Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra matematiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti využití GPS v katastru nemovitostí

Plzeň, 2004 Martin Vacek

Zadání diplomové práce (vložený list)

Prohlášení

Předkládám tuto diplomovou práci jakožto součást procesu dokončení studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Zároveň tímto prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně. Všechny informační zdroje, ze kterých jsem čerpal jsou uvedeny v úplném seznamu použité literatury, který je součástí diplomové práce.

V Plzni dne 27.5. 2004 _____

Poděkování

Velmi rád bych poděkoval Ing. Václavu Čadovi, CSc., který mně jako vedoucí diplomové práce poskytl řadu materiálů, informací, kontaktů a odborných rad, které byly velmi užitečné při psaní předkládané diplomové práce. Dále chci poděkovat pracovníkům KÚ Plzeň-město, odboru OOKO 03110 a 03130 za jejich pomoc a rady.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na technologii GPS a její aplikace. Jsou zde posuzovány principy určení polohy touto technologií a jejich použitelnost v zeměměřičských činnostech. V práci je kladen důraz na vytvoření měřického návodu, jak tyto činnosti provádět, aby jejich výsledky splňovaly právní náležitosti platné pro katastr nemovitostí ČR.

Abstract

This diploma thesis is focused on GPS technology and its applications. There are examinations of principles of taking position with this technology and its use in land surveying. The attention is especially paid to create survey manual, how to implement these principles with a view to fill rules valid for cadastre of real estates of Czech Republic.

Klíčová slova

Česká republika, katastr nemovitostí, GPS, technologie, zeměměřičství, geodézie, měření, mapování, návod, S-JTSK, ETRS

Key words

Czech Republic, Cadastre of Real Estates, GPS, technology, land surveying, geodesy, surveying, mapping, manual, S-JTSK, ETRS

0 Úvod 8
1 Současná technická a technologická úroveň GPS a existující aplikace 9
1.1 Obecný popis družicového polohového systému 9
1.1.1 Určování polohy na základě měření vzdáleností 9
1.1.2 Určování polohy na základě fázových měření 10
1.2 Klasické družicové polohové systémy (GPS, GLONASS) 10
1.2.1 Obecná struktura 10
1.2.2 Kosmický segment 10
1.2.3 Řídící segment 11
1.2.4 Uživatelský segment 11
1.3 Popis systému GPS 11
1.3.1 Historie vzniku systému GPS 11
1.4 Struktura systému GPS 13
1.4.1 Kosmický segment 13
1.4.2 Řídící segment 13
1.4.3 Uživatelský segment 14
1.5 Signály vysílané družicemi GPS 14
1.5.1 C/A kód 14
1.5.2 P-kód 15
1.5.3 Y-kód 15
1.5.4 Navigační zpráva 15
1.6 Přijímač GPS 16
2 Současný stav existujících aplikací 18
2.1 Principy měření 18
2.1.1 Kódová měření 18
2.1.2 Fázová měření 18
2.2 Metody měření a vyhodnocování 19
2.2.1 Určování absolutní polohy přímo v terénu 19
2.2.2 Určování relativní polohy 20
2.2.3 Přesná geodetická měření 20
2.3 Určování polohy a času 22
2.3.1 Souřadnicový systém 22
2.3.2 Čas GPS 22
2.4 Faktory ovlivňující přesnost systému GPS 23
2.5 Aplikace GPS 25
3 GPS aplikace vhodné pro KN 27
3.1 Aplikace GPS v mapování 27
3.1.1 Statická metoda 28
3.1.2 Dynamická (kinematická) metoda 28
3.1.3 Kombinované metody 29
3.1.4 Metoda DGPS (Diferenciální GPS) 31
3.1.5 Síť referenčních stanic DGPS 32
3.1.6 Metoda VRS (Virtuální Referenční Stanice) 33
3.2 Aplikace GPS v oblasti geodetických základů 34
3.2.1 Legislativní zabezpečení 34
3.2.2 Geodetické referenční systémy v ČR 35
3.2.3 Bodová pole 35
3.2.4 S-JTSK 35
3.2.5 ETRS 37
3.3 Realizace ETRS89 v České republice 38

