoleného formátu dat (Tab. 7) bude potřeba 26 znaků pro přenos aktuálního data, času a doplňkových znaků. Maximální počet dat za sekundu bude proto:

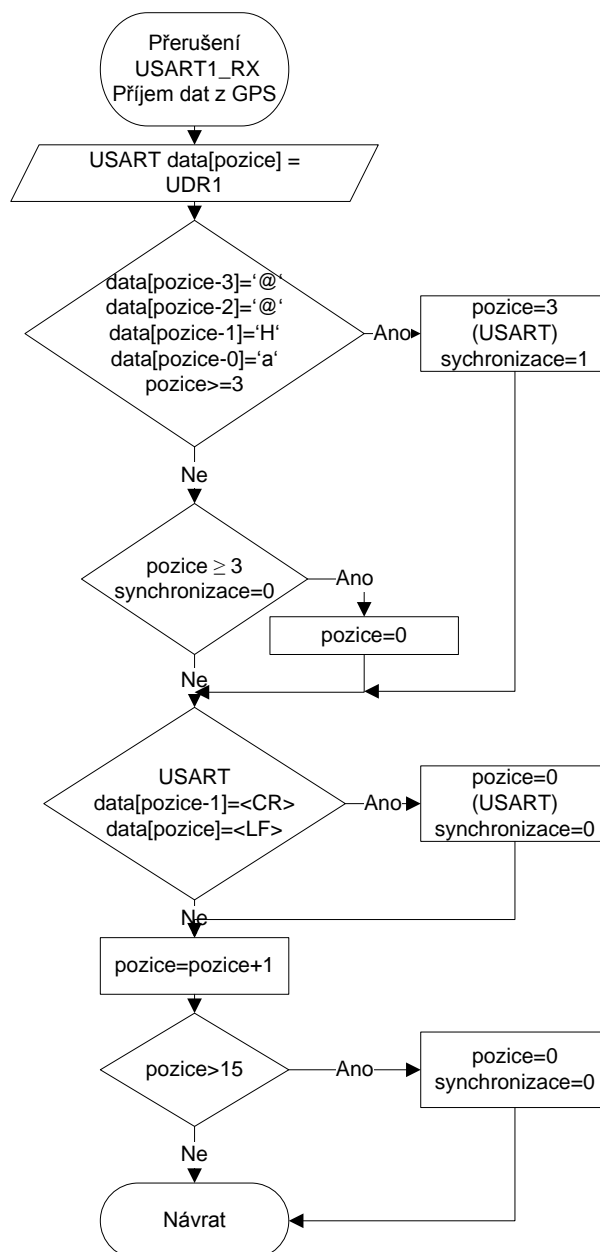
$$9600 = 10 \cdot (26 + n) \\ n = 934.$$

Maximální vzorkovací frekvence proto může být:

$$f = 934 \text{ Hz.}$$

Pro spolehlivou činnost, především včasné ukončení dat před příchodem další sekundy, bude maximální možná frekvence cca 900 Hz. Testování bylo nejprve s počtem 100 vzorků/s (100 Hz), ve finálním modulu bude použito vzorkování 400 Hz, z důvodu omezení rámce dat v programu MATLAB.

7.1.2 Příjem dat z GPS přijímače (sériová linka USART)

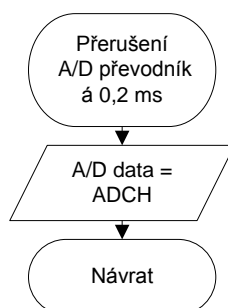


Obr. 31 Vývojový diagram programu pro příjem zpráv z GPS přijímače

Příjem z GPS přijímače je automatizován pomocí přerušení z USART portu, které se spouští automaticky při příjmu nějakého znaku. GPS přijímač je nastavený tak, aby odesílal data ve formě hromadné zprávy. Tato zpráva začíná znaky „@@Ha“. Zdrojový kód se proto bude

zachytávat na tuto sekvenci znaků. Funkce je následující. Při příjmu znaku se uloží do pozice v poli proměnné „data[15]“. Toto pole má velikost 15, což stačí pro příjem všech časových informací. Pole se postupně naplní čtyřmi znaky tak, že se po každém příjmu zvětší ukazatel „pozice“ na pole „data[pozice]“. Až se přijmou nějaké 4 znaky, zkontroluje se, jestli přišly v sekvenci „@@Ha“. Pokud ne, vynuluje se ukazatel a příjem začíná znovu. Pokud ano, ukazatel se upraví na hodnotu 3. To je ošetření stavu, kdy by před synchronizační sekvencí přišly ještě jiné znaky. Ve stavu synchronizace se již nenuluje ukazatel pozice, ale pouze přičítá. Takto se naplní celé pole „data[]“ až do znaku č. 15. Systém potom znovu čeká na synchronizační sekvenci. Další bod synchronizace je znak „<LF>“, který je vyslán na konci bloku dat. V tu chvíli se také nuluje ukazatel pozice.

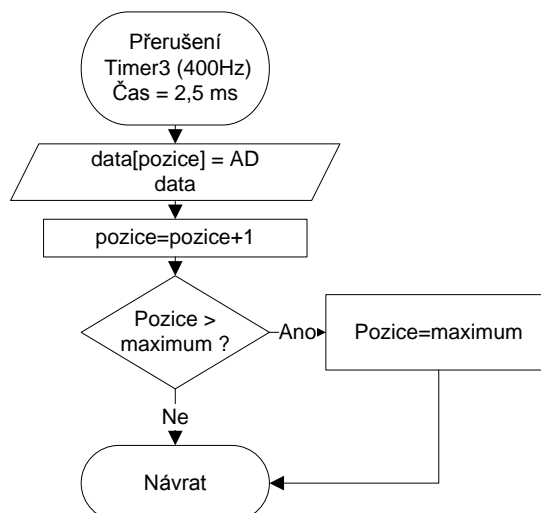
7.1.3 Příjem dat z A/D převodníku



Obr. 32 Vývojový diagram příjmu dat z A/D převodníku

Operace uložení dat z A/D převodníku je opět vykonána v přerušení. Data se ukládají do pomocné globální proměnné „AD data“. A/D převodník je 10bitový a hodnoty jsou vybírány z dvou 8bitových registrů „ADCH“ a „ADCL“. Standardně je hodnota zarovnána doprava, čili do dvou LSB bitů „ADCH“ a všech bitů „ADCL“. Z důvodu, že 10 bitů je pro přenos pomocí osmibitových znaků (typu char) neefektivní (bylo by nutné použít 16 bitů, takže 6 bitů by bylo nevyužito), menší úpravou v inicializaci byl 10bitový převodník změněn na 8bitový. Data se zarovnají doleva, takže MSB bude v registru „ADCH“, „ADCL“ bude obsahovat pouze dva LSB bity, které nepoužijeme. Nyní můžeme efektivněji využít komunikační řetězec.

7.1.4 Časování vzorků



Obr. 33 Vývojový diagram programu pro časování vzorků (vzorkovací frekvenci)

Časovač Timer3 je použit k ukládání vzorků z A/D převodníku do pole „data[]“. Toto pole se s každým přerušením naplní dalším vzorkem z pomocné proměnné „AD data“. Ukazatel na pole „pozice“ (jedná se o jiný ukazatel než v části USART) se poté inkrementuje. Pokud by z nějakého neočekávaného důvodu mělo dojít k přetečení ukazatele, bude korigován na jeho poslední hodnotu.

