

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

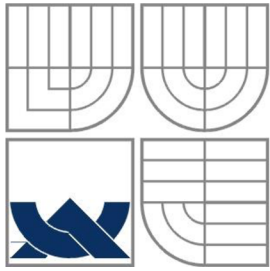
ZPŘESŇOVÁNÍ POLOHY POMOCÍ DIFERENCIÁLNÍ
GPS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

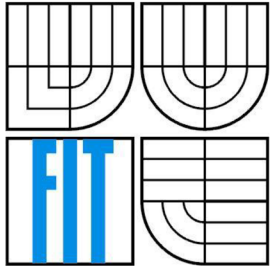
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAROSLAV KOŠŤÁL

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

ZPŘESŇOVÁNÍ POLOHY POMOCÍ DIFERENCIÁLNÍ GPS

POSITION IMPROVEMENT USING DIFFERENTIAL GPS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAROSLAV KOŠŤÁL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ NOVOTNÝ

BRNO 2013

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá principy zpřesňování polohy pomocí diferenciální GPS. Teoretická část se věnuje základním pojmům z oblasti klasické a diferenciální GPS a návrhem implementace diferenciální GPS. Cílem praktické části je implementace navržené diferenciální GPS pomocí dvou vhodných GPS modulů se zpracováním dat na jedné stanici v reálném čase a vytvoření grafického rozhraní. Výsledné určování polohy by mělo ve srovnání s klasickou GPS vykazovat přesnější výsledky.

Abstract

The bachelor thesis describes techniques of precision of a position using a differential GPS. The theoretical part provides with basic terminology on classical and differential GPS and with a blueprint for implementation of the differential GPS. The aim of the practical part is the implementation of the blueprint per se using two suitable GPS modules with data processing on the station in real time and creation of a graphical interface. The final determining of the position should be more accurate than one using a classical GPS.

Klíčová slova

DGPS, diferenciální GPS, EVK-6T, zdánlivá vzdálenost, chyby měření, korekce

Keywords

DGPS, differential GPS, EVK-6T, pseudorange, measurement errors, corrections

Citace

Košťál Jaroslav: Zpřesňování polohy pomocí diferenciální GPS, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2013

Zpřesňování polohy pomocí diferenciální GPS

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Tomáše Novotného. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Jaroslav Košťál

15. 5. 2013

Poděkování

Chtěl bych na tomto místě poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Novotnému za odborné vedení a cenné připomínky při zpracování bakalářské práce. Dále velice děkuji mé rodině za podporu a trpělivost v průběhu celého studia.

© Jaroslav Košťál, 2013

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1	Úvod.....	3
2	Diferenciální GPS	4
2.1	System GPS	4
2.1.1	Družice a jejich dráhy	4
2.1.2	Signály a zprávy družic	7
2.1.3	Přijímač a určení polohy	8
2.2	Chyby měření	10
2.2.1	Nezávislé chyby	11
2.2.2	Závislé chyby	11
2.2.3	Odstranění chyb	13
2.3	Princip diferenciální GPS	13
2.3.1	Výpočet a přenos korekcí	15
2.3.2	Příjem a zpracování korekcí	16
3	Návrh vlastního řešení	17
3.1	GPS moduly.....	17
3.1.1	UBX protokol	18
3.2	Funkce výpočetní stanice.....	19
3.2.1	Metoda nejmenších čtverců	20
4	Implementace.....	22
4.1	Grafické uživatelské rozhraní	22
4.2	Popis tříd.....	24
4.2.1	MainWindow	24
4.2.2	DeviceCommunication	24
4.2.3	ErrorDialog	24
4.2.4	GoogleMapsAPI	24
4.2.5	ProcessingUnit	25
4.2.6	Messages.....	25
4.2.7	GPS_system.....	26
4.2.8	GPS_functions	26
5	Experimenty a zhodnocení výsledků	27
5.1	Zdánlivé vzdálenosti modulů.....	27
5.2	Iterace algoritmu určení polohy	28
5.3	Podmínky použití družic.....	29
5.4	Přesnost určení polohy	30

5.4.1	Klasická GPS a diferenciální GPS.....	30
5.4.2	Modul GPS a diferenciální GPS	32
5.5	Zhodnocení experimentů	34
6	Závěr	35
6.1	Zhodnocení výsledků.....	35
6.2	Rozšíření a pokračování projektu	36
	Literatura	37
	Obsah CD	39

1 Úvod

Diferenciální GPS je metodou zvyšování přesnosti měření polohového navigačního systému NAVSTAR GPS. Je jednou z metod, jak lze tento systém dále zpřesňovat a umožnit tak jeho aplikaci i v oblastech vyžadujících co nejpřesnější zaměrování polohy. Je proto využívána například v lodní a letecké dopravě nebo geodezii. Právě integrace satelitní navigace do mnoha odvětví lidské činnosti stála za snahou najít metody a algoritmy eliminující chyby vstupující do výpočtů určování polohy, čímž se otevíraly další možnosti jejího využití.

Samotný princip, na kterém funguje diferenciální GPS, není principiálně příliš odlišný od klasické GPS. Systém určuje trojrozměrnou polohu přijímače vybaveného GPS modulem na základě určení vzdáleností mezi tímto přijímačem a viditelnými satelity. V systému však existuje těchto přijímačů více, z nichž jeden obvykle sleduje odchylky signálů způsobené různými chybami a jejich opravy předává ostatním přijímačům. Na základě těchto oprav jsou přijímače schopny eliminovat nebo omezit vliv chyb a zpřesnit svoje výpočty.

Tato práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část je dále rozdělena na dvě kapitoly, z nichž první se zabývá principy a pojmy z oblasti diferenciální GPS. Jsou v ní popsány pojmy klasické GPS, na kterých diferenciální GPS staví, a teorie chyb v systému družicové navigace. Dále platné principy diferenciální metody. Druhá kapitola se věnuje návrhu vlastního algoritmu pro zpřesňování polohy, který bude použit k jeho praktické implementaci a testování. Při jeho návrhu se vychází z principů a informací v první kapitole a experimentů popsaných v praktické části. Praktická část zahrnuje kapitolu o implementaci navrženého řešení a popis aplikace. Kapitola experimentů popisuje postupy měření, které vedly k optimalizaci implementace a následně ke zhodnocení dosažených výsledků. Závěr práce je věnován celkovému shrnutí a možnému dalšímu pokračování práce.

2 Diferenciální GPS

Tato kapitola se zabývá teorií klasické GPS a z ní vycházející DGPS (**Diferenciální GPS**) a to především používanými pojmy a postupy. Je zde nastíněna historie a vývoj polohového navigačního systému GPS, dále informace o družicích a jejich signálech reprezentujících zprávy. K pochopení celku jsou popsány přijímače GPS signálu a způsoby, jakými na jeho základě určují svoji polohu v prostoru. Protože smyslem použití diferenciálních a podobných metod je právě eliminace nebo zmenšení vlivu chyb způsobujících snížení přesnosti určení polohy, zabývá se jedna část také rozdělením, příčinou a důsledky chyb. Stěžejní část kapitoly se zabývá principy samotné diferenciální GPS a jejím dělením podle určitých kritérií.

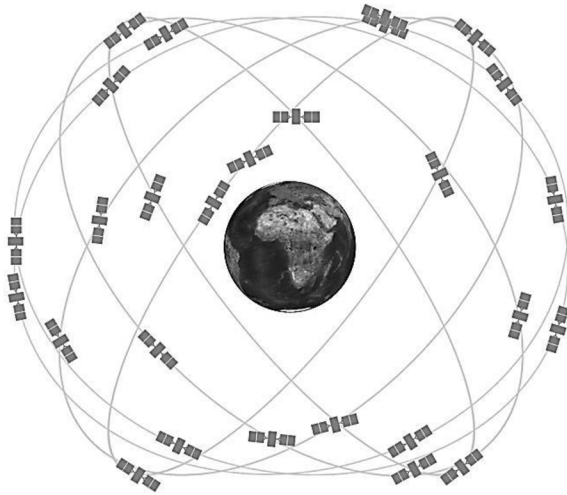
2.1 Systém GPS

GPS je zkratka pro **Global Positioning System**, družicový systém označovaný také jako NAVSTAR GPS (**NAVigation System using Time And Range**) vyvinutý pro potřeby armády USA. Jeho vývoj započal v roce 1969 a do plného provozu byl uveden v roce 1995 [1]. V roce 2000 došlo k odstranění záměrné chyby v signálu, nazývané výběrová dostupnost SA (**Selective Availability**) a tím jeho masivnímu rozšíření do civilního sektoru. Je to pasivní dálkoměrný systém, což znamená, že vysílače (družice) a přijímač spolu vzájemně nekomunikují a signál je vysílán pouze družicemi, čímž zůstává pozice přijímače utajena. Princip dálkoměrné metody a ostatních metod je popsán dále v kapitole 2.1.3. Pozice přijímače je určena na základě výpočtu polohových souřadnic viditelných družic a vzdáleností k těmto družicím. Především utajení přijímače představuje z pohledu původního určení systému pro vojenské účely výhodu.

2.1.1 Družice a jejich dráhy

GPS vyžaduje pro svoji plnou funkčnost celkem 24 družic, ke kterým postupně přibýly ještě družice záložní a rozšiřující. Ty obíhají kolem planety ve výšce 20 200 km nad jejím povrchem na celkem šesti různých oběžných drahách se sklonem 55° s tolerancí $\pm 3^\circ$ po plánovanou dobu životnosti družice, vzájemným pootočením drah o 60° a oběžnou dobou 11 hodin 58 minut [2] (obrázek 2.1). Každý den se tak družice objeví na stejném místě o 4 minuty dříve. Po jedné dráze obíhají minimálně 4 družice a z pohledu ze Země je v kteroukoliv denní dobu zajištěna viditelnost alespoň 5 družic, což je u dálkoměrného systému vedle přesného času zásadní při určování polohy.

K zajištění přesného času v systému jsou na všech družicích instalovány čtyři atomové cesiové nebo rubidiové hodiny, které dosahují stability 10^{-11} až 10^{-13} za 24 hodin [3].



Obrázek 2.1: Oběžné dráhy družic [4].

Dráhy družic lze v případě zanedbání gravitačních vlivů považovat za eliptické kolem středu umístěného v těžišti Země a lze na ně aplikovat Keplerovy zákony. Pak se k výpočtu polohy konkrétní družice určí tvar elipsy, její poloha vzhledem k Zemi a nakonec poloha družice v čase ležící na této elipse (teorie v této kapitole vychází z [2]). Tvar elipsy je charakterizován její hlavní poloosou A a vedlejší poloosou B nebo excentricitou e . Poloha elipsy je podle obrázku 2.2 dána úhlem inklinace i (úhel roviny rovníku a severní poloroviny dráhy), úhlem rektascenze Ω (úhel mezi směrem k jarnímu bodu a vzestupnému uzlu) a argumentem perigea ω (úhel mezi směrem k vzestupnému uzlu a směrem k perigeu). Poloha družice je řešitelná pomocí vzorců vycházejících z Keplerových zákonů. Vzhledem k predikovatelné dráze v čase t stačí znát polohu družice v čase t_0 a z 3. Keplerova zákona oběžnou dobu jako

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{A^3}{\mu}}, \quad (2.1)$$

kde μ je gravitační konstanta. Pak z 2. Keplerova zákona

$$E - e \sin(E) = M, \quad (2.2)$$

kde E je neznámá excentrická anomálie a M je střední anomálie podle vztahu

$$M = \frac{2\pi}{T} (t - t_0) + M_0. \quad (2.3)$$

Vyřešením rovnice pro excentrickou anomálii lze určit jak vzdálenost r družice od těžiště Země

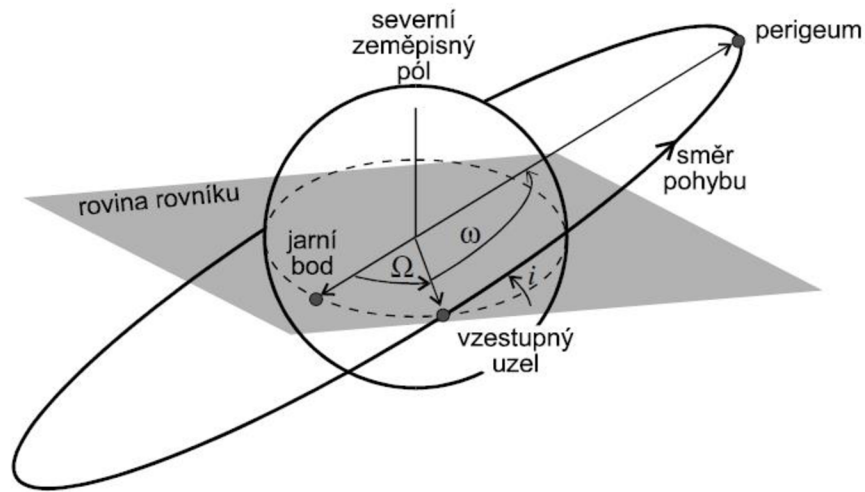
$$r = A(1 - e \cos E), \quad (2.4)$$

tak také úhel družice v od perigea

$$\sin(v) = \sqrt{1 - e^2} \frac{\sin(E)}{1 - e \cos(E)}, \quad \cos(v) = \frac{\cos(E) - e}{1 - e \cos(E)}. \quad (2.5)$$

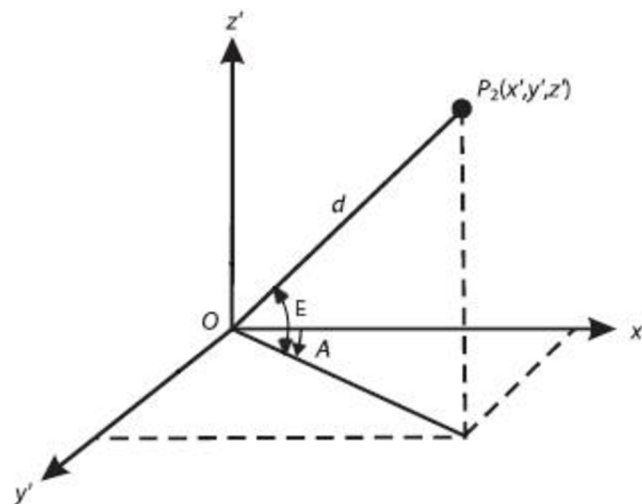
Pokud je označen argument šířky $\Phi = v + \omega$, má družice v orbitální rovině souřadnice

$$x' = r \cos(\Phi), y' = r \sin(\Phi). \quad (2.6)$$



Obrázek 2.2: Poloha elipsy vůči Zemi [2].