3.3.1 Kampaň EUREF-CS/H-91 ... 38
3.3.2 Referenční GPS síť nultého řádu (kampaň CS-NULRAD-92) ... 38
3.3.3 Kampaň CS-BRD-93 ... 39
3.3.4 Kampaň DOPNUL ... 39
3.3.5 Zhuštění sítě DOPNUL ... 40
3.3.6 Projekt zhuštění polohového bodového pole ... 40
3.3.7 Současný stav realizace ETRS89 ... 41
3.3.8 Systém S-JTSK/95 ... 42
3.3.9 Aktivní polohové základy ... 43
4 Návrh metodických opatření a úpravy stávajících předpisů pro možnost využití GPS v Katastru nemovitostí. ... 44
4.1 Využitelnost GPS pro KN ... 44
4.2 Lokální transformace bodů z ETRS89 do S-JTSK ... 45
4.3 Měření technologií GPS v KN – metodický návrh ... 45
4.3.1 Nutná přesnost měřických prací v KN ... 45
4.3.2 Metody měření pomocí GPS splňující zákonná kritéria pro použití v KN ... 46
4.3.3 Dokumentace GPS měření ... 46
4.3.4 Postup měření ... 46
5 Ověření navržených zásad ... 48
5.1 Zaměření sítě pomocných měřických bodů v KÚ Domažlice ... 48
5.1.1 Zaměření pomocných měřických bodů a bodů PBPP metodou GPS ... 48
5.1.2 Zaměření pomocných měřičských bodů a bodů PBPP klasickou metodou ... 49
5.1.3 Porovnání vyrovnaných sítí ... 54
5.2 Měření podrobných bodů polohopisu v KÚ Kralovice ... 55
6 Závěr ... 57
7 Použitá literatura ... 58
Přílohy ... 60
Příloha 1
Příloha 2
Příloha 3
Příloha 4
Příloha 5
Příloha 6

0 Úvod

Téma: Možnosti využití GPS v katastru nemovitostí jsem si rozdělil do čtyř hlavních částí. První jsem se věnoval obecně technologii družicových navigačních systémů. Popsal jsem, jak obecně vypadá družicový navigační systém, z jakých se skládá prvků a jaké jsou jejich funkce. Důležité je vysvětlení, na jakém principu vlastně funguje určování polohy pomocí družic. Pak jsem se již zaměřil konkrétněji na systém GPS-NAVSTAR.

U něj jsem popsal historii jeho vzniku, v jakých etapách se odvíjela, a jaké změny systém potupně prodělal. Konkrétněji je rozepsána i struktura systému, jeho jednotlivé segmenty a jejich význam. GPS využívá ke své práci rádiové signály vysílané jednotlivými družicemi, proto je v textu popis těchto signálů a vysvětlení způsobu, jak je lze zpracovávat a využívat pro určení polohy a orientace v prostoru.

V druhé části textu se zabývám současným stavem využívání systému GPS. Zaměřuji se hlavně na metody přesného určování polohy, ale i na další veličiny, které lze pomocí něj určovat. Jsou zde rozebrány přesnosti jednotlivých metod měření a vyhodnocování signálů z družic a v neposlední řadě i faktory, které tyto přesnosti ovlivňují.

Ve třetí části se již podrobněji zabývám aplikacemi GPS vhodnými pro geodetické práce, obzvláště pak pro práce v katastru nemovitostí ČR. Jsou uvádím zde současně využívané metody přesných polohových měření, jejich možnosti a omezení. Popisuji, jak jsou jednotlivé metody využitelné pro mapování, ale také jak lze využívat systém GPS v oblasti geodetických základů. Jednotlivé geodetické základy závazné v KN jsou zde přezkoumány z hlediska návaznosti na GPS měření. Všechny tyto poznatky využívám v metodickém návrhu jako používat technologii GPS v katastru nemovitostí.

Poslední část této práce uvádí ukázky využití GPS při měřeních v KN. Jsou zde uvedena dvě měření: Jedno při práci v PBPP a druhé při katastrálním mapování.

1 Současná technická a technologická úroveň GPS a existující aplikace

1.1 Obecný popis družicového polohového systému

Existuje několik metod, jak určovat svou polohu měřením na družice:

- **metoda úhloměrná**
- **metoda dopplerovská**
- **metoda dálkoměrná**
- **metoda založená na měření fáze nosné vlny**

V systému GPS je ovšem využíváno v drtivé většině případů posledních dvou metod, a proto se budeme věnovat pouze jim.