7.1.5 Formát dat pro vysílání do PC

Při propojení mikroprocesoru k PC bylo nutné zvážit formát dat, který bude vyslán. Byla navržena kombinovaná forma dat, a to tak, že část obsahující časové informace je ve formátu ASCII znaků (je snadněji čitelná a reprodukovatelná) a část obsahující měřené vzorky je z důvodu efektivity posílána v 8bitové binární číselné formě (každý ASCII znak označuje hodnotu vzorku v rozsahu 0-255). Výhodou je, že jeden datový vzorek se vejde právě do jednoho vyslaného znaku.

Je nutné ošetřit situaci, kdy by se hodnota vzorku shodovala s některým funkčním znakem, v tomto případě „<LF>“. Tento znak určuje konec bloku dat a PC by potom nepřijal všechny hodnoty. V případě shody vzorku s hodnotou „<LF>“ (tj. 0x0A) nebo „<CR>“ (0x0D) se proto přičte číslo 1. Zavede se tím drobná chyba o velikosti jednoho LSB.

Tab. 7 Formát dat pro vysílání do PC

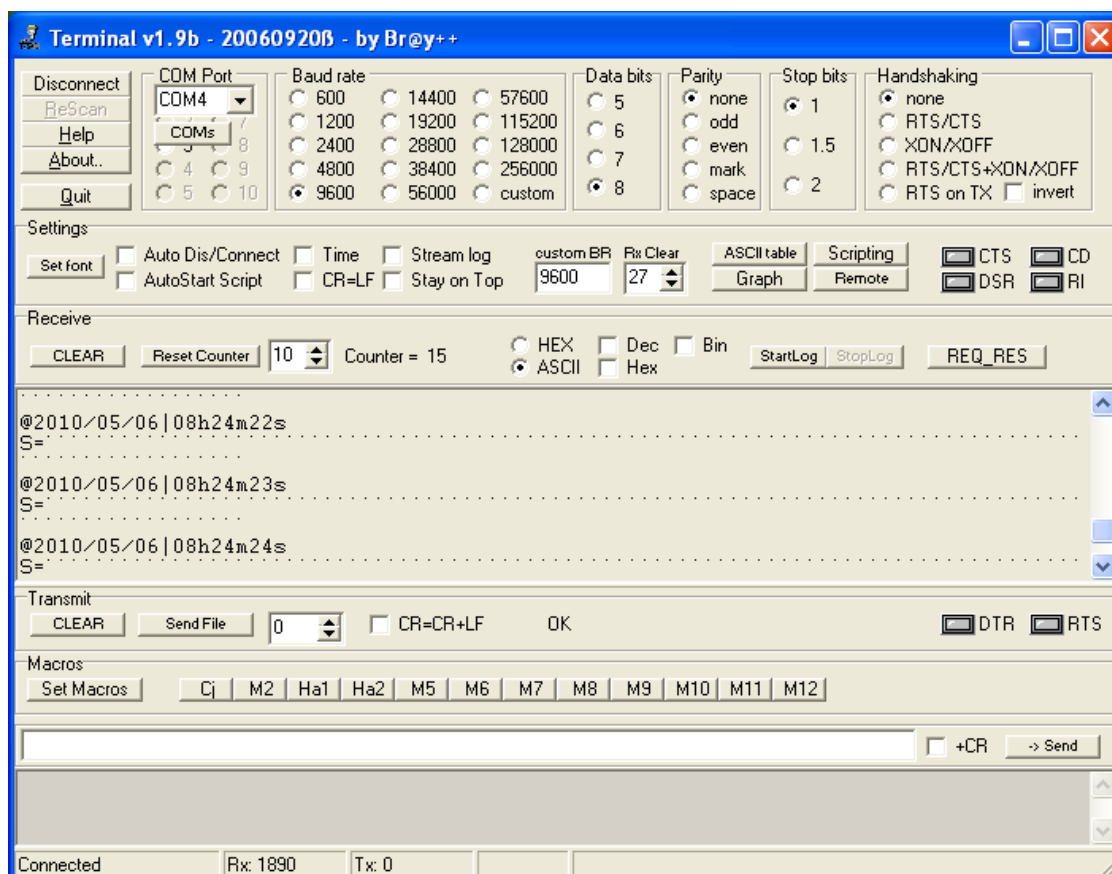
Znak(y)	Vysvětlivka	Formát dat
@	Počáteční znak	ASCII
2010	Rok	
/	Lomítko	
05	Měsíc	
/	Lomítko	
06	Den	
	Oddělovač datum / čas	
08	Hodiny	
h	Označení hodin	
24	Minuty	
m	Označení minut	
22	Sekundy	
s	Označení sekund	
mezera	mezera	
S=	Značka, po které následují vzorky	
...	Vzorky v 8bitovém formátu (0-255)	Binární
<CR><LF>	Ukončení sekvence	Binární

7.2 Přijímač dat na PC - terminál

Data zpracované mikroprocesorem jsou posílána po sériové lince do PC. Pro prvotní testování byl opětovně využit program Terminal v1.9b [19]. Tento program umožňuje příjem i vysílání dat na sériovou linku.

Program se připojuje na sériový port (značený např. COM4). Je možné zvolit některou ze standardních rychlostí (9600 Bd), počet datových bitů (8), paritu (žádná), stop bity (1).

Okno přijímaných dat může zobrazovat hodnoty v HEX formátu nebo v ASCII, lze jej doplnit dalšími panely, kde budou data ve formátu desítkovém, HEX nebo binárním. V případě ASCII formátu se data automaticky řádkují (to odpovídá určitým ASCII znakům, které jsou přijaty). Okno pro vysílání dat poskytuje možnost vyslat sekvenci znaků. V případě vysílání HEX hodnot je potřeba data zapisovat jako „\$“+HEX hodnotu (např. „\$40\$40\$49“)