Takto určené souřadnice je třeba normalizovat, protože výpočty poloh v soustavě GPS probíhají v soustavě x, y, z pevně spojené se Zemí. Ta je definována tak, že počátek soustavy leží v těžišti země, osa z leží v ose rotace Země, osa x prochází greenwickským poledníkem a osa y se volí tak, aby byla celá soustava pravotočivá. Tato soustava rotuje se Zemí konstantní úhlovou rychlostí a poloha družice v soustavě se určí otočením os orbitální roviny o úhly danými časem t a parametry z navigační zprávy.



Obrázek 2.3: Azimut a elevace v pravouhlé soustavě.

Za předpokladu známé pozice přijímače a satelitu je často jejich vzájemná poloha vyjádřena také hodnotami azimutu a elevace. Jsou to orientované úhly mezi bodem přijímače a referenčním

bodem (v tomto případě družicí) promítnutém k referenční rovině (viz obrázek 2.3). Azimut je úhel svíraný od severního směru v horizontální rovině. Elevace je úhel svíraný vektorem od osy rotace Země ve vertikální rovině.

2.1.2 Signály a zprávy družic

Družice vysílají signály na dvou nosných vlnách L1 (1575,42 MHz) a L2 (1227,60 MHz) a počítá se se zavedením další označované L5 (1176,45 MHz) [15]. Na tyto vlny se moduluji pseudonáhodné dálkoměrné kódy C/A (Coarse Acquisition), P (Precision/Protected) a navigační zprávy. Většina běžných GPS přijímačů pracuje s kódem C/A, což je takzvaný Goldův kód, který je sice méně přesný než P kód, ale je vždy nešifrovaný. Kód má takové vlastnosti, aby se zajistilo oddělení signálů různých družic. Šifrovaný P kód používá rychlejší a delší kód a v kombinaci s měřením na frekvencích L1 a L2 se omezuje vliv atmosférických jevů. Je používán především pro armádní účely. Zpracování dálkoměrného kódu probíhá na straně přijímače a je ukázáno v následující kapitole.

Protože do výpočtu polohy v systému GPS vstupuje celá řada proměnných, musí systém poskytovat vedle dálkoměrného kódu ještě další informace o stavu, ve kterém se aktuálně nachází. Proto družice vysílají ještě cyklicky se opakující datovou relaci označovanou jako navigační zpráva. Navigační zpráva [13] je rozdělena na 25 rámců o délce 30 sekund a velikosti 1500 bitů, z toho každý rámeček je rozdělen na 5 podrámčů. K opakování zprávy tedy dochází po 12,5 minutách. Informace o systému rozdělená do podrámčů je následující:

- Čas vysílání počátku zprávy
- Keplerovské efemeridy družice
- Korekce hodin družice
- Almanach
- Koeficienty ionosférického modelu
- Stav družice

Keplerovské efemeridy družice jsou přesné krátkodobé predikce drah dané družice. Tyto predikce obvykle platí 4 hodiny a obnovují se každé 2 hodiny. Predikce zahrnují Keplerovy parametry popsané v 2.1.1 a korekční členy zpřesňující polohu družice. Korekce hodin družice slouží k výpočtu celkové odchylky časové základny družice od systémového času GPS a určení přesného času. Almanach oproti efemeridám obsahuje méně přesné, ale dlouhodobé predikce drah všech družic v systému a obvykle platí několik měsíců, umožňuje přijímači vyhledat signály ostatních viditelných družic. Koeficienty ionosférického modelu informují o parametrech aktuálního stavu ionosférické vrstvy atmosféry, jejíž vlastnosti ovlivňují průchod signálu a jsou proměnné v závislosti na denní době a úhlu dopadu signálu. O chybách způsobených časovými odchylkami a šířením signálu pojednává dále kapitola 2.2.

2.1.3 Přijímač a určení polohy

Přijímač v systému GPS je zařízení, které zpracovává signály družic a určuje podle nich svoji výslednou polohu. Většina dnešních přijímačů je konstruována jako multikanálové zařízení, což umožňuje současný příjem a zpracování signálů z několika družic. Při zpracování signálů družic se používá následujících metod [5]:

- Dálkoměrná – porovnání časových značek odeslání a příjmu signálu
- Měření fáze nosné – určení vzdálenosti na základě rozdílu fáze nosné vlny signálu a počtu period nosné
- Dopplerovská – určení vzdálenosti využívající Dopplerova jevu změny frekvence signálu při nenulové vzájemné rychlosti vysílače a přijímače

V dalším textu a v návrhu vlastního řešení se předpokládá využití principů dálkoměrné metody, která je nejběžnější a v případě přesného určení času poskytuje dostatečně přesné výsledky. Ostatní metody dosahují stejných nebo lepších výsledků za cenu výpočetní složitosti a předpokládají hardwarovou implementaci.

Princip dálkoměrné metody [2] je v měření vzdáleností d_i od jednotlivých družic. Tyto vzdálenosti jsou reprezentovány časy τ_i mezi odesláním signálů z družic a jejich příjmem, tedy pro reálnou vzdálenost k i -té družici v čase t a šíření signálu rychlostí světla c platí

$$d_i(t) = c \cdot \tau_i(t). \quad (2.7)$$

Pokud jsou známy souřadnice n viditelných družic v pravouhlé soustavě x, y, z pevně spojené se Zemí, například jako polohový vektor

$$r_i = (x_i, y_i, z_i), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.8)$$

je poloha přijímače v čase t řešitelná jako soustava rovnic

$$c \cdot \tau_i(t) = \sqrt{(r(t) - r_i \cdot (t - \tau_i))^T (r(t) - r_i \cdot (t - \tau_i))}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.9)$$

kde T je operace transpozice a $r = (x, y, z)$ je polohový vektor přijímače. Protože vektor polohy má tři prvky, obsahuje soustava teoreticky tři rovnice a je tak nutné provést měření ke třem družicím.

Přijímač musí být tedy především schopen co nejpřesněji určit zpoždění signálu. Tento problém by byl jednoduše řešitelný v případě, že by časové základny družice a přijímače byly synchronní. Toho však nelze docílit a proto se předpokládá neznámá odchylka časové základny přijímače Δt , jejíž vzdálenost lze vyjádřit jako

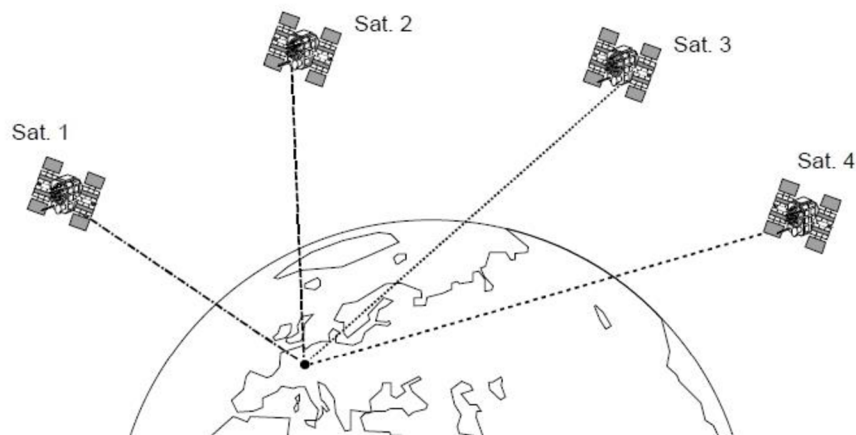
$$b = c \cdot \Delta t. \quad (2.10)$$

V důsledku toho je nutné upravit soustavu rovnic (2.9) na tvar

$$D_i = \sqrt{(r(t) - r_i \cdot (t - \tau_i))^T (r(t) - r_i \cdot (t - \tau_i))} + b(t), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.11)$$

kde D_i je zdánlivá vzdálenost (také pseudovzdálenost) k i -té družici a soustava musí obsahovat čtyři rovnice. Praktické měření tak ve skutečnosti musí probíhat minimálně ke čtyřem viditelným družicím

podle obrázku 2.4. Ve skutečnosti se tedy neurčuje pozice z reálné vzdálenosti, která je neznámá, ale ze zdánlivé vzdálenosti. Zdánlivá vzdálenost v sobě zahrnuje odchylky způsobené chybami určení času, vlivu atmosféry na šíření signálu a dalšími. Protože přijímač je schopen přijmu signálu od obecně n družic, je v praxi použit výpočet se soustavou n rovnic, řešitelné pomocí metod nejmenších čtverců a podobných.



Obrázek 2.4: Princip dálkoměrné metody [6].

Výsledkem řešení jsou polohové souřadnice přijímače v pravouhlé soustavě ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed). S takovými souřadnicemi se v praxi příliš nepracuje a spíše se přepočítávají na hodnoty LLA (Latitude, Longitude, Altitude) zeměpisné geodetické šířky ϕ , zeměpisné geodetické délky λ a elipsoidické výšky H , které se vztahují k referenční ploše aproximující tvar planety (viz obrázek 2.5). Vztah mezi pravouhlou soustavou x, y, z a geodetickými souřadnicemi je dán rovnicemi [5]

$$x = (N + H) \cos(\phi) \cos(\lambda), \quad (2.12)$$

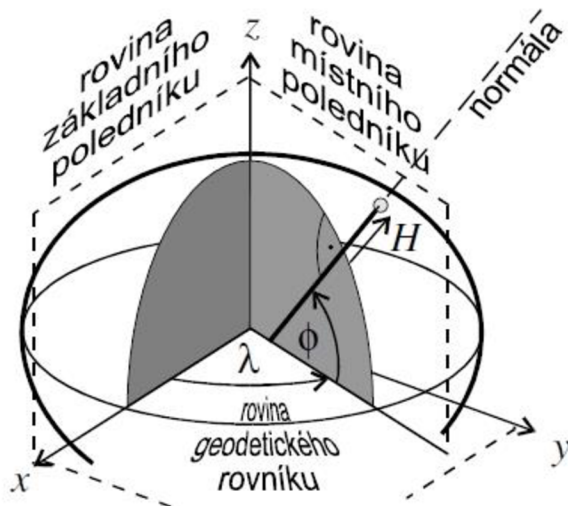
$$y = (N + H) \cos(\phi) \sin(\lambda), \quad (2.13)$$

$$z = (N(1 - e^2) + H) \sin(\phi), \quad (2.14)$$

kde e je excentricita elipsoidu a N je příčný poloměr křivosti

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(\phi)}} \quad (2.15)$$

Nejčastěji používaným referenčním systémem v GPS navigaci je systém WGS-84 (World Geodetic System 1984) aproximující tvar planety jako elipsoidu. Systém WGS-84 definuje konstanty, jako úhlovou rychlost rotace Země, gravitační parametr, velikost hlavní a vedlejší poloosy elipsoidu a převrácenou hodnotu zploštění.



Obrázek 2.5: Geodetické souřadnice [2].

2.2 Chyby měření

V systému GPS lze identifikovat zdroje, které vnášejí do postupu určování polohy chyby. Přibližný vliv zdrojů těchto chyb (jejich směrodatných odchylek) na určení zdánlivé vzdálenosti je podle [1] v tabulce 2.1. Tato kapitola se bude dále věnovat popisu těch, které mají v teorii diferenciální GPS význam. Chyba vyjádřená v ekvivalentu zdánlivé vzdálenosti se nazývá UERE (User Equivalent Range Error). Celková chyba uvedená na konci tabulky představuje kvadratický průměr všech předchozích chyb. Zdánlivé vzdálenosti jsou určovány na základě přenosu signálu šířeného přibližně rychlostí světla a teprve následně se z těchto vzdáleností určuje výsledná poloha přijímače. Vlivy zanesené chybami se tak v průběhu výpočtů mohou kumulovat.

Zdroj chyby	Velikost odchylky (kód C/A) [m]
Chyby časové základny družice	1,1
Predikce rušení družice	0,3
Predikce efemerid	0,8
Ionosférická refrakce	7,0
Troposférická refrakce	0,2
Šum a rozlišovací schopnost přijímače	0,1
Vícecestné šíření signálu	0,2
Jiný	1,9
Celkem (UERE)	7,1

Tabulka 2.1: Vliv zdrojů chyb na zdánlivé vzdálenosti.