1.1.1 Určování polohy na základě měření vzdáleností

Princip spočívá v měření co nejpřesnějších vzdáleností mezi měřeným bodem a družicemi. Buď je vzdálenost měřena přímo (například laserový dálkoměr s odražečem na družici), nebo nepřímo pomocí rychlosti šíření signálu z družice a časového zpoždění mezi vysláním signálu z družice a přijetím signálu na měřeném bodě. Vzdálenost je poté rovna

$$d = v(\text{signálu})*t.$$

rovnice 1

Pouze ale v ideálním případě. Ve skutečnosti je třeba počítat s pohyby družice, sluneční aktivitou, atmosférickými a dalšími vlivy. V některých systémech se nepoužívá doba šíření signálu, nýbrž jen časový rozdíl mezi příchodem signálů ze dvou radiomajáků. Globální družicové systémy používají způsob s výpočtem dle doby letu a rychlosti signálu.

Princip určení polohy vypadá takto: přijímač určí čas t_{di}, za který dorazil signál od družice na souřadnicích (x_i,y_i,z_i) k měřenému bodu se souřadnicemi (X,Y,Z). Rychlost šíření radiových vln je rovna rychlosti světla c. Souřadnice neznámého bodu teoreticky budou určeny pomocí soustavy rovnic

$$\begin{aligned} t_{d1}.c &= \sqrt{(x_1 - X)^2 + (y_1 - Y)^2 + (z_1 - Z)^2} \\ t_{d2}.c &= \sqrt{(x_2 - X)^2 + (y_2 - Y)^2 + (z_2 - Z)^2} \\ t_{d3}.c &= \sqrt{(x_3 - X)^2 + (y_3 - Y)^2 + (z_3 - Z)^2} \end{aligned}$$

rovnice 2

Důležité je odlišit jednotlivé signály mezi sebou. Běžně se k tomuto účelu využívají tyto metody:

- **kmitočtové dělení** – odlišení na základě rozdílných kmitočtů jednotlivých nosných vln signálů vysílaných z družic
- **kódové dělení –** nosná frekvence je pro všechny družice stejná, ale každá z nich vysílá dálkoměrný kód namodulovaný na tuto frekvenci. Kód pro družici musí být unikátní a

přijímače na neznámém bodě musí být schopny tyto kódy odlišovat. Tento způsob používá systém GPS.

- **časové dělení –** všechny družice vysílají stejný kód na stejné nosné frekvenci, avšak každá z nich pouze v určitém, jí přiděleném, časovém okamžiku

Na tvorbu dálkoměrných kódů je zpravidla používáno tzv. pseudonáhodných signálů (PRN – z angl. Pseudo Random Noise). Významnou vlastností těchto signálů je, že pokud porovnáváme dva odlišné kódy, je výsledný signál velice slabý. Pokud jsou ovšem signály shodné nebo fázově posunuté, objeví se na výstupu silný signál.

Dálkoměrné družicové systémy je dále možno rozdělit na aktivní a pasivní**.** Aktivní jsou vybaveny tzv. odpovídačem: polohu konkrétního neznámého bodu vyhodnocuje řídící stanice, která vyšle přes družici identifikační značku tohoto přijímače, ten ji rozpozná a opět přes družici odešle odpověď. Řídící centrum vyhodnotí polohu přijímače po přijetí signálu z několika družic. Zjevná nevýhoda tohoto systému je nutnost komunikace s řídícím centrem. Tím je omezen počet uživatelů kteří systém ve stejné době používají, kapacitou komunikačního kanálu.

Pasivní systémy pracují tak, že samy družice vysílají dálkoměrné signály spolu s časovými značkami a údaji o oběžných drahách, na kterých se nacházejí. Pokud potom přijímač sleduje signály z více družic, je schopen určit svou polohu. Systém GPS patří mezi pasivní polohové systémy.

1.1.2 Určování polohy na základě fázových měření

Tato metoda funguje na velice jednoduchém principu. Spočítáme-li počet vlnových délek radiové vlny, kterou vyslala družice, než dorazila k přijímači, a známe-li vlnovou délku tohoto signálu, jsme schopni, určit jaká je vzdálenost mezi družicí a přijímačem. Dále je nutné určit velikost části poslední vlny těsně u přijímače. Určit desetinnou část vlny je v praxi snadné, problém nastává s určením celočíselného počtu vln. Tento problém se označuje jako celočíselná neurčitost. Každý družicový polohový systém řeší tuto skutečnost různými metodami.