Obr. 34 Okno terminálu pro příjem dat z mikroprocesoru pomocí USB

7.3 Přijímač dat na PC v prostředí MATLAB

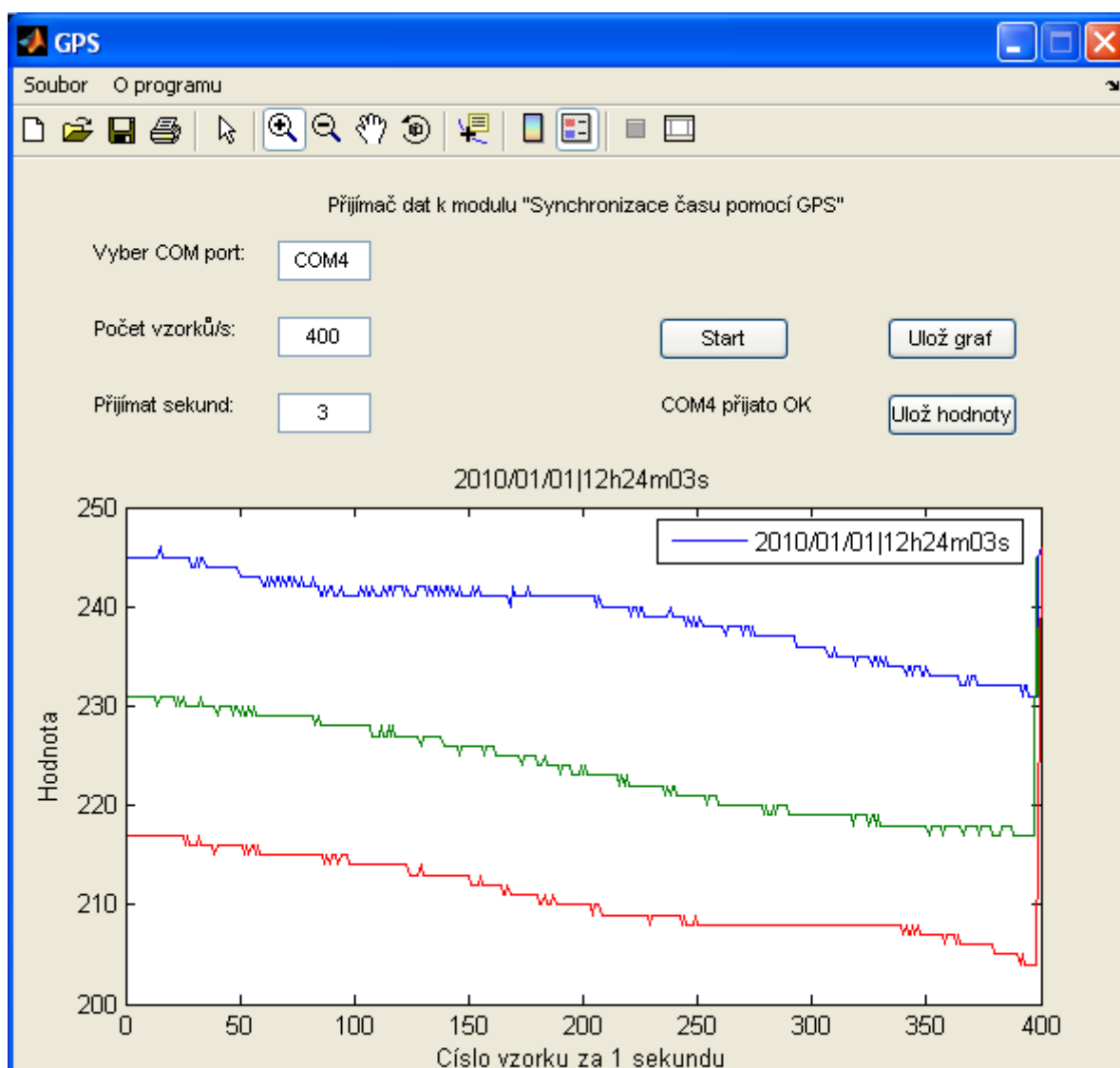
Aby bylo možné naměřená data zobrazit, uložit a dále zpracovat, byl vyvinut software pro příjem naměřených dat z mikroprocesoru do PC. Program je vyroben v grafickém prostředí MATLAB. Kód je napsán v objektově orientovaném jazyce C.

Program bude přijímat data ve formátu, jak ukazuje tab. 7. Prvních 24 znaků bude informačních a za nimi následuje N (400) datových vzorků. Ukončení je pomocí dvou znaků „<CR>“ a „<LF>“. V programu je nastaven znak „<LF>“ jako ukončovací. Po příjmu tohoto znaku by se zastavilo načítání a proto je nutné ošetření proti vyslání znaku o stejné binární hodnotě v místě bloku dat (to se děje na straně programu v procesoru).

Pro převod datových vzorků z binárního formátu na číslo je použita funkce `unicode2native()`. Byla zjištěna jako jediná funkce, která dokáže převést ASCII znak

na jeho hodnotu v tabulce znaků. Bohužel tato funkce není dokonalá a pravděpodobně z důvodu nekompatibilní znakové sady v MATLABu nebo v použitém operačním systému Windows XP vykazuje chyby. Některé vzorky v ASCII hodnotách 123 až 127 špatně interpretuje jako hodnotu 26. V obrázku se to projeví jako náhlá špička signálu směřující dolů. Tuto chybu se odstranit nepodařilo, pravděpodobně by bylo nutné změnit znakovou sadu (jiná funkční nebyla nalezena) nebo úplně přepracovat přenos dat. Tím by se ovšem ztratila výhoda posílat v 1 znaku 1 datový vzorek, a vzorkovací frekvence by musela být nižší. Dočasným řešením je omezit signál na hodnoty, které nedosahují tyto chybné vzorky, tzn. vyhnout se napětím vzorků v těsném okolí 2,5 V.

Vzhled a ovládání programu je následující:



Obr. 35 Program pro příjem a vykreslení dat v prostředí MATLAB

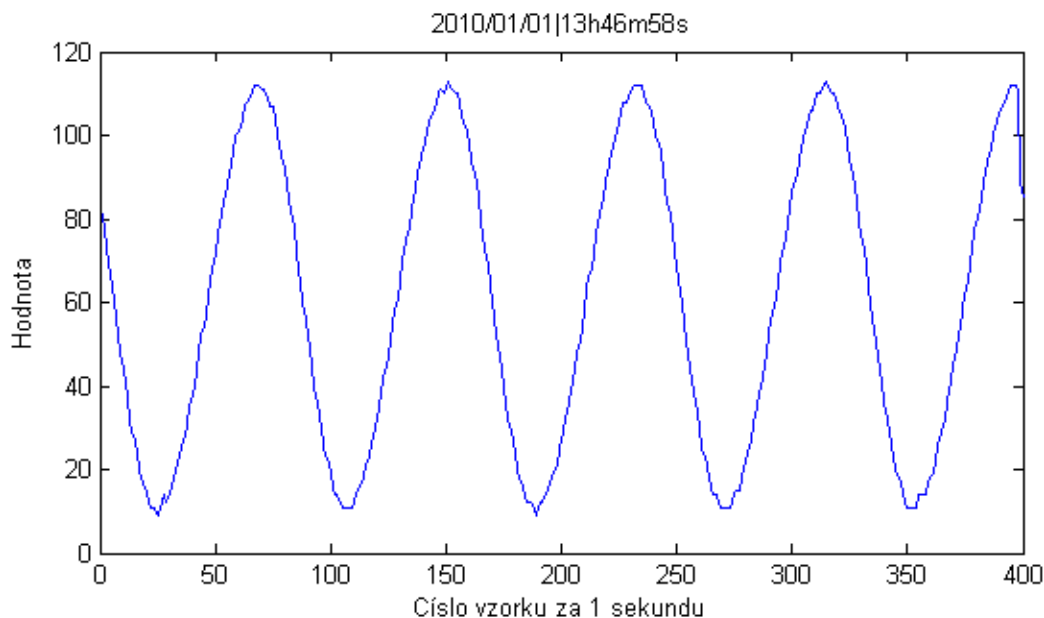
První předpoklady jsou, že je modul zapnutý, GPS přijímač má připojenou anténu, která má dosah signálu z GPS družic a GPS přijímač je dobře zasynchronizovaný. Tento stav může trvat několik desítek minut. Modul připojíme pomocí USB kabelu k PC. Spustíme program MATLAB a jeho grafické rozhraní GUI (na příkazové řádce „guide“). Spustíme program. Zjistíme, na kterém portu je modul připojen. Název portu je nutné vepsat do příslušného pole (zde COM4). Dále se zvolí počet měřených vzorků N (400) – je nutné brát v úvahu, že počet