Chyby způsobené uvedenými zdroji lze pro názornost rozdělit do dvou skupin. Pokud na ně nemá vliv samotný přijímač, jedná se o takzvané závislé chyby, mezi které patří:

- Chyby časové základny družice
- Chyby predikce efemerid
- Ionosférická a troposférická refrakce

V případě vlivu přijímače se jedná o chyby nezávislé:

- Šum a rozlišovací schopnost přijímače
- Vícecestné šíření signálu
- Nepřesnost výpočtů

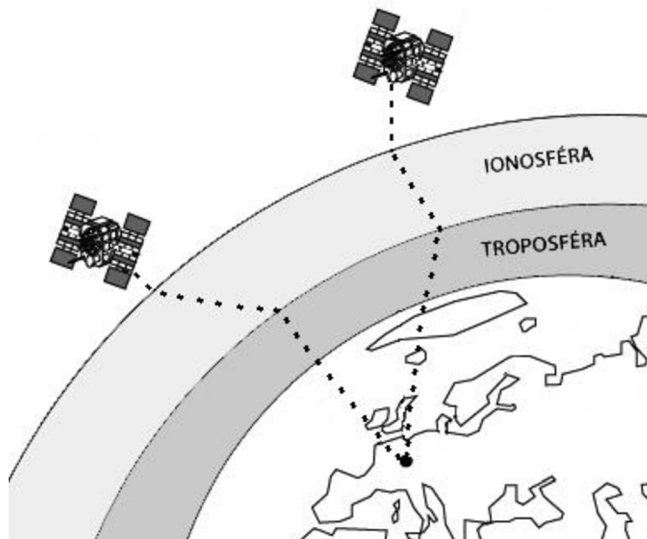
2.2.1 Nezávislé chyby

Nezávislé chyby lze eliminovat nebo minimalizovat v systému. Například vhodně zvoleným přijímačem s co nejlepšími parametry nebo umístěním přijímače v místech, kde se omezí možnosti vícestného šíření signálu představujícího signál od družic odražený od okolních předmětů.

2.2.2 Závislé chyby

Zajímavé z pohledu diferenciální GPS jsou chyby závislé. Jejich vliv je obtížně potlačitelný v systému předpokládající jediný přijímač, neboť vznikají na straně družic a průchodem signálu atmosférou a k přijímači dorazí signál zatížený chybami, jejichž aktuální velikost není jednoduché určit. Postupy používané k minimalizaci vlivu chyb v systému s jediným přijímačem jsou popsány v následující kapitole 2.2.3. Přesto tyto postupy nedosahují takového zpřesnění jako DGPS.

K ionosférické a troposférické refrakci dochází ve vrstvách atmosféry a má vliv na zpoždění signálu, jak je znázorněno na obrázku 2.6. Navíc velikost chyby je závislá na úhlu dopadu signálu do vrstvy (elevace družice), v případě ionosféry také na koncentraci volných elektronů v oblasti průchodu signálu. O vlastnostech ionosféry a jejím vlivu na šíření signálů pojednává například [7]. U troposféry je chyba ovlivněna množstvím vody v ovzduší a je proto časově proměnná v závislosti na denní době a vývoji počasí v oblasti měření. Koeficienty troposférického modelu nejsou šířeny v navigačních zprávách družic, protože se značně liší podle oblasti měření. Pokud mají být zohledněny ve výpočtech, je nutné získat je jiným způsobem, například z lokální meteorologické stanice nebo použít průměrné meteorologické parametry [1].



Obrázek 2.6: Průchod signálu atmosférou.

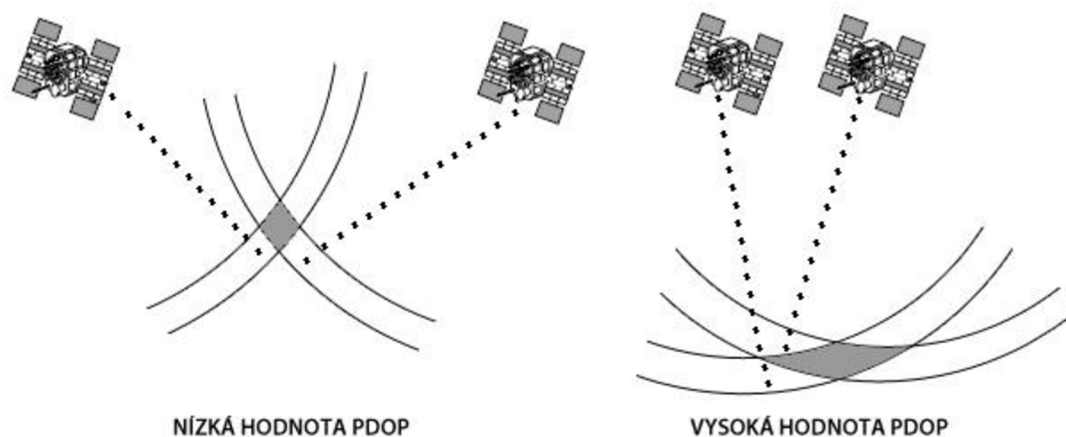
Zdrojem chyby, který doposud nebyl zmíněn, ale ovlivňuje poměrně zásadně přesnost určování polohy, je rozmístění družic na obloze v čase měření. V 2.1.3 bylo dokázáno, že pro určení polohy je třeba viditelnost minimálně 4 družic. Ideálním stavem jejich rozmístění je situace, kdy je jedna družice v zenitu (přímo nad přijímačem neboli v elevačním úhlu 90°) a zbylé tři pod vertikálním (elevačním) úhlem 20° svírající mezi sebou úhel 120° . Tento stav představuje jejich rovnoměrné rozmístění po celé obloze. Kvalitu geometrického uspořádání pro obecně n družic určuje takzvaný parametr snížení přesnosti DOP (**D**ilution of **P**recision). Čím vyšší je tato hodnota, tím je horší rozmístění družic a znásobují se tak vlivy ostatních chyb na určení přesných souřadnic přijímače. Parametr DOP lze vyjádřit konkrétními parametry snížení přesnosti [6]:

- GDOP (**G**eometric-**DOP**) – popisuje snížení přesnosti na základě pozice v 3D prostoru a měření času
- PDOP (**P**ositional-**DOP**) – popisuje snížení přesnosti na základě pozice v 3D prostoru (viz obrázek 2.7)
- HDOP (**H**orizontal-**DOP**) – popisuje snížení přesnosti na základě pozice v 2D prostoru
- VDOP (**V**ertical-**DOP**) – popisuje snížení přesnosti na základě pozice v 1D prostoru (výška)
- TDOP (**T**ime-**DOP**) – popisuje snížení přesnosti na základě měření času

Z popsaných parametrů lze odvodit vzájemnou závislost parametrů podle vztahů:

$$PDOP = \sqrt{HDOP^2 + VDOP^2} \quad (2.16)$$

$$GDOP = \sqrt{HDOP^2 + VDOP^2 + TDOP^2} \quad (2.17)$$



Obrázek 2.7: Rozmístění družic a parametr PDOP.

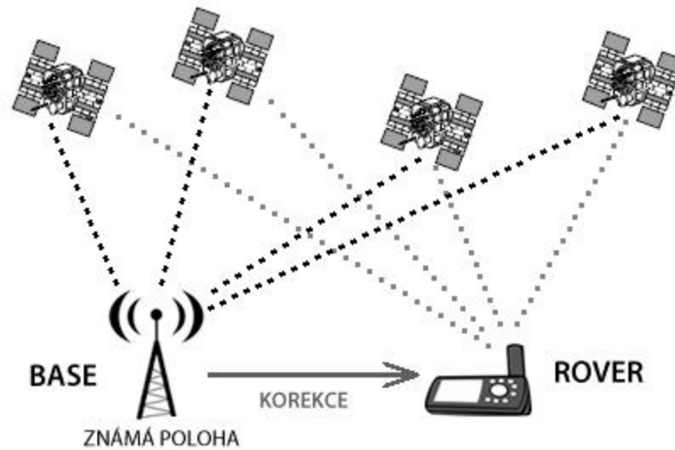
2.2.3 Odstranění chyb

V systému s jediným přijímačem lze vliv chyb minimalizovat především vhodně zvoleným GPS modulem a jeho umístěním. Protože do výpočtu nevstupuje další přijímač, je obtížné odhadovat a eliminovat tyto vlivy působící na přijímač a je tak zásadní brát zřetel na vícecestné šíření signálu v prostoru měření a nezakrytý výhled na satelity v co největším rozsahu. Vliv závislých chyb lze částečně vypočítat z navigačních zpráv jednotlivých satelitů a upravit podle toho zdánlivé vzdálenosti. Tento postup však vyžaduje výstup RAW dat z přijímače a výpočetní stanici, na které se korekce a poloha určí. Korekce je nutné počítat zvlášť pro každý viditelný satelit a druh závislé chyby a výpočet provádět při každé aktualizaci dat. Na základě předchozí vypočítané polohy přijímače je znám úhel elevace, z navigační zprávy koeficienty ionosférického modelu a je možné určit zpoždění signálu v ionosféře. Troposférické parametry pro aktuální čas měření je obtížné zjistit a použití průměrných meteorologických parametrů může zanechat další nepřesnost. Za předpokladu určení obou atmosférických zpoždění signálu a odchylky časové základny družice lze dané hodnoty v sekundách násobit rychlostí šíření signálu (rychlost světla) a získat korekce zdánlivých vzdáleností.

2.3 Princip diferenciatní GPS

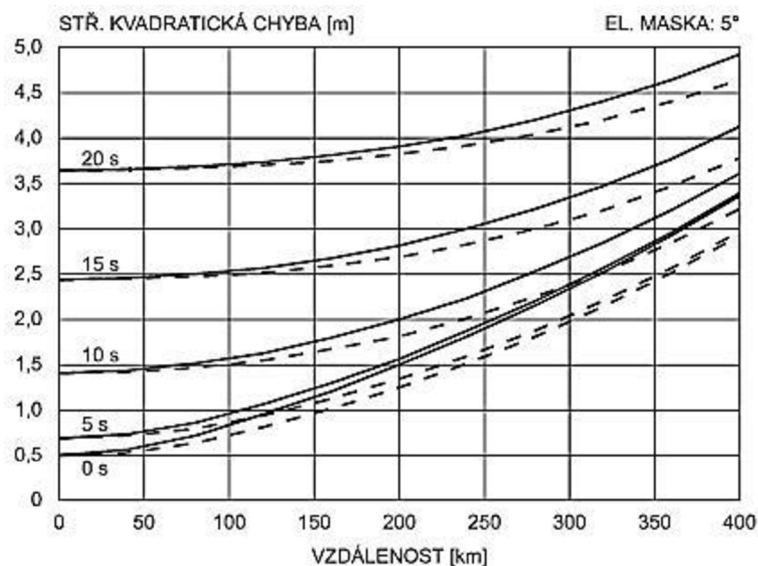
Zvýšení přesnosti klasické GPS lze dosáhnout odstraněním chyb v měření a z principu se tedy jedná o opravy zdánlivých vzdáleností nebo přímo polohových souřadnic. Teorie této kapitoly dále vychází z [1], [2] a [3]. Chyby závislé jsou obtížně potlačitelné v systému s jedním přijímačem, a proto je do prostoru měření umístěn kromě původního přijímače GPS signálu, který bude dále v textu označován jako *rover*, další přijímač. Jeho pozice se předpokládá na bodu se známými a přesně určenými polohovými souřadnicemi a je v průběhu času neměnná. V textu bude tento speciální přijímač dále označován jako *referenční stanice* nebo *base*. Předpokládá se přitom, že oba přijímače jsou při příjmu

signálů zatíženy stejnými závislými chybami a jejich velikostmi. Referenční stanice je schopna porovnat skutečné a aktuálně naměřené polohy a na základě jejich diferencí určit podíl celkových chyb zatěžujících měření v okolí referenční stanice. Vypočítané korekce se přenesou vhodně zvoleným komunikačním kanálem k roveru, který na jejich základě opraví vlastní měření a dosáhne tak zpřesnění své polohy (viz obrázek 2.8).



Obrázek 2.8: Princip diferenciální GPS.

Termínem diferenciální GPS jsou označovány systémy určené především k navigaci, využívající měření zpoždění signálu a provádějící výpočty v reálném čase. Jsou schopny v ideálním případě korekcemi odstranit z výpočtů všechny závislé chyby, které byly popsány v kapitole 2.2.2, protože signály se šíří od družic k oběma přijímačům po téměř shodných drahách.



Obrázek 2.9: Modelová závislost celkové chyby na vzdálenosti od referenční stanice a na stáří korekcí [2].

Se zvětšující se vzdáleností referenční stanice a roveru se dráhy signálů k jednotlivým přijímačům začnou lišit a závislé chyby se začnou znovu projevovat, jako takzvané zbytkové chyby. Růst těchto chyb se vzdáleností tak ovlivňuje maximální vzdálenost mezi referenční stanicí a roverem, kde jsou korekce ještě použitelné. Také stáří korekce dostupné roveru ovlivňuje přesnost diferenciální metody podle obrázku 2.9. Plné čáry v obrázku odpovídají nepříznivým ionosférickým podmínkám, čárkované čáry odpovídají příznivým ionosférickým podmínkám, nadmořská výška referenční stanice i uživatele je 0 metrů, přijímač uživatele má elevační masku 5° .

Ostatní chyby v systému, které nejsou korekcemi ovlivňovány (především nezávislé chyby), určují výslednou přesnost měření a jsou označovány termínem dosažitelná přesnost. Tyto chyby mohou být navíc větší z důvodu dalšího přijímače v systému, avšak nedosahují hodnot závislých chyb. I přesto vykazuje diferenciální GPS větší přesnost v určování pozice, než systém s jediným přijímačem. Výhodou tohoto přístupu je také určení jediné korekce ke každému viditelnému satelitu, která v sobě zahrnuje vliv většiny chyb, zatímco v případě zpřesnění výpočtu v systému s jediným přijímačem je nutné tyto vlivy (ionosféra, troposféra, odchylka časové základny družice) počítat zvlášť a teprve následně agregovat.