1.2 Klasické družicové polohové systémy (GPS, GLONASS)

1.2.1 Obecná struktura

Družicový polohový systém se skládá ze tři segmentů:

- **kosmický**
- **řídící**
- **uživatelský**

1.2.2 Kosmický segment

Kosmický segment představuje soustava umělých družic Země, které mají přesně definované oběžné dráhy. Jednotlivé segmenty se liší typem oběžných drah, výškou, sklonem a počtem oběžných drah, dále pak družicemi, jejich počtem a rozmístěním na oběžných drahách. Kosmický segment musí být postaven tak, aby co nejlépe plnil požadavky uživatelského segmentu, a přitom nepřesahoval limitní možnosti řídícího segmentu. U systému GPS jsou oběžné dráhy družic kruhové s výškou 20 200 km, sklon drah 55°. Doba oběhu jedné družice je jedna polovina siderického dne (přibližně 12 hodin). Oběžných drah

bylo zvoleno šest, každé přísluší čtyři družice. Počet družic ve vesmíru, včetně rezervních, je 24.

1.2.3 Řídící segment

Jedná se o stanice na zemském povrchu. Ty provádí monitorování kosmického segmentu, jeho vyhodnocování a úpravy tak, aby plnil správně svou funkci. Jde především o :

- sledování signálů družic
- vyhodnocování chování družic a určování parametrů jejich oběžných drah
- sledování a korekce hodin na družicích
- aktualizace parametrů vysílaných družicemi
- manévry družic
- údržba družic
- koordinace a řízení celého systému

1.2.3.1 Složení pozemního řídícího segmentu:

- **monitorovací stanice –** měly by být umístěny tak, aby umožnily sledování maximálního možného počtu družic kosmického segmentu, a to po největší část dne (nejlépe celý, u systému GPS je to zhruba 92% dne)
- **hlavní řídící stanice** – slouží k určování korekcí atomových hodin družic a k určování momentálních parametrů oběžných drah družic pro korekturu trajektorií družic při vychýlení
- **stanice pro komunikaci s družicemi –** slouží pro vysílání povelů a dat družicím. Většinou jsou to nové parametry oběžných drah nebo korekce hodin apod.

1.2.4 Uživatelský segment

Uživatelský segment představuje veškeré technické vybavení umožňující zpracování signálů z družic GPS, technologické postupy měření a vyhodnocování prováděné uživateli.

1.3 Popis systému GPS

Systém GPS se definuje jako globální družicový radiový polohový a navigační systém. Tyto pojmy znamenají:

- **navigační –** systém sloužící k orientaci v prostoru
- **globální –** lze jej využívat po celé Zemi, 24 hodin denně
- **radiový –** k navigaci je používáno šíření radiových vln
- **družicový –** jako vysílače signálu je využíváno umělých družic okolo Země
- **polohový –** pomocí takového systému lze určit svou polohu v prostoru

1.3.1 Historie vzniku systému GPS

Systém GPS byl původně vyvinut pro vojenské účely. Postupem času si však našel široké spektrum využití i v civilním sektoru. Byl zřízen a je spravován Ministerstvem obrany USA. Dnes má po světě miliony uživatelů. Popularitu mu získala především:

- globálnost systému - signály jsou dostupné po celé Zemi i v blízkém přilehlém kosmickém prostoru
- relativně vysoká polohová přesnost (při použití speciálních postupů až řádově milimetry)
- relativně vysoká rychlost měření při zachování odpovídající polohové přesnosti
- standardní služby systému GPS jsou bezplatné a dostupné komukoliv
- systém lze využívat 24 hodin denně a za každého počasí
- poloha v prostoru je určována třírozměrně
- systém je schopen poskytovat relativně velmi přesný čas

Družicová navigace se začala vyvíjet v 60. letech 20. století, nicméně vznik systému GPS je datován až od počátku let sedmdesátých. V té době započaly práce na projektu NAVSTAR-GPS. Projet proběhl v několika etapách (upraveno dle [8] resp. dle [18]).

1.3.1.1 Etapa první (1973 – 1979)

Týkala se ověření základních předpokladů a principů systému. Pokusy byly prováděny na soustavě pozemních vysílačů simulujících budoucí družice. První skutečná družice pro ověření technologie byla vypuštěna pod názvem Timotion II (později byla přejmenována na NTS-1) 14.července 1974.