vzorků vysílaných mikroprocesorem a přijímaných tímto programem by měl být stejný. Je možné počet vzorků zmenšit, tím se ale zkrátí časová osa (ta je standardně 1 sekunda). A nakonec zvolíme počet sekund (počet bloků dat), které budou přijaty. Stiskem tlačítka Start se spustí načtení hodnot (zobrazí se „COM4: přijímám data č. 1“). Pokud se nenačte celý blok dat, ale jen jeho část, program toto pozná a počká si na další sekvenci (zobrazí se „COM4: přijímám...“). Tento případ může nastat, pokud se příjem dat spustí později, než začalo vysílání, řešením je proto opakování příjmu následujících dat. Po načtení všech dat se zobrazí v souhrnném grafu a zobrazí se např. „Přijato 5 s OK“. Graf je možné exportovat jako obrázek (tl. „Ulož graf“) nebo lze exportovat data v číselném formátu (tl. „Ulož hodnoty“). Data jsou formátována tak, že první sloupec odpovídá vzorkům za první sekundu, následující sloupce obsahují vzorky následujících sekund. Soubor tedy obsahuje N řádků a M sloupců, kde N je počet vzorků za sekundu (400) a M je počet zaznamenaných sekund (5). Soubor používá matematický zápis čísla a jako oddělovač čísla desetinnou tečku.

Tab. 8 Formát dat exportovaných z programu MATLAB

Řádek\sloupec	1	2	...	M (5)
1	2.5500000e+002	9.9000000+001	...	1.1000000+001
2	2.4300000e+002	8.7000000+001	...	3.8000000+001
...
N (400)	1.0500000e+002	3.2000000+001	...	1.6800000+002

Exportovaný obrázek může vypadat například takto. Jedná se o sinusový průběh z generátoru, rozkmit cca 2 V, DC offset 1,2 V, kmitočet 5 Hz.



Obr. 36 Exportovaný obrázek z grafu

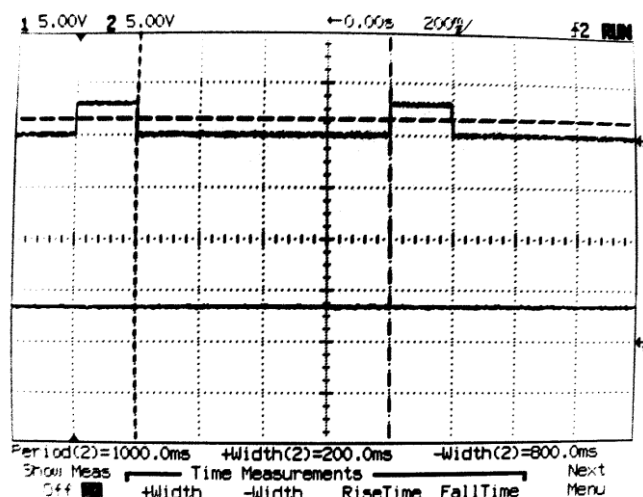
Další zpracování dat je již na uživateli. Vzhledem k nízké vzorkovací frekvenci (400 Hz) není vhodné zaznamenávat rychle se měnící signály.

8 Měření modulu

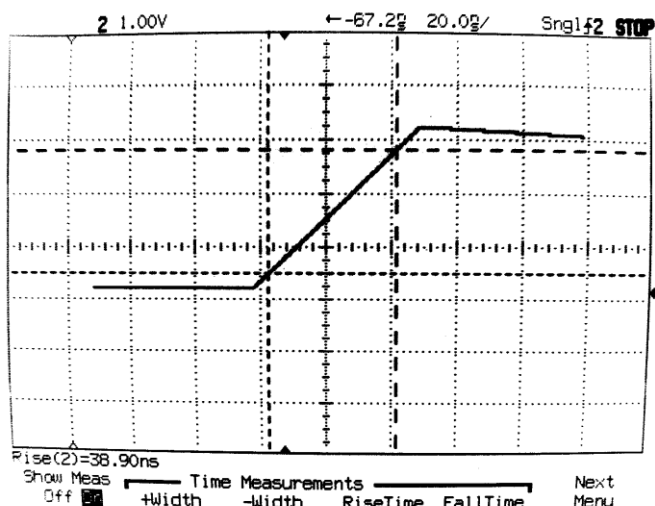
GPS modul jsem podrobil základním měřením časových parametrů výstupního PPS signálu. Měření se dále zaměřuje na fázový závěs a synchronizaci krystalového oscilátoru VCXO na PPS signál. Jsou zobrazeny výstupní průběh z PLL a řídicí napětí oscilátoru. Další část obsahuje časové vztahy signálů z GPS přijímače a výstupních signálů mikroprocesoru včetně zobrazení datových rámců linky USART.

8.1 PPS signál

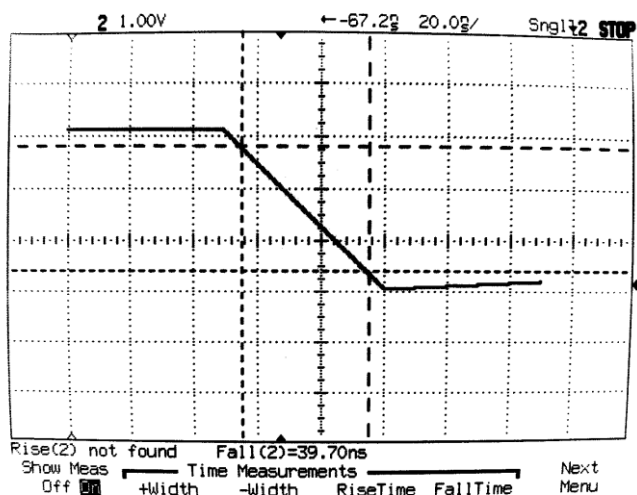
Výstup 1 PPS by měl mít vysokou úroveň v délce 200 ms a periodu 1 s (viz 0). Z následujících obrázků jsou vidět časové vztahy 1 PPS signálu. Perioda je přesně 1000 ms a horní úroveň v délce 200 ms. Nástupná i sestupná hrana jsou délky cca 39 ns.



Obr. 37 Signál 1 PPS



Obr. 38 Signál 1 PPS – nástupná hrana



Obr. 39 Signál 1 PPS – sestupná hrana

8.2 Fázový závěs

Fázový závěs má za úkol synchronizovat vnější oscilátor na DPS k PPS signálu z GPS přijímače. Signál oscilátoru 10 MHz je vydělen děličkami kmitočtu na stejnou frekvenci, jakou má PPS signál. V tomto případě se jedná o 100 PPS a 100 Hz signál (deska umožňuje synchronizaci i na 1 PPS signál, potom je kmitočet po vydělení nastaven na 1 Hz).