2.3.1 Výpočet a přenos korekcí

K výpočtu korekcí na straně referenční stanice je třeba určit korigované údaje. Může se jednat o korekce polohových souřadnic, jejichž výpočet nevyžaduje speciální techniky a je nejjednodušší. K výpočtům se dá použít libovolný přijímač bez speciálního RAW výstupu dat. Stačí výstup polohových souřadnic zeměpisné geodetické šířky ϕ , zeměpisné geodetické délky λ a elipsoidické výšky H a rozdíl jejich odchylek od známých souřadnic je výsledkem korekce. Nevýhodou tohoto přístupu je podmínka příjmu signálu na obou přijímačích od stejných družic, tento přístup se příliš nepoužívá a nebude dále uvažován.

Druhým prakticky používaným způsobem je korekce zdánlivých vzdáleností, na základě kterých se teprve následně poloha vypočítá. K tomu je nutné použití speciálního přijímače na straně referenční stanice a roveru. Výhodou řešení je určení korekcí ke všem viditelným družicím a odpadá tak problém výběru stejných družic, jako v případě korekcí polohových souřadnic.

Za předpokladu výpočtu korekcí zdánlivých vzdáleností se vychází z teorie v 2.1.3. Určení zdánlivé vzdálenosti je totiž v obecném principu n -rozměrná úloha, vyžadující navíc přesné určení času na straně referenční stanice, aby bylo korektně určeno zpoždění signálu od družic.

Referenční stanice zajišťuje přesnou polohu stanice v rámci prostoru i času. Dosazením této polohy v čase měření do rovnice 2.9 je pro každou viditelnou družici spočítána skutečná vzdálenost. Referenční stanice obdrží změřenou zdánlivou vzdálenost a korekci k i -té družici jednoduše určí jako

$$C_i(t) = \hat{d}_{Ri}(t) - d_{Ri}(t), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.18)$$

kde n je počet viditelných družic, $d_R(t)$ je vypočtená skutečná vzdálenost a $\hat{d}_R(t)$ je vzdálenost vypočtená na základě přijatého signálu (vypočítaná přijímačem). Aby bylo možné aplikovat korekci na straně roveru i v čase mírně odlišném od času určení korekce, je vysílána i její derivace $C_i'(t)$. Platnost korekce by měla být maximálně několik vteřin, poté by mělo dojít k výpočtu nové hodnoty, aby rover nezahrnoval do výpočtu neaktuální a potenciálně chybné korekce. Souhrně se všechny korekce určené v jednom čase pro všechny viditelné družice označují jako sada korekcí. Přenos korekcí může probíhat s využitím bezdrátových technologií nebo přímým propojením stanic.

2.3.2 Příjem a zpracování korekcí

Sada korekcí určená v časovém okamžiku t_R se musí použít na opravu měření v roveru a k přenosu musí být tedy zvolena vhodná přenosová technika. Rover musí být podle toho vybaven samostatným vstupem korekcí podporujícím zvolenou techniku přenosu. Pokud není příjem korekcí podporován nebo není bezpodmínečně nutný, je dalším používaným způsobem zpracování dat od referenční stanice i roveru na další výpočetní stanici zapojené v systému. Výpočetní stanice přijímá od referenční stanice sady korekcí a od roveru změřené zdánlivé vzdálenosti. Zpracování korekcí, jejich použití na měření roveru a určení jeho zpřesněné polohy probíhá na tomto místě a v případě potřeby je možné volit mezi zpracováním v reálném čase nebo post-processingem. Výstupem mohou být soubory dat o poloze roveru nebo zobrazení polohy v čase na mapovém podkladu v programu.

Sada korekcí $C_i(t)$ a jejich derivací $C_i'(t)$ ke všem n viditelným družicím v čase měření t_R , kde $i = 1 \dots n$, se tedy aplikuje na změřené zdánlivé vzdálenosti roveru [2]. Protože čas určení zdánlivých vzdáleností může být mírně odlišný od času určení korekcí, je nejprve každá korekce extrapolována do času měření podle vztahu

$$\hat{C}_i(t) = C_i(t_R) - (t - t_R) \cdot C_i'(t_R), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.19)$$

kde t je čas měření roveru a t_R čas měření referenční stanice a upravené hodnoty korekcí se aplikují na zdánlivé vzdálenosti

$$D_{Ci}(t) = D_i(t) + \hat{C}_i(t), \quad i = 1 \dots n. \quad (2.20)$$

Na základě zpřesněných měření se určí poloha roveru a postup výpočtů a použití korekcí se opakuje pro nové časy a hodnoty měření.

3 Návrh vlastního řešení

Na základě principů klasické a diferenciální GPS a požadavku na zpracování dat v reálném čase byl navržen algoritmus popsáný v této kapitole. V rámci eliminace nezávislých chyb bylo třeba uvažovat co nejpřesnější GPS moduly s výstupy RAW dat, která se budou moci využít k výpočtům. Standardní NMEA formát zpráv [8], který poskytují běžné GPS přijímače, většinou obsahuje zpracovaná data (například výsledná poloha GPS modulu), která jsou pro výpočet diferencí nevhodná.

Referenční stanice dostane zadanou svoji přesnou polohu nebo se jí na základě časové observace pokusí zjistit. Na stanici provádějící výpočty dat jsou odeslány informace o efemeridách všech družic a pro všechny viditelné družice jsou vypočítány jejich polohy. Referenční stanice zároveň počítá a odesílá ke zpracování zdánlivé vzdálenosti k těmto družicím. Na základě známé polohy referenční stanice a družic se vypočítají skutečné vzdálenosti a porovnají se se zdánlivými vzdálenostmi určenými GPS modulem. Rozdíly vytváří sadu korekcí, obsahující samostatnou opravu pro každou viditelnou družici. Aby nemusely být určovány i derivace korekcí kvůli aplikaci na mírně odlišné časy, jsou komunikující moduly synchronizovány a provádějí výpočty ve stejném čase. Také platnost korekcí je stanovena do okamžiku provedení dalšího měření. Zapouzdření dat do struktur umožňuje označit korekce a data tak, aby nebyly použity v případě chybné družice, jejich dat nebo změně efemerid, vyžadující přepočítání polohy družic.

Rover odesílá na stanici změřené zdánlivé vzdálenosti, na které se aplikují korekce, následuje výpočet polohy roveru s opraveným měřením. K výpočtu polohy se však použijí pouze družice s nejlepšími hodnotami pro měření (rozmístění na obloze, síla signálu) a dostupnými korekcemi, čímž se zajistí přesné určení polohy. Takto navržený algoritmus zachovává principy diferenciální GPS, zároveň však optimalizuje výpočty dat a měl by zajišťovat zpřesněné určení polohy.

3.1 GPS moduly

K praktické implementaci diferenciální GPS se jako nejvhodnější přijímač pro referenční stanici i rover jeví modul od firmy u-blox s čipy LEA-6T-1. Modul referenční stanice i roveru je v podobě vývojového kitu EVK-6T na obrázku 3.1. Vývojový kit obsahuje aktivní externí anténu ANN-MS-0-005, vyhodnocovací software uBlox Center, USB kabel a desku s integrovaným GPS čipem v pouzdře. Moduly jsou určeny pro přesné určování polohy právě v diferenciálních navigačních a časových aplikacích.

Technické parametry [11]:

Frekvence:	GPS L1 C/A kód (1575,42 MHz)
Počet kanálů:	50
Rychlost aktualizace:	2 Hz
Přesnost:	2,5 m CEP
Zaměření:	26 s (bez almanachu a efemerid) 1 s (almanach bez efemerid) 1 s (almanach a efemeridy)
Citlivost:	-162 dBm
Přesnost času:	15 ns
Protokoly:	NMEA, UBX binary, RTCM
Rozhraní:	UART, USB 2.0 full speed, DDC, SPI



Obrázek 3.1: Vývojový kit EVK-6T [9].

Modul splňuje všechny kladené požadavky. Protokol UBX binary obsahuje RAW data z přijímače vhodná ke zpracování a jejich popis je v následující kapitole. Rozhraní USB umožňuje připojení obou modulů k výpočetní stanici a přesnost času, polohy i rychlost aktualizace zpráv je navíc k účelům výpočtů dostačující.

3.1.1 UBX protokol

Protokol UBX poskytuje nezpracovaná data v binární podobě, která přijímač získává z navigačních zpráv z družic nebo je částečně zpracovává a následně posílá protokolem formou paketů s předepsanou strukturou (viz obrázek 3.2). Zpráva začíná synchronizačními bajty $0xB5$ $0x62$, pole class definuje třídu zprávy podle obsažených informací, ID definuje přesný typ zprávy v rámci třídy, length obsahuje velikost dat v paketu, následují samotná data a paket končí kontrolním součtem

CK_A a CK_B. Hodnoty složené z více bytů jsou řazeny způsobem Little Endian a kontrolní součet využívá 8-bitový Fletcher Algoritmus podle [10].



Obrázek 3.2: Struktura paketu UBX protokolu [12].

Přesně daný formát zpráv usnadňuje získávání dat z binární kombinace, která představuje samotnou zprávu odeslanou na výpočetní stanici. Programově tak bude získávání dat realizováno analyzátozem přijatých zpráv a rozdělením paketu podle specifikace [12].

Pro účely algoritmu budou použity zprávy AID-EPH, NAV-POSECEF, NAV-SVINFO a RXM-RAW.

Zprávy typu AID-EPH obsahují data efemerid a jsou zasílána na vyžádání, což znamená nutnost komunikace s modulem a posláni předdefinované žádosti. Žádosti mají stejný tvar jako výstupní zprávy, to znamená stejné hlavičky, ale neobsahují žádná data. Ve zprávě je tedy délka dat nulová a končí ihned kontrolním součtem. Oproti ostatním použitým zprávám nejsou data efemerid předzpracována modulem a ve zprávě jsou odesílána data zapouzdřená v podobě podrámčů podle oficiálního dokumentu [13].

Zprávy NAV-POSECEF, NAV-SVINFO a RXM-RAW lze zasílat na vyžádání nebo periodicky. Periodické zasílání je v tomto případě výhodnější a odpadá režie komunikace s žádostí o zaslání. Zpráva NAV-POSECEF zahrnuje data o pozici přijímače v pravoúhlé soustavě. Tato data počítá samotný přijímač svým vlastním optimalizovaným algoritmem. NAV-SVINFO obsahuje informace o viditelných družicích, síle signálu a jejich azimutu a elevaci na základě předchozí automaticky vypočítané polohy přijímače. K diferenčním výpočtům slouží zdánlivé vzdálenosti prMes z obsahu RXM-RAW.

3.2 Funkce výpočetní stanice

V systému navržené diferenciální GPS figurují celkem tři zařízení. Dva přijímače představují referenční stanici a rover, které odesílají každou 1 sekundu data ke zpracování výpočetní stanici jako třetímu zařízení. Ze strany referenční stanice jsou očekávány periodicky se opakující hodnoty zdánlivých vzdáleností ke všem viditelným družicím ve formátu RXM-RAW. O data efemerid ve zprávě AID-EPH je žádáno ihned po inicializaci a následně periodicky každých 10 s, aby byla jejich data neustále aktuální. Korekce se vypočítávají podle rovnic pro referenční stanici uvedených v 2.3.1. Podle vztahů v kapitole 2.1.1 pro výpočet polohy družic se určí jejich souřadnice v pravoúhlé soustavě x_s, y_s, z_s . K výpočtu souřadnic v čase odeslání signálu je třeba od času příjmu signálu

odečíst čas přenosu signálu $\tau_i(t)$. Ten není znám a určí se z hodnoty přijaté zdánlivé vzdálenosti dělené rychlostí přenosu signálu

$$\tau_i(t) = \frac{\hat{d}_{Ri}}{c}. \quad (3.1)$$

Jsou známy také souřadnice referenční stanice x_b, y_b, z_b a dle vzorce pro vzdálenost dvou bodů v prostoru

$$d_{Ri} = \sqrt{(x_r - x_s)^2 + (y_r - y_s)^2 + (z_r - z_s)^2}, \quad (3.2)$$

je dopočítána reálná vzdálenost mezi base a každou z viditelných družic.

Formát zapouzdřených dat vypadá tak, že každá korekce a informace o pozici družice pro každou i -tou družici je vložena do struktury obsahující číslo družice, pro kterou je korekce vypočítána. Takto zapouzdřené korekce jsou dále vloženy do struktury reprezentující sadu korekcí, která obsahuje čas určení korekcí.

Rover odesílá periodicky na výpočetní stanici hodnoty zdánlivých vzdáleností ke všem viditelným družicím ve zprávách RXM-RAW. Periodicky jsou zjišťovány informace o družicích. Data jsou tak zapouzdřována podobně jako v případě referenční stanice. Zdánlivé vzdálenosti jsou zapouzdřeny s číslem odpovídající družice a celá kolekce zapouzdřena s časem určení vzdáleností.