V průběhu roku 1978 byly vyneseny na oběžnou dráhu čtyři tzv. vývojové družice Bloku I, postupně potom další. Celkový počet družic Bloku I dosáhl čísla 11.

1.3.1.2 Etapa druhá (1979 – 1985)

V této etapě byla budována pozemní řídící střediska systému GPS, zahájen vývoj družic Bloku II a byly testovány prototypy přijímačů signálů z družic.

1.3.1.3 Etapa třetí (1985 – 1995)

Během této etapy byly vypouštěny další družice (celkem 29), první až desátá pod označením Blok II, další pod označením Blok IIA. Družice Bloku IIA byly zdokonalené, schopné pracovat až 180 dní bez zásahu řídícího střediska ze Země. Všechny tyto družice postupně zvyšovaly rozsah, výkon a spolehlivost systému GPS. Ovšem plného operačního stavu podle původních plánu, tedy obsazení oběžných drah kolem Země 24 plně funkčními družicemi, se dosáhlo až v roce 1993. Od června roku 1989 se pracovalo na dalším vývoji a výrobě družic Bloku IIR. Družice tohoto bloku komunikují mezi sebou a vzájemně určují vzdálenosti mezi sebou, čímž zlepšují parametry systému.

1.3.1.4 Etapa čtvrtá

Započala roku 1995 a trvá dodnes. První družice Bloku IIF byly vyráběny od roku 1995, zatím se příliš nevyužívají. V dnešní době se diskutuje o tom, jaké konkrétní požadavky budou pokládané na družice Blok III. Zatím se stále používají náhradní družice Bloku IIR. Poslední družice, v počtu desátá, odstartovala 21.12.2003.

1.3.1.5 Přehledný souhrn družic používaných v GPS

- **Timotion II (NTS–1)** - atomové hodiny (rubidiové oscilátory)
- **NTS-2** - cesiové hodiny, nebyla ještě standardní družicí GPS

- **Blok I** - cesiové hodiny, celkem vyrobeno 11 družic, jejich průměrná životnost dosáhla 8.76 roku. Na těchto družicích ještě nebyla aplikována tzv. selektivní dostupnost.
- **Blok II + Blok IIA** (z angl. advanced) – cesiové hodiny, celkem vyrobeno 29 družic, které byly vypouštěny s frekvencí 6 ročně. Na těchto družicích byla poprvé zavedena selektivní dostupnost (viz níže). Družice Bloku IIA jsou schopny pracovat až 180 dní nezávislé na řídícím segmentu. Jsou stále ještě v provozu a očekává se, že životnost přesáhne 10 let.
- **Blok IIR** (z anglického replenischment) – cesiové hodiny, vyráběny od roku 1997. Jsou vybaveny lepší protiradiační ochranou a mohou pracovat 14 dní bez komunikace s řídícím segmentem. Poté se mohou přepnout do autonavigačního módu a v něm pracovat až 180 dní. Tyto družice jsou již schopny měřit vzdálenosti k ostatním družicím, a tak opravovat zprávy o svých parametrech oběžné dráhy.
- **Blok IIF** (z anglického follow) – zatím jich nebylo vyrobeno mnoho. Spekuluje se, že jejich výroba bude ukončena a urychlí se práce na družicích bloku III. Měly by přinést rozšíření nosných frekvencí na tři, C/A kód by měl být vysílán i na frekvenci L2, bude přidán speciální F-kód.
- **Blok III** – tyto družice jsou zatím ve fázi návrhů. Probíhá diskuze o tom, jaké na ně budou kladeny nároky a jak by měly zlepšit systém GPS.

1.4 Struktura systému GPS

Jak již bylo řečeno v obecné struktuře družicových polohových systémů, je GPS tvořen třemi segmenty: kosmickým, řídícím a uživatelským.

1.4.1 Kosmický segment

Plně obsazený kosmický segment počítá s tím, že bude ve vesmíru 24 družic. Z toho je 21 funkčních a tři jsou záložní. Kromě nich je počítáno i se čtyřmi družicemi, které jsou v pohotovostním stavu na Zemi a je možno je vypustit během 48 hodin. Oběžné dráhy družic jsou kruhové a svírají s rovníkem úhel přibližně 55 stupňů. Družice po této dráze oběhnou zemi za 11 hodin a 58 minut (polovina siderického dne). Oběžných drah je šest, každá je osazena čtyřmi družicemi. Teoreticky toto uspořádání garantuje viditelnost minimálně čtyř družic na kterémkoli místě na Zemi a to celých 24 hodin denně. U těchto družic je potřeba zhruba jednou ročně provést opravu jejich oběžných drah a dvakrát ročně doplnit plynové trubice pohánějící atomové hodiny. Jinak družice pracují nepřetržitě, dokud nedojde k zásadním poruchám a jejich následné náhradě. Důvodem nutnosti úprav oběžné dráhy jsou její změny způsobené nepravidelnostmi ve sluneční aktivitě, změny gravitačního pole Země atd.