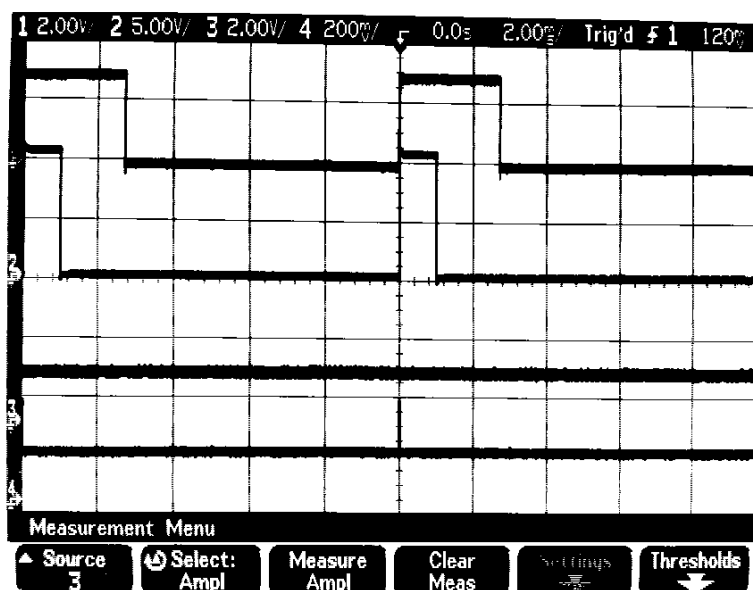
Krystalový oscilátor na desce má kmitočet 10 MHz. Jeho přesnost je závislá na přesnosti PPS signálu a na správné funkci fázového závěsu. Krystalový oscilátor není dokonale stabilní pravděpodobně z důvodu přechodových dějů. Při zobrazení na osciloskopu signál tzv. „běhá po obrazovce“ v rozsahu cca 2 period kmitočtu 10 MHz, tzn., že odchylka je přibližně 200 ns.



Obr. 40 Signál oscilátoru a PPS signál

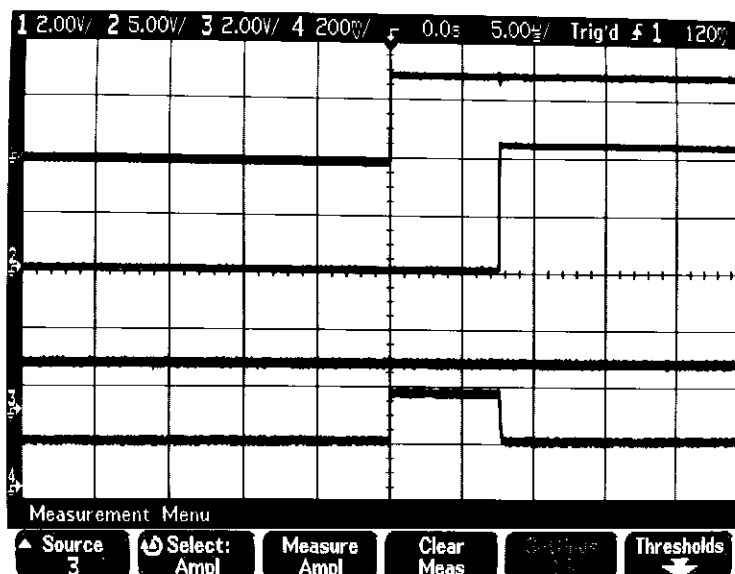
Na obrázku níže je vidět PPS signál, pod ním je fázovým závěsem již zachycen vydělený signál oscilátoru. Třetí signál je střední napětí za fázovým závěsem, kterým se řídí

kmitočet VCXO. Poslední signál zobrazuje impuls, který reguluje úroveň řídicího napětí. Tyto pulsy vydává obvod PLL.



Obr. 41 Synchronizace sekundy na pulsy 100 PPS, časová osa 200 ms/dílek

Situaci podrobněji zachycuje další obrázek s podrobnějším časovým měřítkem. Situace je vyfocena v režimu zachycení, tedy ve stabilním stavu.



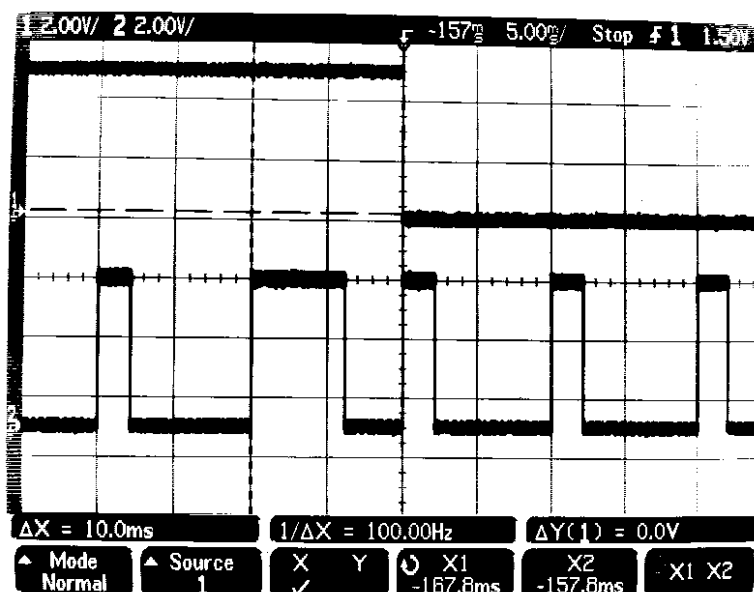
Obr. 42 Synchronizace sekundy na pulsy 100 PPS, časová osa 5 μs/dílek

Důvodnou otázkou by mohlo být, proč jsou signály od sebe posunuty, když jsou fázově zavěšeny. Časový odstup signálů je cca 7,5 μs. Důvodem je nejpravděpodobněji drobná nepřesnost řídicí charakteristiky oscilátoru VCXO. Oscilátor zřejmě nemá střední kmitočet úplně přesně na hodnotě poloviny napájecího napětí, jak také znázorňuje obr. 18, ale nepatrně vedle, což způsobí, že pro přesnou střední frekvenci je nutné napětí o málo vyšší. Smyčka PLL na to reaguje zvýšením napětí, což způsobí právě tuto drobnou odchylku v čase. Jedinou možností eliminace by bylo přivedení napětí z externího děliče. Ale proto, že každý obvod VCXO může mít odchylku jinou, bylo by nutné vyrobit dělič plynule proměnný (trimr). Tato

součástka je ale dlouhodobě nestabilní, málo odolná otřesům a vnějším vlivům a teplotně závislá, takže by zaváděla další nahodilé chyby. Proto bude výhodnější tuto odchylku změřit a dále při měření uvažovat.

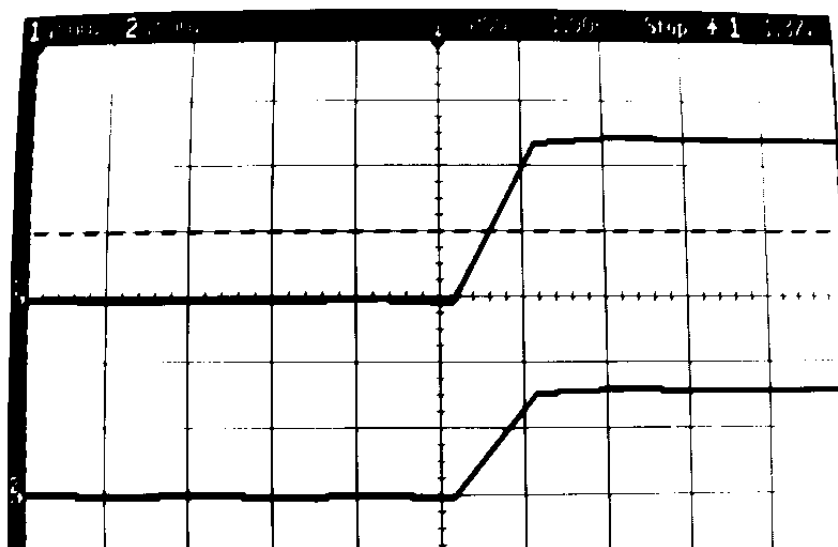
8.3 Synchronizace mikroprocesoru

Mikroprocesor má za úkol synchronizovat svoje časovače a následné měření na počátek sekundy. To se provede pomocí programu vysvětleného v kapitole 7.1.1. Zde je vidět změna úrovně napětí horního signálu při nástupné hraně po dlouhém pulsu, která označuje právě začátek následující sekundy.