Výpočetní stanice na základě aktuálně přijatých dat roveru vybere n družic splňujících minimální úhel elevace 10° a síly signálu 10 dBHz (podle experimentů v kapitole 5.3) a aplikuje na jejich zdánlivé vzdálenosti ty korekce z aktuálně platné sady korekcí určené referenční stanicí, které přísluší vybraným družicím. Do výpočtu nejsou zahrnuty družice viditelné pouze jedním z přijímačů v systému. Vznikne soustava n lineárních rovnic o 4 neznámých. Na základě podmínky maximální vzdálenosti roveru a base pro použitelnost korekcí se předpokládá shodná viditelnost většiny družic a nekorigované vzdálenosti mohou do výpočtu polohy zanést chybu určení polohy přijímače, především pak s přihlédnutím na zvolenou metodu řešení. Pro řešení soustavy byla zvolena metoda nejmenších čtverců. Dalším možným řešením vyžadujícím znalost modelu pohybu přijímače je například Kalmanova filtrace a její varianty [14].

3.2.1 Metoda nejmenších čtverců

Navržený algoritmus řešení soustavy rovnic metodou nejmenších čtverců vychází z [5] a očekává na vstupu strukturu s těmito daty:

- Korigované zdánlivé vzdálenosti k viditelným družicím
- Pozici v pravouhlé soustavě souřadnic pro každou viditelnou družici
- Inicializační pozici přijímače

Na základě vstupních dat je naplněna matice koeficientů

$$A = \begin{pmatrix} \frac{x_{r1} - x_{s1}}{d_{R1}} & \frac{y_{r1} - y_{s1}}{d_{R1}} & \frac{z_{r1} - z_{s1}}{d_{R1}} & c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_{rn} - x_{sn}}{d_{Rn}} & \frac{y_{rn} - y_{sn}}{d_{Rn}} & \frac{z_{rn} - z_{sn}}{d_{Rn}} & c \end{pmatrix}, \quad (3.3)$$

kde c je konstanta rychlosti světla a vztah pro řešení soustavy rovnic lze zapsat

$$V = L - AX \quad (3.4)$$

kde L je vektor měřených vzdáleností, X neznámý vektor parametrů obsahující pozici a opravu času, V je reziduální (rozdílový) vektor. V dalším textu představuje operátor T operaci maticové transpozice a operátor -1 operaci maticové inverze. Kritérium pro řešení rovnic je

$$V^T V = \min. \quad (3.5)$$

Funkce F pro výpočet vektoru X a vektoru V má tvar

$$F = V^T V \quad (3.6)$$

a dosahuje minimální hodnoty, pokud platí

$$A^T V = 0. \quad (3.7)$$

Vynásobením A^T s rovnicí 3.4 vznikne vztah

$$A^T A X - A^T L = -A^T V, \quad (3.8)$$

který má při zohlednění podmínky pro funkci F tvar

$$A^T A X - A^T L = 0. \quad (3.9)$$

Pro zjednodušení necht' je matice M normální maticí a platí

$$M = A^T A, Q = M^{-1}, \quad (3.10)$$

pak celkové řešení pro vektor X neznámých parametrů je rovno

$$X = Q(A^T L). \quad (3.11)$$

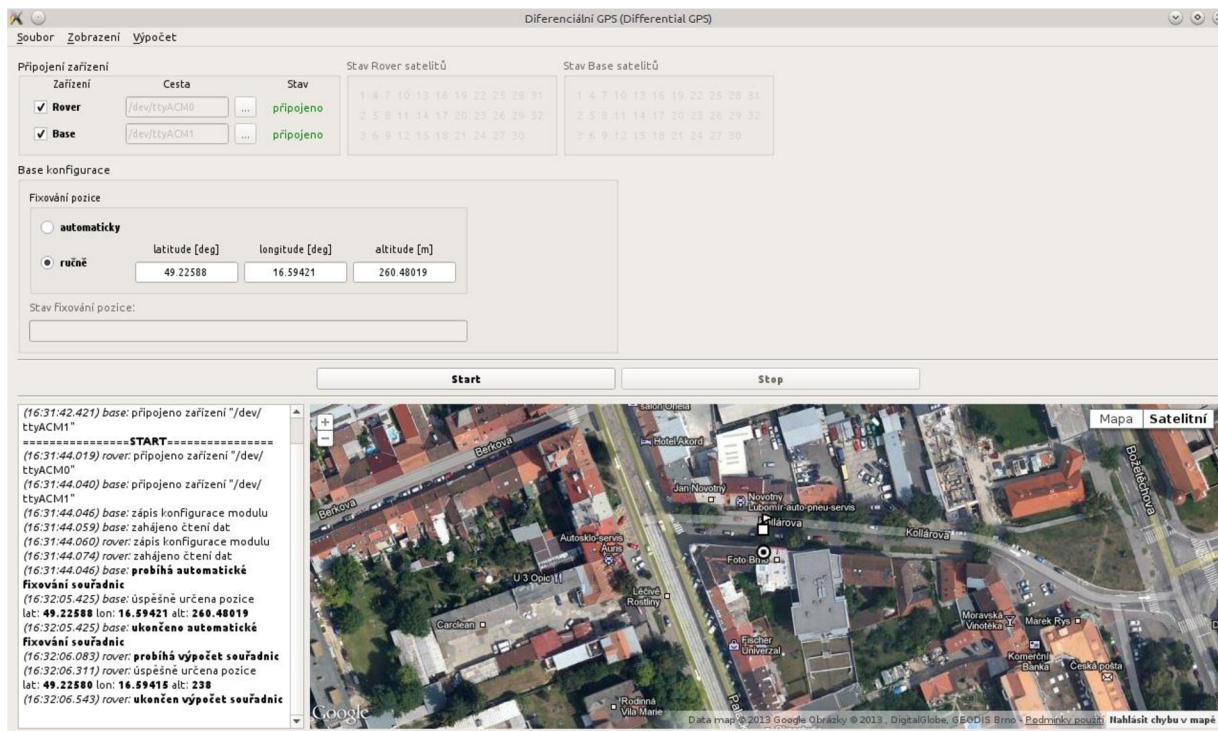
Výsledný vektor obsahuje řešení přírůstků dx, dY, dZ souřadnic přijímače a časové chyby. Algoritmus pracuje iteračně a porovnává rozdíl předchozího a současného výsledku přírůstku polohy. Celý výpočet se opakuje, dokud je rozdíl větší než stanovená minimální mez přesnosti nebo nebyl překročen maximální počet iterací (viz kapitola 5.2).

4 Implementace

Kapitola implementace popisuje praktickou realizaci principů a navržených postupů v systému GPS využívající odstranění chyb výpočtu polohy metodou diferenciální GPS. K demonstraci výsledků byla vytvořena grafická aplikace v programovacím objektově orientovaném jazyce C++ s využitím knihovny Qt verze 5.0.1. Vývoj probíhal pod operačním systémem Kubuntu 11.10, ve vývojovém prostředí Qt Creator verze 2.6.2.

4.1 Grafické uživatelské rozhraní

Rozhraní aplikace je na obrázku 4.1 a je rozděleno na část určenou pro interakci s uživatelem a část zobrazovací a informační. Hlavní menu aplikace umožňuje alternativně ukončit program, spustit a zastavit výpočet polohy a smazat všechny body na mapě.



Obrázek 4.1: Grafické rozhraní aplikace.

Box *Připojení zařízení*, který slouží k připojení GPS modulů EVK-6T. Moduly se připojují k výpočetní stanici pomocí sběrnice USB a jejich soubory zařízení jsou očekávány v adresáři `/dev` operačního systému. První připojený modul je identifikován jako zařízení s výchozí cestou `/dev/ttyACM0` a představuje modul roveru. Druhý připojený modul má výchozí cestu `/dev/ttyACM1` a představuje modul base. S ohledem na možné specifické nastavení má uživatel možnost změnit cestu k zařízení ručně nebo v dialogovém okně. Dialogové okno však s ohledem na

přístupová oprávnění programu nemusí zobrazit všechna aktuálně připojená zařízení. Stav zařízení informuje o aktuálním stavu připojení zařízení.

Base konfigurace umožňuje volit způsob fixování pozice pro referenční stanici. Protože známá a přesně určená pozice stanice je předpokladem pro úspěšné určení diferencí pro korekce, je vhodnější manuální vložení přesných polohových souřadnic zeměpisné šířky, délky a výšky. Tyto souřadnice mohou být známé na bodech geodetických měření nebo na základě dlouhodobé observace. Volba automatické konfigurace spustí algoritmus běžící v samostatném vlákně, který na základě několika předchozích měření splňujících podmínku minimální přesnosti určení polohy v metrech určí souřadnice přijímače. Počítá se přitom s polohovými daty zpracovanými samotným přijímačem a vysílanými ve zprávě NAV-ECEF. Po úspěšném zafixování jsou souřadnice vloženy do polí manuálního módu.

Tlačítka *Start* a *Stop* spouštějí, respektive zastavují provádění všech výpočtů v samostatném vlákně. Jedná se o komunikaci s moduly, zápis jejich konfigurací a zpracování přijatých dat. Dále výpočty těchto dat v podobě určování korekcí a pozic těles v systému GPS v rámci postupů z předchozích kapitol. Tlačítko *Start* je povoleno při úspěšném připojení obou zařízení a zafixování pozice referenční stanice.

Zobrazovací část aplikace představuje mapový podklad Google Maps pro zobrazení bodů base a roveru. Jedná se o webový rám, který umožňuje zobrazit webovou stránku v rozhraní programu. Rám obsahuje plnohodnotné mapy se všemi ovládacími prvky a je plně interaktivní (přiblížení, typ mapy). Při spuštění programu je nastaveno satelitní zobrazení nad oblast České republiky. V okamžiku, kdy je určena poloha base, program změní hodnotu přiblížení na úroveň zobrazení ulic a centruje mapu na tento bod označený čtvercem. Při každém úspěšném určení polohy roveru je podobně vložen bod označený kolečkem a je na něj centrováno.

O provedených akcích uživatele a průběhu výpočtů informuje textové okno vlevo od mapy. Zpráva obsahuje časovou značku o svém vzniku, název zařízení k ní příslušejícímu (rover nebo base) a text. Zprávy informují o:

- Připojení/odpojení zařízení
- Zápisu konfigurace do zařízení
- Zahájení čtení dat zařízení
- Zahájení/ukončení fixování pozice base
- Zahájení/ukončení výpočtu souřadnic roveru
- Úspěšným/neúspěšným určení polohy roveru

Boxy *Stav Rover satelitů* a *Stav Base satelitů* obsahují čísla družic 1-32 a při spuštěné komunikaci s moduly zobrazují jejich stav pro tato zařízení. Obnovování je prováděno synchronně s novým výpočtem polohy roveru. Pokud datová struktura pro danou družici obsahuje všechna potřebná data k výpočtu, je číslo družice zeleně podbarveno.

4.2 Popis tříd

V následujícím textu budou prezentovány funkce hlavních tříd programu, které tvoří funkční celek aplikace.

4.2.1 MainWindow

Třída hlavního okna aplikace a zároveň nadřazená třída. Vytváří ostatní třídy a volá jejich metody na základě uživatelských akcí v grafickém rozhraní, stejně jako přijímá stav a výpočty podřízených tříd. Knihovna Qt poskytuje pro tento účel takzvaný mechanismus signálů a slotů. Třída deklaruje množinu signálů, které při splnění určité podmínky emituje. Signály se šíří hierarchií tříd a jsou zpracovány slotem propojeným se signálem pomocí funkce `connect()`. Slot pak provede kód definovaný uvnitř svého těla.

4.2.2 DeviceCommunication

Připojení a komunikaci s GPS moduly, jako čtení a zpracování přijatých dat a zápis jejich konfigurace zapouzdřuje tato třída. Její konstruktor vyžaduje při volání nastavenou pravdivostní hodnotu `boolStation`, která vyjadřuje příslušnost objektu této třídy k zařízení typu base nebo rover. Pro komunikaci přes sériový port třída využívá externí knihovnu `QextSerialPort` pod licenci MIT [16]. V případě dostupných dat ke čtení na portu je emitován signál `readyRead()` a obsah je v metodě `onDataAvailable()` dále zpracován metodami třídy `Messages`, určenými pro práci s binárními daty protokolu UBX. Data jsou po zpracování dostupná v datových třídách `Satellites` a `Receiver` deklarovaných v souboru `GPS_System.h`. Zápis do modulů je vyžadován pouze v případě nastavení jejich konfigurace a při žádostech o data efemerid a vytvoření zprávy je opět v režii metod třídy `Messages`.

4.2.3 ErrorDialog

Třída chybového okna aplikace. Když hlavní okno nebo jiný třída emituje chybovou zprávu, je vytvořen dialog v modálním okně s textem chyby. Protože má dialog sloužit k zobrazení pouze vážných chyb a upozornění, je použit jen v případě neúspěšného připojení nebo komunikace s GPS zařízením.

4.2.4 GoogleMapsAPI

Mapové podklady ve webovém rámu aplikace jsou ovládány přes Google Maps JavaScript API verze 3 [17]. Webový rám třídy `MainWindow` implementovaný grafickým prvkem `QWebView` umožňuje metodou `evaluateJavaScript()` provádět zapsaný JavaScript kód a v kombinaci s funkcemi

poskytovanými API rozhraním map je možné vkládat body a měnit pohled na mapu. Metoda `newMap()` vytvoří novou mapu. Metodě je třeba předat API klíč vygenerovaný službou Google na stránkách API rozhraní, výchozí umístění v zeměpisných souřadnicích, typ mapy (hybridní, terénní...) a hodnotu výchozího přiblížení mapy. Všechny metody pak shodně vytvářejí text v syntaxi jazyka JavaScript a po zpracování a doplnění o předané parametry ho vrací jako návratovou hodnotu určenou k vložení do parametrů metody `evaluateJavaScript()`. Vkládání bodů rover a base je v metodách `addRoverPosition()` respektive `addBasePosition()` a liší se vloženou ikonou na mapový podklad. Při volání je centrováno na přidávaný bod, a pokud je hodnota přiblížení větší než nastavené maximum, je přiblíženo na úroveň viditelnosti ulic.