1.4.2 Řídící segment

Řídící segment spravuje celý systém GPS. Skládá se z pěti pozemních monitorovacích stanic (tři z nich jsou zároveň i vysílacími), které provádějí permanentní pozorování družic kosmického segmentu. Kontrolují jejich oběžné dráhy a vysílají družicím zprávy o jejich změnách. Družice si na základě toho opraví tzv. navigační zprávu vysílanou uživatelům (více viz níže). Stanice se nacházejí na velkých vojenských základnách armády USA po celém světě (Havaj -monitorovací, Kwajalein –vysílací/monitorovací, Diego Grácia - vysílací/monitorovací, Ascension –vysílací/monitorovací, Colorado Springs -zde je hlavní řídící stanice).

Dalším důležitým údajem, sledovaným řídícím segmentem, je palubní čas jednotlivých družic. Stanice ho monitorují a případně provedou korekci palubních hodin. Tento systém je schopen předávat aktualizované údaje družicím až několikrát denně. Vlastní monitorovací stanice, kromě stanice hlavní, jsou bezobslužné. Tvoří je velice přesný GPS přijímač s vlastními atomovými hodinami, ten provádí neustálá měření na družice v jeho dosahu. Data jsou pak odesílána na hlavní stanici a tam se zpracovávají a vyhodnocují nové efemeridy družic a korekce hodin. Vysílací stanice je poté odešle zpět na příslušnou družici. Přesnost určených efemerid je přibližně 1,5 metru. Existují i zdlouhavější postupy schopné určit oběžné dráhy s přesností až 3 cm. Monitorovací stanice sledují družice po 92 % času.

1.4.3 Uživatelský segment

Tvoří jej jednotlivé GPS přijímače, uživatelé a vyhodnocovací nástroje a postupy měření, usnadňující a rozšiřující možnosti využití polohového systému. Konkrétní podoba je vždy dána možnostmi jednotlivých uživatelů, technickými omezeními a možnostmi kosmického segmentu. Přijímače mohou provádět na základě přijatých signálů z družic předběžné výpočty polohy, rychlosti a času. Proto je vhodné použití: pro navigaci, určování polohy, zeměměřictví, určování přesného času, k výzkumným úkolům i pro jiné účely.

Navigace se uplatňuje především v řízení dopravních prostředků a v turistice. Pro přesná měření, využívaná geodety, je potřeba většinou dvou nebo více přijímačů. Dalším z využití jsou vědecké pokusy při sledování vlastností atmosféry či pohybu geologických útvarů a litosférických desek. V neposlední řadě mohou sloužit přijímače GPS jako zdroje velmi přesného času a kmitočtu pro různé potřeby jako je telekomunikace, energetika atd.

1.5 Signály vysílané družicemi GPS

Každá družice kosmického segmentu GPS nese na své palubě velmi přesné atomové hodiny, které slouží jako generátor základní frekvence f_0= 10,23 MHz pro signály vysílané družicemi. Veškeré vysílané signály mají odvozenou frekvenci od této základní. Bylo pamatováno na to, aby se eliminovaly relativistické efekty na šíření signálu.

Vysílací frekvence jsou prozatím dvě, s označením L1 s L2, ale v nastupující generaci družic bude zabudována ještě frekvence třetí L3. Dále jsou tyto základní frekvence modulovány také dálkoměrnými kódy. Těmto kódům se říká PRN (PRN – angl. Pseudo Random Noise). Přehled vysílacích frekvencí a jejich modulací vypadá takto (obr.1):

- Frekvence L1 (1575.45 MHz, vlnová délky 19cm) modulována dvěma PRN kódy. P-kód (P-code angl. Precision), který je vojenský a může být zašifrován (a pak se označuje Y-kód) a hrubý/dostupný nebo též C/A kód (angl. Coarse/Acquisition nebo C/A code). Dále je zde binární kód navigační zprávy kódovaný na základě fázových posunů nosných vln.
- Frekvence L2 (1227.60 MHz, vlnová délka 24 cm) modulovaná pouze P-kódem (resp. Y-kódem), ovšem výhledově je počítáno s C/A kódem. Dále se zde též přenáší navigační zpráva.