Obr. 43 Synchronizace sekundy na pulsy 100 PPS, časová osa 5 ms/dílek

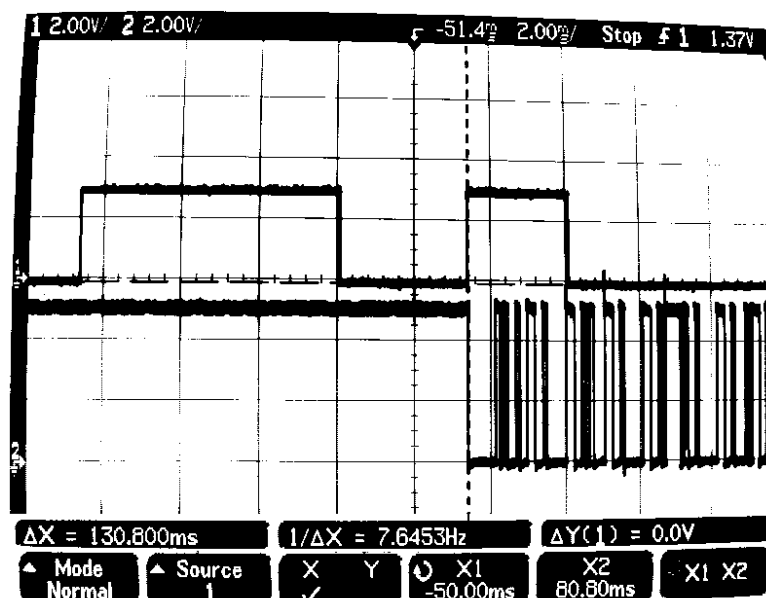
Po přiblížení těchto signálů lze odečíst zpoždění a strmost hran. Strmost hrany je 5 V/ μ s, resp. 3 V/ μ s. Lze tedy říci, že přesnost je větší než 1 μ s, řádově desítky nanosekund.



Obr. 44 Synchronizace sekundy na pulsy 100 PPS, časová osa 1 μ s/dílek

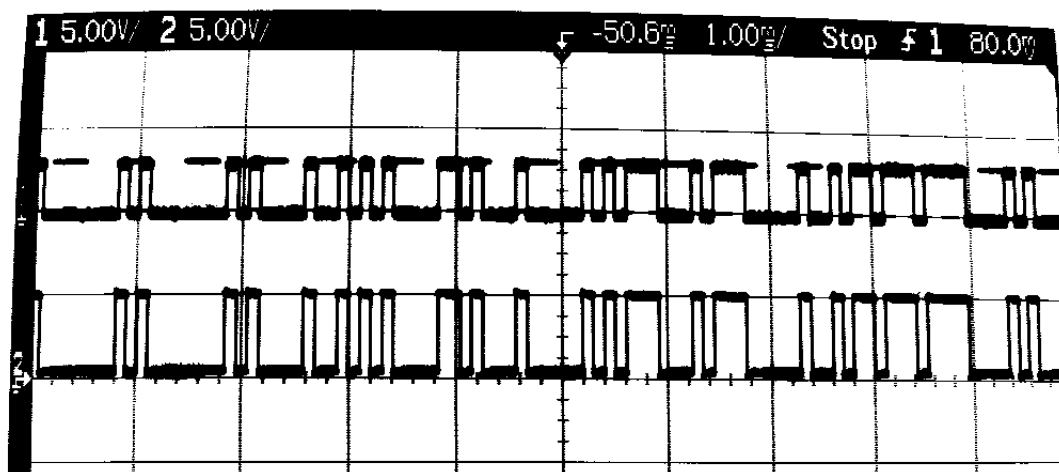
8.4 Sériová datová linka

Vysílání dat z MCU do PC je periodicky opakováno každou sekundu. Začátek vysílání je vždy s příchodem následujícího časového intervalu. Tento průběh lze vidět na následujícím obrázku. Počátek sekundy je nástupná hrana krátkého pulsu prvního signálu. Signál z datové linky je zobrazen ve spodní části. Vysílání je tedy zahájeno prakticky okamžitě.



Obr. 45 Vysílání dat do PC (USART TX) synchronizované s příchodem sekundy

Protože GPS přijímač pracuje s napětím 3,0 V a mikroprocesor s napětím 5,0 V, bylo nutné použít převodník úrovně. To bylo provedeno obvodem ADG3300 (viz 6.5). Na následujícím obrázku je vstup a výstup obvodu. Je zřejmé, že první signál je v úrovni 3,0 V a druhý s úrovní 5,0 V. Datová komunikace přes tento obvod probíhá bez problémů.



Obr. 46 Vstupní a výstupní data na převodníku úrovně ADG3300

9 Závěr

V tomto projektu je zmíněn princip funkce systému GPS, který se využívá nejen pro navigaci, ale též k časové synchronizaci a dalším účelům. Přestože existuje více využitelných možností, technologie GPS je zadána z několika důvodů: tento systém je kompletně v provozu, je funkční, odzkoušený, celosvětový a zdarma, má velkou dostupnost uživatelského vybavení a v neposlední řadě je udávána velmi vysoká přesnost systému (i z hlediska časových parametrů). Tato práce se zaměřuje na využití časovacích signálů, které získáme ze speciálního GPS přijímače určeného právě pro přesné časování. Práce obsahuje výčet nejdostupnějších časovacích GPS přijímačů, přičemž se předpokládá využití modulu od firmy Motorola: i-Lotus M12MT. S využitím tohoto modulu je navrženo blokové schéma pro synchronizaci oscilátoru a promyšlen princip příjmu časových značek.

Dále je v projektu detailnější rozbor zapojení pro snímání časových informací. Jedná se o návrh konkrétních bloků a součástek. Volba napájení a výpočet stabilizátoru, zapojení převodníku FT232, výběr krystalového oscilátoru, naprogramování děliček a fázového závěsu. Byla vytvořena testovací verze zapojení, kde byly změřeny parametry PPS signálu, krystalový oscilátor, funkčnost fázového závěsu, sériový převodník dat a vyzkoušena komunikace GPS modulu s PC.

Je navrženo konkrétní zapojení obvodu, které bude přijímat časové údaje a digitálně vzorkovat externí signál a tyto data předávat ke zpracování do PC. Toto zapojení bylo nakresleno a vyrobeno na navrhnutou desku plošných spojů. Po osazení zmíněnými součástkami a mikroprocesorem byl vyvinut program pro mikroprocesor, který obsluhuje všechny tyto signály a umožní příjem a posílání dat. Bylo nutné navrhnout formát dat, ve kterém budou data předávána do PC. Dle tohoto protokolu dat byl v programu MATLAB vytvořen obslužný program, který umožňuje příjem, vykreslení a uložení dat pro další zpracování. Tento program je vytvořen v grafickém prostředí MATLABu, je tedy intuitivní a vypadá jako běžná aplikace.