4.2.5 ProcessingUnit

Třída výpočtů polohy vytvářející nezávislé vlákno. Je vytvořeno a spuštěno metodou `start()` nadřazené třídy `MainWindow`. Při svém spuštění deklaruje a inicializuje potřebné datové typy a čeká na zafixování pozice base. Poté výpočet iteruje v nekonečné smyčce ukončené pouze nastavením pravdivostní proměnné `stopped` s opakováním přibližně každých 200 ms. Pokud nejsou v daném časovém okamžiku zpracovávána data z připojených zařízení a od posledního výpočtu byla data aktualizována, pak algoritmus pokračuje dále. V opačném případě se proces uspí a kontrola pokračuje znovu stejně po jeho probuzení. K zjištění aktuálního zpracovávání slouží prostředek mezi-procesové komunikace `mutex`, v aplikaci implementovaný třídou `QMutex`, který umožňuje uzamčení provádění části kódu, pokud je v dané části jiný proces. Tento prostředek je sdílen s objektem třídy `DeviceCommunication` pro base a rover.

Jestliže metody třídy `Messages` zpracovaly přijatá data a naplnily předané datové třídy, algoritmus dále prochází data všech satelitů a přijímačů a podle očekávané funkce výpočetní stanice v kapitole 3.2 s nimi počítá aktuální polohu roveru v aktuálním čase. V případě úspěšného výsledku výpočtu je poloha zanesena do mapového podkladu. Každých 10 sekund je požádáno o zaslání nových dat efemerid, aby byla stále aktuální. Před koncem smyčky a usmáním procesu je provedena kontrola připojení všech zařízení a v případě negativního výsledku je vlákno ukončeno.

4.2.6 Messages

Tato třída vytváří a zpracovává zprávy podle specifikace UBX protokolu uvedené v kapitole 3.1.1 a nezpracovaná binární data odeslaná z GPS modulů rozděljuje do zpráv. Data jsou ukládána do datové struktury `QByteArray` představující bytové pole. Bytové pole v případě čtení dat na portu umožňuje iterovat po jednotlivých bytech a kontrolovat validní formát zprávy. Zprávy mohou být také přijaty v jednom bloku dat a je třeba ho rozdělit. Je hledána pevně definovaná hlavička zprávy `0xB5 0x62` a po ní následující údaje o třídě a typu zprávy a délce obsažených dat, poté následuje

kontrolní součet. Po dosažení konce kontrolního součtu je blok dat zkopírován do nové datové struktury a označen za zprávu, následuje zpracování zbytku bloku dat.

Třída obsahuje funkce, které jako parametr přijímají bytové pole zprávy a jednu z datových tříd deklarovaných v souboru `GPS_System.h`. Pak taková funkce iteruje polem zprávy a na přesně definovaných pozicích podle třídy a typu čte hodnoty reprezentující informace z GPS zařízení. Tyto hodnoty mohou být podle specifikace ještě násobeny nebo děleny do požadovaného rozsahu. Ke čtení různých datových typů jsou implementovány k tomu určené funkce, například pro čtení `signed short` hodnoty je to funkce `read_I2()`. Hodnoty vyžadující více bytů ve formátu Little Endian jsou do standardních datových typů zapsány pomocí bitových operátorů posunu, součinu a součtu. V rámci třídy jsou zachována pojmenování datových typů podle specifikace protokolu: U1 (`unsigned char`), U2 (`unsigned short int`), U4 (`unsigned int`), I1 (`signed char`), I2 (`signed short int`), I4 (`signed int`), R4 (`float`), R5 (`double`).

4.2.7 GPS_system

Nejedná se o samostatnou třídu, ale o množinu datových tříd, nahrazujících datové struktury a obsahující metody pro čtení, inicializaci a vkládání svých vnitřních datových proměnných. Každá třída je pojmenována podle dat, která uchovává, například `recPosition`, `RAW`, `Sattelite` a podobně. Obsahují shodně metodu `init()`, která nastavuje vnitřní proměnné do výchozí hodnoty (obvykle do nuly) a maže příznak modifikace `isSet`. K příznaku modifikace se váže metoda `isSet()` vracející pravdivostní hodnotu nastavení proměnných objektu třídy. Nastavení proměnných provádí metody `setX_Data()`, kde X je obvykle název třídy nebo typ vkládaných dat, například `setRaw_Data()` nebo `setPositionECEF_Data()`.

4.2.8 GPS_functions

Třída obsahuje statické metody implementující funkce používané v systému GPS. Metoda `receiverPos()` počítá polohu přijímače metodou nejmenších čtverců podle kapitoly 3.2.1 a jako parametr očekává datovou třídu `positionData` obsahující polohy družic a hodnoty k nim změřených pseudovzdáleností. Algoritmus pracuje iteračně a předpokládá dostatečnou přesnost určení polohy při maximálně 6 iteracích a součtu přírůstků ve všech směrech od předchozího kroku o maximálně 0,001 metru. Tato kritéria byla stanovena na základě měření uvedených dále.

Metoda `satellitePos()` počítá z dostupných dat efemerid a aktuálního času pozici družice v pravouhlé soustavě souřadnic. Metody pro vzájemný převod souřadnic ECEF – LLA jsou pojmenovány `ecefToLatLonAlt()` respektive `latLonAltToEcef()`.

5 Experimenty a zhodnocení výsledků

Navržený algoritmus založený na principech diferenciální GPS byl implementován postupy popsanými v předchozí kapitole a tato část práce pojednává o výstupech programu a experimentech založených na porovnání přesnosti klasické a diferenciální GPS. Úvodem jsou zmíněny tři experimenty prováděné v době implementace programu.

5.1 Zdánlivé vzdálenosti modulů

V průběhu měření s vývojovými kity EVK-6T byla zjištěna jejich značná vzájemná odchylka v určování zdánlivých vzdáleností přijímaných ve zprávě typu RXM_RAW. Oba moduly by za předpokladu umístění ve stejném čase na shodných zeměpisných souřadnicích měly odesílat ke zpracování podobné hodnoty zdánlivých vzdáleností ke všem viditelným družicím. Na přijímače dle teorie působí stejné závislé chyby a odchylka může být ovlivněna pouze chybami nezávislými. Rozdíl pseudovzdáleností je však na základě průměrné hodnoty získané měřením ke 4–9 viditelným satelitům po dobu 60 minut roven 129 830,322 metrů, což odpovídá rozdílu přenosu signálu přibližně 433,067 ms a rozdílu v určení polohy 603,3 metrů mezi těmito dvěma přijímači.

Zdánlivé vzdálenosti obou modulů k satelitu číslo 10 měřené 27. 3. 2013 v časovém intervalu 14:52:01–15:03:02 jsou vyneseny v tabulce 5.1. Je patrné, že zdánlivé vzdálenosti se pro satelit v průběhu měření zmenšovaly. To je způsobeno jejich pohybem po obloze, kdy se satelit přibližoval nad pozici GPS přijímače (směřoval směrem od obzoru) a zvyšovala se tak hodnota úhlu elevace mezi 59° až 65° a tím snižovala jejich vzájemná vzdálenost.

Čas měření:	14:52:01	14:57:54	15:02:31
Zdánlivá vzdálenost base [m]:	20811441,390279	20722742,439564	20660929,126572
Zdánlivá vzdálenost rover [m]:	20659033,781245	20559118,752591	20487914,110705
Rozdíl zdánlivých vzdáleností [m]:	152407,609	163623,687	172015,0159
Skutečná vzdálenost base [m]:	20453119,385905	20315872,114616	20215230,583885
Elevace [°]:	59	62	65

Tabulka 5.1: Rozdíl zdánlivých vzdáleností modulů.

K vývojovému kitu je dodáváno CD se softwarem uBlox Center, který umožňuje zobrazit zprávy z GPS modulů. Data zpráv zobrazená tímto softwarem jsou shodná s daty zpracovanými vlastním algoritmem programu a je tedy vyloučena chyba zpracování dat. Vnitřní oscilátor modulu neběží přesně a předpokládá se určitá přesnost ovlivňující drift časové základny. Výrobce však udává

určení času s přesností až 15 ns, což je řádově nižší hodnota než odpovídá rozdílu přenosu signálu. Výrobce kitů na dotaz ohledně tohoto problému sdělil, že aktuálně není schopen z důvodu zatížení zákaznickou podporou průmyslovými zákazníky poskytovat také podporu pro školní a univerzitní projekty.

Jak je ukázáno dále, problém rozdílu pseudovzdáleností je v systému diferenciální GPS výrazně eliminován a ve výsledném určení polohy se tento rozdíl neprojevuje tak zásadně, jako v případě určení pozice jediným přijímačem. Přesto je tak do systému zanesen další zdroj chyby.

5.2 Iterace algoritmu určení polohy

Navržený algoritmus výpočtu polohy přijímače metodou nejmenších čtverců potřeboval stanovit maximální počet iterací, které proběhnou k dosažení požadované přesnosti určení polohy v pravouhlé ECEF soustavě souřadnic na 3 desetinná místa. Ke stanovení optimálního počtu iterací, byla provedena série několika měření s různým počtem viditelných satelitů. Vstupem algoritmu byla reálná vzdálenost určená na základě známé polohy přijímače, aby byly eliminovány chyby spojené s určením a výpočtem pomocí pseudovzdáleností. Sledovaným parametrem byla přesnost určení pozice v závislosti na počtu provedených iterací. Přijímači umístěnému na zeměpisných souřadnicích 49,22574° zeměpisné šířky, 16,594303° zeměpisné délky a 270 m elipsoidické výšky odpovídají pravouhlé souřadnice $x = 3999807,954$ m, $y = 1191967,296$ m, $z = 4807207,907$ m.

První vybrané měření probíhalo k 6 viditelným družicím se silou signálu minimálně 20 dbHz a elevačním úhlem minimálně 20°. Jejich rozmístění na obloze bylo ideální, reprezentované hodnotou parametru DOP rovnou 2,3. Výstup polohových souřadnic je v tabulce 5.2. Tučně zvýrazněn je počet míst výsledku, který odpovídá skutečnému umístění přijímače. Pro tento případ bylo dosaženo požadované přesnosti po čtvrté iteraci.

Počet iterací:	x [m]	y [m]	z [m]
1	3970677,954	1188905,449	4788636,667
2	3999778,659	1191963,810	4807189,706
3	3999807,955	1191967,296	4807207,907
4	3999807,954	1191967,296	4807207,907
5	3999807,954	1191967,296	4807207,907

Tabulka 5.2: Přesnost polohových souřadnic na počtu iterací I.

Další měření bylo zvoleno pro nepříznivé podmínky rozmístění družic a jejich parametrů. Měření probíhalo pro 5 viditelných satelitů se silou signálu mezi 13–22 dbHz, hodnotou elevace minimálně 5° a v prostředí se zúženou viditelností přijímače na oblohu. Hodnota DOP tohoto měření

byla 6,0. Pro tento případ zobrazený v tabulce 5.3 bylo dosaženo požadované přesnosti po šesté iteraci.

Počet iterací:	x [m]	y [m]	z [m]
1	3159071,144	1094993,718	3990162,970
2	3981370,957	1188538,417	4784282,020
3	3999521,085	1191463,976	4801984,112
4	3999804,901	1191967,136	4807296,443
5	3999807,953	1191967,208	4807207,216
6	3999807,954	1191967,296	4807207,907
7	3999807,954	1191967,296	4807207,907

Tabulka 5.3: Přesnost polohových souřadnic na počtu iterací II.

Při jediném měření se nepodařilo dosáhnout požadované přesnosti a to vlivem minimálního počtu 4 satelitů a jejich umístěním nad přijímačem v elevačním úhlu mezi 73°–88°. Při výpočtu s hodnotami získanými za podobných podmínek není zaručena přesnost určení výsledné polohy přijímače a algoritmus takový výpočet ukončí. Po sérii měření s různými podmínkami příjmu signálů z družic byl stanoven optimální počet na hodnotu 6 iterací.

5.3 Podmínky použití družic

GPS moduly odesílají ke zpracování výpočetní stanici také data družic, která mají nízkou úroveň síly signálu nebo hodnotu elevace. Právě na tyto parametry je navržený algoritmus citlivý, protože ovlivňují přesnost určení zdánlivých vzdáleností a v důsledku také přesnost určení polohy přijímače. Ke stanovení podmínek vyloučení družice z výpočtu byla provedena série měření. Vybrané měření v časovém intervalu 240 minut počítalo s rozdílnými prahovými hodnotami, které družice nesměla překročit. Byla sledována průměrná odchylka mezi vypočítanou a skutečnou polohou a jejich medián. Průběh měření je zobrazen v tabulce 5.4, kde cno je síla signálu v dbHz a elevace úhel ve stupních.

Během měření bylo zjištěno, že zvyšování prahové hodnoty nad 15 nemá smysl ani u jednoho parametru. V zástavbě jsou signály rušeny a síla signálu se skokově mění. Vysoký práh elevace neumožňuje zapojit některé družice a výsledný výpočet nemusí dosahovat požadovaného minimálního počtu 4, především v závislosti na denní době a zakrytí obzoru. Optimální hodnota byla na základě měření stanovena pro sílu signálu na 10 dbHz a pro úhel elevace 10°.