Byl navrhnut, sestaven a odzkoušen systém, který dokáže zaznamenat externí signál synchronně s reálným časem UTC. V případě použití dvou stejných modulů v různém místě můžeme tyto signály snímat a rozhodnout o jejich vzájemné synchronizaci.

10 Použitá literatura

- [1] KASAL, Miroslav. Směrové a družicové spoje. II. Vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2005. 111 s. ISBN 80-214-2496-6.
- [2] GPS In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 10.9.2006 [cit. 2010-02-26]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/GPS>>.
- [3] Sluneční vítr In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 8.5.2005 [cit. 2009-03-14]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Sluneční_vítr>.
- [4] MEHAFFEY, Joe; YEAZEL, Jack; DEPRIEST, Dale. *GPS Information* [online]. 1997, 2008 [cit. 2009-03-08]. GPS Reciever Information. Dostupné z WWW: <<http://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm>>.
- [5] SIRF Technology, Inc. *NMEA reference manual* [online]. [s.l.] : [s.n.], 1996, 2007 [cit. 2009-03-08]. Dostupné z WWW: <http://download.vincotech.com/positioning/documents/SiRF_NMEA_Reference_Manual_2.1.pdf>.
- [6] Defense Industry Daily, *Boeing Wins R&D Contract...*, [online] 2004-2009, [cit 2009-03-08]. Dostupné z WWW: <http://www.defenseindustrydaily.com/images/SPAC_Satellite_GPS_IIF_Ig.jpg>
- [7] i-Lotus Corporation Pte. Ltd., *Technical Data M12M Timing*, [technický list] Rev. 1.1, 07/2006, [cit 2009-03-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.ilotus.com.sg>>
- [8] Leadtek Research Inc., *LEADTEK GPS MODULE GPS 9101*, [technický list] 2008, [cit 2009-04-19]. Dostupné z WWW: <ftp://ftp.leadtek.com.tw/gps/9101/LR9101_v1.6_052208.pdf>
- [9] Conexant Systems, Inc., *Jupiter T - GPS Timing Receiver*, [technický list] 20.6.2001, [cit 2009-04-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.navchina.com/download/book/Jupiter-T%20.pdf>>
- [10] C-MAC Microtechnology, *IQVCXO-161*, [online] 23.8.1998, [cit 2009-04-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetarchive.com/pdf-datasheets/Datasheets-7/DSA-137914.pdf>>
- [11] Trimble Navigation Limited, *User guide - Resolution T®*, [online] červenec 2008, [cit 2009-04-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.trimble.com/timing/resolution-t.aspx?dtID=support>>
- [12] Philips Semiconductors, *74HC/HCT4046A Phase-locked-loop with VCO* [online] 25.11.1997, [cit 2009-04-23]. Dostupné z WWW: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/426/426-067/dsh.426-067.1.pdf>
- [13] © IQD Frequency Products Ltd 2009, [online], [cit 2009-11-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.iqdfrequencyproducts.com/products/search/?pfg0o=8>>
- [14] Philips Semiconductors, *4059* [online] Leden 1995, [cit 2009-11-22]. Dostupné z WWW: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/17723/PHILIPS/HEF4059BT/+0W5_4ulEGIHPTcKpKztDHI++/datasheet.pdf>

- [15] Manchester encoding both conventions.svg In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , 4.12.2009 [cit. 2010-05-18]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Manchester_encoding_both_conventions.svg>.
- [16] Future Technology Devices International Limited. *FT232R USB UART IC Datasheet Version 2.04* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2010-04-09]. Dostupné z WWW: <http://www.ftdichip.com/Documents/DataSheets/DS_FT232R_V205.pdf>.
- [17] ASCII In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 22.6.2004, 20.4.2010 [cit. 2010-05-18]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/ASCII>>.
- [18] Analog Devices, Inc., *ADG3300* [online] 2010, [cit 2010-05-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.analog.com/en/interface/level-translators/ADG3300/products/product.html>>
- [19] hw.cz., sériová linka RS-232 [online] 12.12.2005, [cit 2010-05-09]. Dostupné z WWW: <<http://hw.cz/rs-232>>
- [20] SparkFun Electronic., SparkFun Electronic [online] 2010, [cit 2010-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.sparkfun.com>>
- [21] National Semiconductor., LP2951 [online] 15.5.2010, [cit 2010-05-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.national.com/mpf/LP/LP2951.html#Overview>>

11 Seznam použitých symbolů a zkratek

A/D	Analogově digitální převodník
ASCII	American Standard Code for Information Interchange, tabulka standardních textových znaků
Bd	Baud rate, bitová rychlost [b/s]
BDM	Background Debugging Module, programovací a testovací rozhraní
bit	bitová hodnota
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor, polovodičová součástka vyrobená CMOS technologií
COM	Komunikační port v PC
DPS	Deska plošných spojů
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, elektricky mazatelná a programovatelná paměť
EN	Enable, povolovací vstup
FET	Field effect transistor, tranzistor řízený polem
GND	Ground, zemní potenciál (0 V)
GPS	Global Positioning System, družicová navigace
HEX	hexadecimální hodnota
IEO	Intermediate Elevation Orbit, střední oběžná dráha okolo Země
ISP	In System Programming, sériové programovací rozhraní
JTAG	Joint Test Action Group, programovací standard
LED	Light Emitting Diode, světlo emitující dioda
LSB	Least significant bit, nejméně důležitý bit s nejmenší vahou
MATLAB	Program pro matematické výpočty a zpracování dat
MCS	Master Control Station, řídicí stanice pro GPS družice
MCU	Mikrokontrolér, mikroprocesor
MSB	Most significant bit, nejdůležitější bit s nejvyšší vahou
NMEA	National Marine Electronics Association, standard pro komunikaci GPS přijímačů
PC	Počítač (stolní nebo notebook) s odpovídajícím vybavením
PLL	Phase locked loop, fázový závěs
ppm	Points per million, počet jednotek z miliónu
PPS	Pulse per second, puls za sekundu
SiRF	Standard pro datovou komunikaci GPS přijímačů
SMD	Surface Mounted Device, součástka pro povrchovou montáž
SRAM	Static RAM, vnitřní paměť mikroprocesoru
τ	časová konstanta [s]
TCVCXO	Temperature Compensated Voltage Controlled Xtal Oscillator, Teplotně kompenzovaný napětově řízený krystalový oscilátor
TTL	Transistor-Transistor-Logic, standardní logické úrovně
I2C	Two Wire Interface, dvoudrátový interface (též I2C)
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter, univerzální synchronní a asynchronní protokol
USB	Universal serial bus, univerzální sériová linka
UTC	Coordinated Universal Time, standardizovaný světový čas na nultém poledníku
Vcc, Ucc	Napájecí napětí
VCO	Voltage Controlled Oscillator, Napětově řízený oscilátor (obecně)
VCXO	Voltage Controlled Xtal Oscillator, Napětově řízený krystalový oscilátor

Příloha 1 – ASCII tabulka

ASCII [17] je americký standardní kód pro výměnu informací (American Standard Code for Information Interchange). Jedná se o nejrozšířenější sadu kódu pro předávání znaků textových zpráv doplněné o speciální ovládací znaky.

Základní část tabulky se skládá ze 128 znaků. Prvních 32 znaků je definováno pro ovládání vzdáleného zařízení (dříve se využívalo např. pro posuv tiskové hlavy, posuv papíru zapisovače, tiskárny apod., nyní se stále využívají některé znaky pro definici konce bloku dat, odřádkování textu atd.), zbylé znaky jsou vlastními znaky výstupního textu. Dalších 128 znaků (od binární hodnoty 1000 0000) je definováno pro různé národní znakové sady (nejsou v této tabulce).

Dec	Hex	Binárně	Znak	Význam
0	00	0000000	NUL	Null character
1	01	0000001	SOH	Start of Header
2	02	0000010	STX	Start of Text
3	03	0000011	ETX	End of Text
4	04	0000100	EOT	End of Transmission
5	05	0000101	ENQ	Enquiry
6	06	0000110	ACK	Acknowledgment
7	07	0000111	BEL	Bell
8	08	0001000	BS	Backspace
9	09	0001001	HT	Horizontal Tab
10	0A	0001010	LF	Line feed
11	0B	0001011	VT	Vertical Tab
12	0C	0001100	FF	Form feed
13	0D	0001101	CR	Carriage return
14	0E	0001110	SO	Shift Out
15	0F	0001111	SI	Shift In
16	10	0010000	DLE	Data Link Escape
17	11	0010001	DC1	Device Control 1 (XOn)
18	12	0010010	DC2	Device Control 2
19	13	0010011	DC3	Device Control 3 (XOff)
20	14	0010100	DC4	Device Control 4
21	15	0010101	NAK	Neg. Acknowledgement
22	16	0010110	SYN	Synchronous Idle
23	17	0010111	ETB	End of Trans. Block
24	18	0011000	CAN	Cancel
25	19	0011001	EM	End of Medium
26	1A	0011010	SUB	Substitute
27	1B	0011011	ESC	Escape[t 8]
28	1C	0011100	FS	File Separator
29	1D	0011101	GS	Group Separator
30	1E	0011110	RS	Record Separator
31	1F	0011111	US	Unit Separator

Dec	Hex	Binárně	Znak
32	20	0100000	space
33	21	0100001	!
34	22	0100010	"
35	23	0100011	#
36	24	0100100	\$
37	25	0100101	%
38	26	0100110	&
39	27	0100111	'
40	28	0101000	(
41	29	0101001)
42	2A	0101010	*
43	2B	0101011	+
44	2C	0101100	,
45	2D	0101101	-
46	2E	0101110	.
47	2F	0101111	/
48	30	0110000	0
49	31	0110001	1
50	32	0110010	2
51	33	0110011	3
52	34	0110100	4
53	35	0110101	5
54	36	0110110	6
55	37	0110111	7
56	38	0111000	8
57	39	0111001	9
58	3A	0111010	:
59	3B	0111011	;
60	3C	0111100	<
61	3D	0111101	=
62	3E	0111110	>
63	3F	0111111	?

Dec	Hex	Binárně	Znak
64	40	1000000	@
65	41	1000001	A
66	42	1000010	B
67	43	1000011	C
68	44	1000100	D
69	45	1000101	E
70	46	1000110	F
71	47	1000111	G
72	48	1001000	H
73	49	1001001	I
74	4A	1001010	J
75	4B	1001011	K
76	4C	1001100	L
77	4D	1001101	M
78	4E	1001110	N
79	4F	1001111	O
80	50	1010000	P
81	51	1010001	Q
82	52	1010010	R
83	53	1010011	S
84	54	1010100	T
85	55	1010101	U
86	56	1010110	V
87	57	1010111	W
88	58	1011000	X
89	59	1011001	Y
90	5A	1011010	Z
91	5B	1011011	[
92	5C	1011100	\
93	5D	1011101]
94	5E	1011110	^
95	5F	1011111	_

Dec	Hex	Binárně	Znak
96	60	1100000	`
97	61	1100001	a
98	62	1100010	b
99	63	1100011	c
100	64	1100100	d
101	65	1100101	e
102	66	1100110	f
103	67	1100111	g
104	68	1101000	h
105	69	1101001	i
106	6A	1101010	j
107	6B	1101011	k
108	6C	1101100	l
109	6D	1101101	m
110	6E	1101110	n
111	6F	1101111	o
112	70	1110000	p
113	71	1110001	q
114	72	1110010	r
115	73	1110011	s
116	74	1110100	t
117	75	1110101	u
118	76	1110110	v
119	77	1110111	w
120	78	1111000	x
121	79	1111001	y
122	7A	1111010	z
123	7B	1111011	{
124	7C	1111100	
125	7D	1111101	}
126	7E	1111110	~
127	7F	1111111	DEL

Příloha 2 – Schéma zapojení

Příloha 3 – Deska plošných spojů, osazovací plán

Rozměry desky 97 x 84 mm, měřítko M1:1

Příloha 4 – Seznam součástek

Zkratka	Počet	Název, hodnota	Pouzdro
IC0	1	(Motorola) i-Lotus M12MT – GPS přijímač	10 pin modul
IC1	1	74HC 4046 – fázový závěs	SO16
IC2,3	2	HEF 4059 BT – dělička kmitočtu	SO24W
IC4,5,6	3	LP2951 - stabilizátor	SO8
IC7	1	7805 - stabilizátor	TO252
IC8	1	FT232RL – USB převodník	SSOP8
IC9	1	ATmega128-16AC - mikroprocesor	TQFP64
IC10	1	ADG3300 - převodník úrovně	TSSOP20
Q1	1	CFPV-45, VCXO	7x5 mm
T1,2	2	BSS123, tranzistor	SOT23
LED1,2,3,4,5,6, 41,51,61,71, RXLED,TXLED	12	Zelená LED dioda	0603
R8T,R8R	2	270 Ω	0805
RT1C,RT2C	2	360 Ω	1206
R62	1	680 Ω	0805
R11,12,43,53	4	1 k Ω	1206
R42	1	1 k Ω	0805
R41	1	1,5 k Ω	0805
RT1B2,RT2B2	2	2,2 k Ω	1206
R14	1	2,7 k Ω	1206
R63,73,1-6	8	3,3 k Ω	1206
RT1B1,RT2B1	2	3,6 k Ω	1206
R52	1	4,7 k Ω	0805
R61	1	5,1 k Ω	0805
R13	1	5,6 k Ω	1206
R51	1	8,2 k Ω	0805
J01,02,10-15, 21,22,41,51, 61,91-95,JT1	18	0 Ω – nulová propojka	1206
CT1,CT2	2	1 nF	1206
C01,13,21,31, 81-83,CQ1,CU2	9	100 nF	1206
C12,41,42,52,62, 72,CU1	7	1 μ F	SMC_A
C11	1	22 μ F	SMC_C
S1,S2	2	P-B1720 - mikrotlačítko	6,5x4,5 mm
LU1	1	10 nH	1206
JP21,22,31,32, JP_TXRX,_RXTX SPI,JTAG	20	Dvouřadá pinová lišta přímá	
JP_3_5	3	Jednořadá pinová lišta přímá	
CON2	1	USB-B 90° do DPS	USB-B 90°
CON1	1	Konektor napájecí K375A 90°	2,1 mm