Podmínky parametrů:	průměr [m]	medián [m]
bez omezení	23,410	12,280
cno > 10, elevace > 5	29,900	21,580
cno > 10, elevace > 10	19,720	9,615
cno > 20, elevace > 5	21,640	8,390
cno > 10, elevace > 20	20,203	9,414

Tabulka 5.4: Odchylnka polohy v závislosti na podmínkách vyloučení družic.

5.4 Přesnost určení polohy

Při hodnocení přesnosti určení polohy je nutné počítat s dvěma specifickými případy. Funkce pro výpočet souřadnic přijímače očekává na vstupu zdánlivé vzdálenosti k viditelným družicím a polohu těchto družic. Proto lze určit souřadnice přijímače v různých podmínkách měření a s různými parametry ovlivňujícími tyto vzdálenosti a sledovat výslednou odchylku od skutečné pozice. Jedním případem je porovnání přesnosti výpočtů z nekorigovaných pseudovzdáleností jediného přijímače (dále klasická GPS) s výpočty z korigovaných pseudovzdáleností v diferenciálním systému využívajícím dvou přijímačů (dále diferenciální GPS). Druhým případem je porovnání výpočtů z korigovaných pseudovzdáleností s výpočty GPS modulu vlastním vnitřním algoritmem (dále modul GPS). Po dobu měření byly přijímače umístěny na stejných referenčních polohových souřadnicích 49,22574° zeměpisné šířky, 16,594303° zeměpisné délky a 270 m elipsoidické výšky.

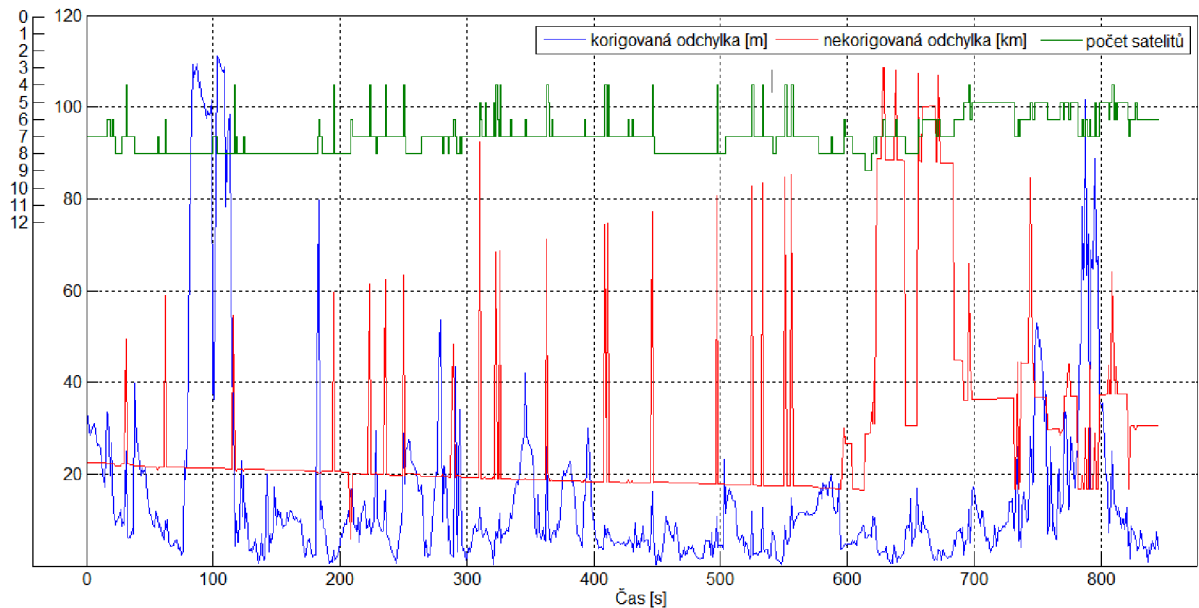
5.4.1 Klasická GPS a diferenciální GPS

První vybrané měření provedené 16. 4. 2013 v časovém intervalu 10:38:23–10:52:18 je zobrazeno v grafu na obrázku 5.1. Minimální síla signálu pro zahrnutí satelitu do výpočtu byla 10 dBHz a úhel elevace vůči přijímači minimálně 10°. Měření probíhalo v podmínkách dobré viditelnosti na oblohu (minimální zakrytí obzoru), ale s možností vícecestného šíření signálu.

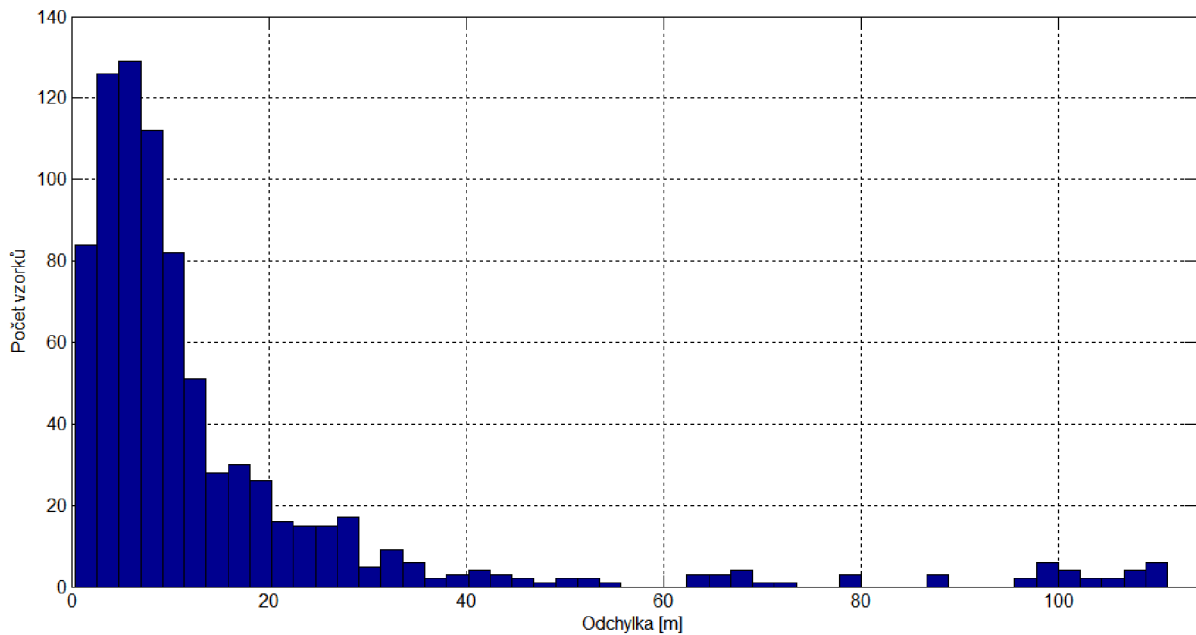
Graf obsahuje vynesené odchylky korigovaného a nekorigovaného měření v čase a počet viditelných satelitů. Nekorigovaná odchylka však dosahuje řádově desítek km, zatímco korigovaná jednotek až desítek metrů. V grafu jsou proto vyneseny s rozdílnou délkovou jednotkou.

Z grafu je patrné, že pokles počtu satelitů nemá predikovatelný vliv na přesnost určení pozice. V čase 31 sekund po začátku měření poklesl počet satelitů zahrnutých do výpočtu ze 7 na 4 satelity (dočasný pokles síly signálu) a odchylka nekorigovaného výpočtu se zvětšila z 22,21 km v čase 30 s na 49,54 km. U korigovaného výpočtu dosáhl nárůst odchylky z 8,785 m na 25,07 m, což představuje rozdíl 16,285 m v určení polohy. Naopak v čase 195 sekund poklesl počet satelitů z 8 na 4 satelity. Odchylka nekorigovaného výpočtu se zvýšila z 20,59 km na 59,7 km, zatímco odchylka

korigovaného signálu se zvětšila pouze z 0,87 m na 3,294 m o rozdíl 2,424 m. Na obrázku 5.2 je histogram četnosti 850 měřených vzorků polohy z korigovaných vzdáleností v intervalech odchylky 2,2 m.



Obrázek 5.1: Graf odchylky korigovaného a nekorigovaného určení polohy.



Obrázek 5.2: Histogram odchylky korigovaného určení polohy.

Vliv na přesnost určení pozice má samotné rozmístění satelitů na obloze. Když do výpočtu nejsou zahrnuty satelity rozprostřené po obloze, ale pouze satelity viditelné v omezeném úhlu, je tato skutečnost reprezentována zvyšující se hodnotou DOP a chybou v určení souřadnic. Mezi časem 76 s–115 s byla ve výpočtu družice č. 23 s elevací 28° zapadající za horizont a snižující sílu signálu

nahrazena družicí č. 12, která se nad přijímač přibližovala v rostoucím elevačním úhlu a se zesilujícím signálem. Statistika určená z dat měření je v tabulce 5.5.

	minimum	maximum	průměr	medián
Korigovaná odchylka [m]:	0,368	111,100	15,060	8,388
Nekorigovaná odchylka [km]:	5,925	108,500	28,430	20,600
Počet satelitů:	4	9	6,978	7

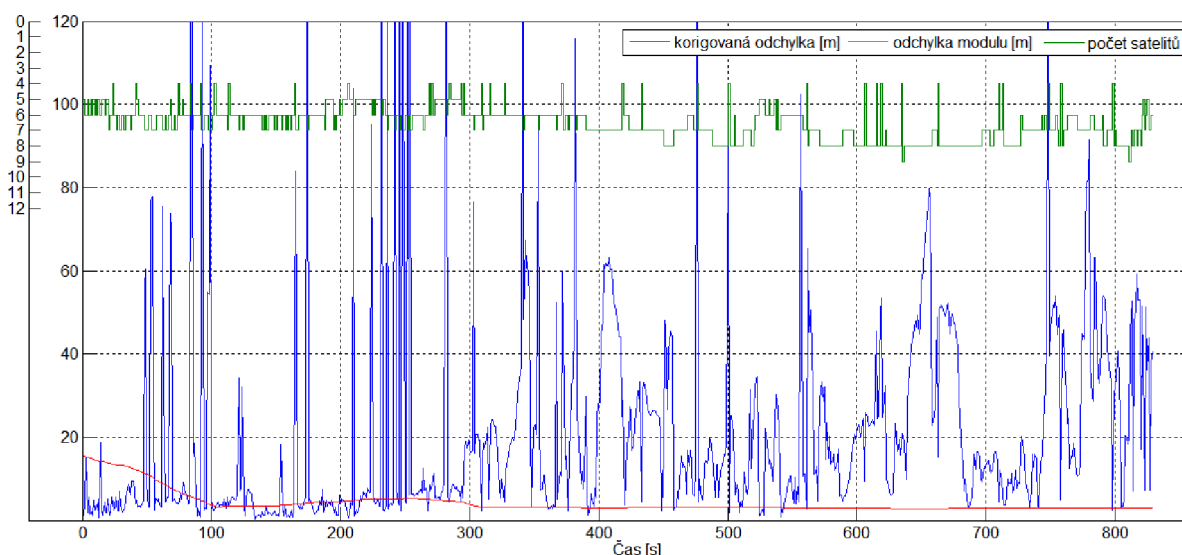
Tabulka 5.5: Statistická data korigovaného a nekorigovaného měření.

Algoritmus určuje výslednou polohu přijímače z nekorigovaných vzdáleností s průměrnou odchylkou 20,6 km, pokud jsou do výpočtu zahrnuty korekce referenční stanice, dosahuje průměrné odchylky 15,06 m. V porovnání klasické a diferenciální GPS je tedy dosaženo značného zpřesnění.

5.4.2 Modul GPS a diferenciální GPS

Měření provedené 16. 4. 2013 v časovém intervalu 14:20:16–14:34:09 je zobrazeno v grafu na obrázku 5.3. Podmínky pro měření byly stejné jako v předchozím měření.

V grafu je vynesena průběh odchylek určení polohy modulu, navrženého algoritmu a počet satelitů zahrnutých do výpočtu. Do času 104 sekund zpřesňoval algoritmus GPS modulu svoji polohu z 15,49 m na 3,34 m. Korigovaný výpočet vykazuje růst odchylek v časech příjmu signálu satelitů s malým elevačním úhlem, které nebyly do výpočtu zahrnuty po celou dobu kvůli prahové síle signálu.



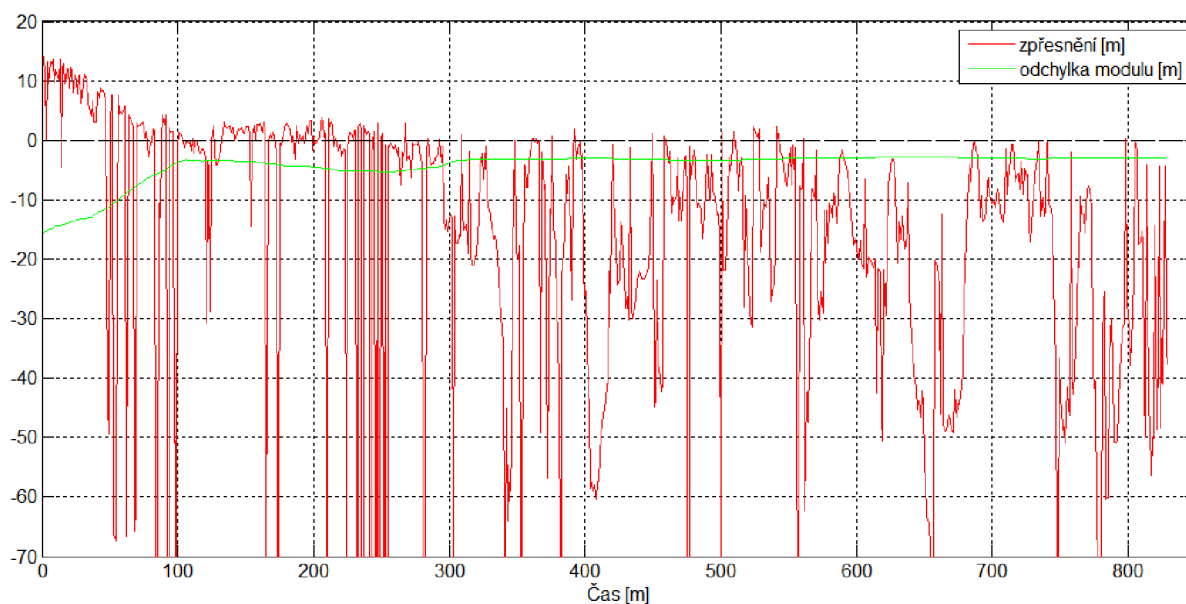
Obrázek 5.3: Graf odchyly korigovaného a modulového určení polohy.

Statistika určená z dat měření v tabulce 5.6 prezentuje srovnání odchylky určení souřadnic modulem, který dosahoval průměrné chyby 4,235 m. Na počátku observace modulu, sice dosáhl odchylky 15,49 m, ale v průběhu měření ustálil odchylku na hodnotě 3,21 m. Diferenciální algoritmus dosáhl průměrné odchylky 21,34 m.

	minimum	maximum	průměr	medián
Korigovaná odchylka [m]:	0,269	187,100	21,340	11,890
Odchylka modulu [m]:	2,770	15,490	4,235	3,210
Počet satelitů:	4	9	6,978	7

Tabulka 5.6: Statistická data korigovaného a modulového měření.

Vyjádření zpřesnění vůči modulu v metrech pomocí diferenciální GPS je vyneseno v grafu na obrázku 5.4 společně s odchylkou modulu vůči skutečné poloze. Zpřesnění bylo určeno na základě rozdílu odchylek obou měřených průběhů v obrázku 5.3. Protože bylo provedeno srovnání přesnosti diferenciální GPS s přesností dosaženou GPS modulem, byl rozdíl odchylek v tomto pořadí a většina hodnot odpovídá spíše zneřádnění průběhu. Statistika měření vykazuje minimální hodnotu -183 m a maximální hodnotu 14,11 m. Průměrné z(ne)přesnění odpovídá -17,1 m, medián je -8,361 m.



Obrázek 5.4: Graf zpřesnění korigovaného a modulového měření.

Ačkoliv diferenciální GPS vykazuje občasné zpřesnění polohy vůči samotnému modulu, nelze ji vzhledem k oscilaci průběhu odchylky prohlásit za přesnější. Při srovnání modulové a diferenciální přesnosti je modulová stabilně přesnější.

5.5 Zhodnocení experimentů

V rámci experimentů byla zkoumána odchylka zdánlivých vzdáleností mezi používanými GPS vývojovými kity. Odchylka každé pseudovzdálenosti průměrně 129 830,322 m vnáší do výpočtu rozdíl od polohy druhého přijímače průměrně 603,3 m. Nebyla však nalezena příčina tak velkého vlivu chyby na přijímaná data, která uživatel neovlivňuje, protože jsou zpracována samotnými GPS moduly. Pro výpočet určení polohy přijímače byl stanoven optimální počet 6 iterací algoritmu vzhledem ke stanovené přesnosti a délce výpočtu. V textu experimentů kapitoly 5.4 byl zmíněn vliv satelitů s různými parametry na přesnost výpočtu. Proto byly provedeny experimenty sledující odchylku určení polohy v závislosti na vyloučení satelitů, které nesplňovali prahové hodnoty parametrů síly signálu 10 dbHz a elevace 10°.

Další experimenty byly již provedeny za účelem srovnání přesnosti klasické a navrženého způsobu diferenciální GPS. Měření vybraná do této kapitoly reprezentovala měření s obvyklým rozložením dat. Bylo ukázáno, že algoritmus diferenciální GPS je schopen zpřesňovat výpočet polohy v systémech dvou přijímačů se značnými zdroji chyb. V takových případech dosahuje průměrné odchylky od skutečné pozice přijímače 21,34 m. V porovnání s výpočtem polohy přímo GPS modulem, který dosahoval přesnosti průměrně 4,235 m, je diferenciální algoritmus méně přesný o 17,1 m.

6 Závěr

Cílem práce byl návrh způsobu implementace diferenciální GPS. K pochopení principů diferenciální GPS bylo třeba v teoretické části práce analyzovat systém klasické GPS, především pohyb a signály družic a chyby vstupující do výpočtu určení polohy přijímače. V praktické části byly popsány metody a měření, které vedly k výslednému návrhu řešení. Byla provedena měření výsledného algoritmu diferenciální GPS v porovnání s klasickou GPS.

6.1 Zhodnocení výsledků

Vlastní návrh způsobu implementace vycházel z obecné teorie klasické a diferenciální GPS. Proti diferenciální GPS, využívající zapouzdřené sady korekcí zdánlivých vzdáleností a jejich derivací pro aplikaci v mírně odlišném čase měření, byl v této práci zvolen optimalizovaný návrh. Ten předpokládá přenos dat k výpočetní stanici přímým USB propojením referenční stanice a roveru. Korekce se určují a aplikují na výpočetní stanici a jsou proto vždy aktuální v čase měření. Neroste chyba závislá na stáří sady korekcí a vzdálenosti referenční stanice od roveru.

Algoritmus byl testován při výpočtech na datech určených v reálném čase. Výpočet polohy založený na měření nekorigovaných zdánlivých vzdáleností k viditelným satelitům vykazuje pro oba GPS moduly značnou odchylku od skutečné polohy modulů. Odchylka přesahuje i velikost vlivů běžných chyb v systému GPS. Přijímané zdánlivé vzdálenosti z modulu se značně liší od vypočítaných skutečných vzdáleností, které odpovídají umístění přijímače. V průběhu měření a experimentů nebyla nalezena příčina této chyby v systému s jediným přijímačem, tedy v systému klasické GPS.

Pokud algoritmus pracuje jako diferenciální a získává data ze dvou přijímačů, je vliv většiny chyb na určení polohy eliminován dle teoretických předpokladů. V porovnání s klasickou GPS s nekorigovanými zdánlivými vzdálenostmi, vykazuje algoritmus řádově menší odchylky určení pozice při použití zdánlivých vzdáleností korigovaných daty referenční stanice. Přesto výsledná přesnost nedosahuje přesnosti určení polohových souřadnic přímo GPS modulem a jeho vnitřním algoritmem ve všech případech.

Aplikace komunikuje binárním protokolem s připojenými GPS vývojovými kity. Zobrazuje v grafickém prostředí na mapový podklad výsledky výpočtů polohy a informuje o jejich průběhu. Třídy a jejich objekty odděleně zapouzdřují metody pro komunikaci, zpracování dat, vizualizaci, samostatná vlákna pro výpočty a podobně. Návrh aplikace probíhal s ohledem na budoucí rozšíření uvedené dále, kdy všechny výpočty nemusí probíhat na jediné výpočetní stanici.

6.2 Rozšíření a pokračování projektu

V rámci rozšíření projektu by bylo vhodné zajistit další GPS vývojový kit EVK-6T k měření přesnosti GPS modulů, případně zajistit podporu ze strany výrobce s ohledem na problém rozdílu přijímaných pseudovzdáleností.

Při znalosti praktického použití navrženého řešení, jako je model pohybu roveru, by mohl být algoritmus výpočtu polohy metodou nejmenších čtverců nahrazen za algoritmus Kalmanovi filtrace, který odhaduje průběh následujících poloh na základě předchozích měření nebo jiný pokročilý algoritmus.

Aktuální metoda přenosu dat přímým propojením výpočetní stanice s base a roverem je limitující s ohledem na maximální vzdálenost těchto zařízení a omezení pohybu roveru. Vhodným komunikačním kanálem by v tomto případě byl bezdrátový přenos dat. Aktuální data z referenční stanice by v závislosti na rychlosti přenosu nemusela být dostupná v každém okamžiku měření roveru a zavedení derivace korekci by tak mělo znovu smysl.

Literatura

- [1] KAPLAN, E. *Understanding GPS: principles and applications*. Boston : Artech House, 2006. str. 703. ISBN 978-1-58053-894-7.
- [2] HRDINA, Z. *Rádiové určování polohy: Družicový systém GPS*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1999. str. 259. ISBN 80-010-1386-3.
- [3] EL-RABBANY, A. *Introduction to GPS: the Global Positioning System*. Boston : MA: Artech House, 2002. str. 176. ISBN 15-805-3183-0.
- [4] U.S. GOVERNMENT. GPS.gov: Space Segment [online]. Poslední revize 12. 2 2013 [cit. 23. 4. 2013]. Dostupné z: <<http://www.gps.gov/systems/gps/space/>>.
- [5] XU, G. *GPS: theory, algorithms, and applications*. Berlin : Springer, 2007. str. 340. ISBN 978-3-540-72714-9.
- [6] ZOGG, J. *GPS: Essentials of Satellite Navigation* [online]. Poslední revize 2009 [cit. 22. 4. 2013]. Dostupné z: <[http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/GPS_Compedium\(GPS-X-02007\).pdf](http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/GPS_Compedium(GPS-X-02007).pdf)>
- [7] ČESKÝ RADIOKLUB. *Šíření rádiových signálů* [online]. Poslední revize 2006 [cit. 21. 4. 2013]. Dostupné z: <<http://www.crk.cz/CZ/SIRENIC>>.
- [8] DEPRIEST, D. *NMEA data* [online]. [cit. 22. 4. 2013]. Dostupné z: <<http://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm>>.
- [9] U-BLOX. *EVK-6 u-blox Evaluation Kits: User Guide* [online]. Poslední revize 2012 [cit. 14. 3. 2013]. Dostupné z: <[http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/EVK-6_UserGuide_\(GPS.G6-EK-10040\).pdf](http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/EVK-6_UserGuide_(GPS.G6-EK-10040).pdf)>.
- [10] ZWEIG, J. *RFC 1145: TCP Alternate Checksum Options* [online]. Poslední revize 1990 [cit. 15. 4. 2013]. Dostupné z: <<http://tools.ietf.org/html/rfc1145>>.
- [11] U-BLOX. *LEA-6T Product Summary* [online]. Poslední revize 2011 [cit. 10. 3. 2013]. Dostupné z: <[http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/LEA-NEO-6T_ProductSummary_\(GPS.G6-HW-09020\).pdf](http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/LEA-NEO-6T_ProductSummary_(GPS.G6-HW-09020).pdf)>.
- [12] U-BLOX. *u-blox 6 Receiver Description: Including Protocol Specification* [online]. Poslední revize 2011 [cit. 14. 3. 2013]. Dostupné z: <[http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/u-blox6_ReceiverDescriptionProtocolSpec_\(GPS.G6-SW-10018\).pdf](http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/u-blox6_ReceiverDescriptionProtocolSpec_(GPS.G6-SW-10018).pdf)>.
- [13] U.S. GOVERNMENT. *IS-GPS-200G: Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces* [online]. Poslední revize 5. 9. 2012 [cit. 20.4. 2013]. Dostupné z: <<http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200G.pdf>>.
- [14] KALMAN, R.E. *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems* [online]. Poslední revize 1960 [cit. 8. 4. 2013]. Dostupné z: <<http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/Kalman1960.pdf>>.
- [15] U.S. GOVERNMENT. *IS-GPS-705C: Navstar GPS Space Segment / User Segment L5 Interfaces* [online]. Poslední revize 5. 9 2012 [cit. 20. 4. 2013]. Dostupné z: <<http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-705C.pdf>>.

- [16] *QextSerialPort: Serial port library for Qt2, Qt3, Qt4 and Qt5* [online]. [cit. 5. 2. 2013].
Dostupné z: <<http://code.google.com/p/qextserialport/>>.
- [17] Google Developers. *Google Maps JavaScript API v3* [online]. Poslední revize 27. 7. 2012 [cit. 8. 2. 2013]. Dostupné z: <<https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/>>.

Příloha A

Obsah CD

Na CD přiloženém k textu této práce jsou obsaženy zdrojové kódy programu a programová dokumentace vygenerovaná nástrojem Doxygen. K překladu slouží soubor `Makefile`, který volá rekurzivně další `Makefile` soubory v adresáři zdrojových kódů. Adresářová struktura a příkazy pro překlad jsou v textovém souboru `README.txt`. Složka obrázků obsahuje snímek obrazovky grafického rozhraní aplikace a fotografii realizovaného zapojení systému výpočetní stanice a dvou GPS modulů. Obsažena je také tato písemná zpráva ve formátu PDF a ve verzi pro úpravy. Přehled adresářové struktury na CD je následující:

<code>./codes/</code>	– zdrojové kódy programu
<code>./doc/</code>	– programová html dokumentace
<code>./images/</code>	– obrázky GUI aplikace a zapojení HW
<code>./README.txt</code>	– soubor se základním přehledem
<code>./Makefile</code>	– hlavní soubor <code>Makefile</code> projektu
<code>./BP_diferenciální_GPS.pdf</code>	– písemná zpráva ve formátu PDF
<code>./BP_diferenciální_GPS.docx</code>	– zdrojový tvar písemné zprávy ve formátu DOCX