1.5.1 C/A kód

Tento kód je vysílán každou družicí systému GPS a pro jednotlivou družici je vždy unikátní. Tyto unikátní kódy jsou označovány jako PRN kódy nebo také pseudonáhodné. Kód je binární, jeho délka je určena tak, aby perioda opakovaného vyslání kódu byla přesně 1ms,

tomu odpovídá posloupnost 1023 nul a jedniček, při frekvenci $f_0/10 = 1{,}023$ Mhz. Vlna celého kódu s touto periodou je dlouhá 293 m.

1.5.2 P-kód

Jde opět o binární kód, tentokrát ovšem mnohem delší než C/A kód. Je vysílán s frekvencí $f_0 = 10{,}23$ Mhz a jeho délka měří 38,058 týdne. Existuje ovšem pouze jeden, a proto je rozdělen do sedmidenních sekvencí a každá z družic vysílá v jednom týdnu jinou sekvenci kódu než ostatní, aby došlo k odlišení družic na základě přijímaných signálů. P-kód umožňuje přesnější měření než C/A kód díky své vyšší frekvenci a délce a také díky tomu, že je vysílán na obou frekvencích L1 a L2, což zmenšuje ionosférické vlivy.

1.5.3 Y-kód

Tento kód je zašifrovaný P-kód. Jedná se opět o PRN kód, který lze použít místo P-kódu. Rovnice na dekódování Y-kódu jsou tajené a skoro výhradně pro vojenské potřeby USA. Faktem je, že v současné době systém GPS vysílá Y-kód téměř nepřetržitě.

Obrázek 1: Zdroj [8]

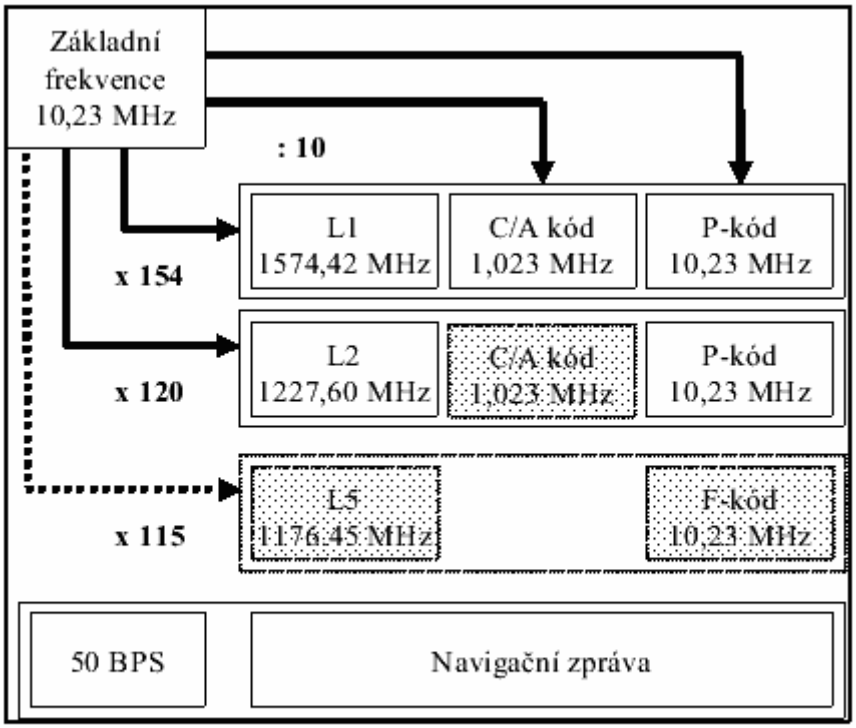


Schéma odvozování frekvencí jednotlivých signálů GPS - tečkovaně jsou vyznačeny civilní signály připravované v rámci modernizace

V rámci modernizací systému GPS se počítá s tím, že bude zavedena nová nosná frekvence L5 s frekvencí 1176.45 MHz a na ní namodulován F-kód, což by měl být kód velmi podobný P-kódu, ale přístupný veřejnosti.

1.5.4 Navigační zpráva

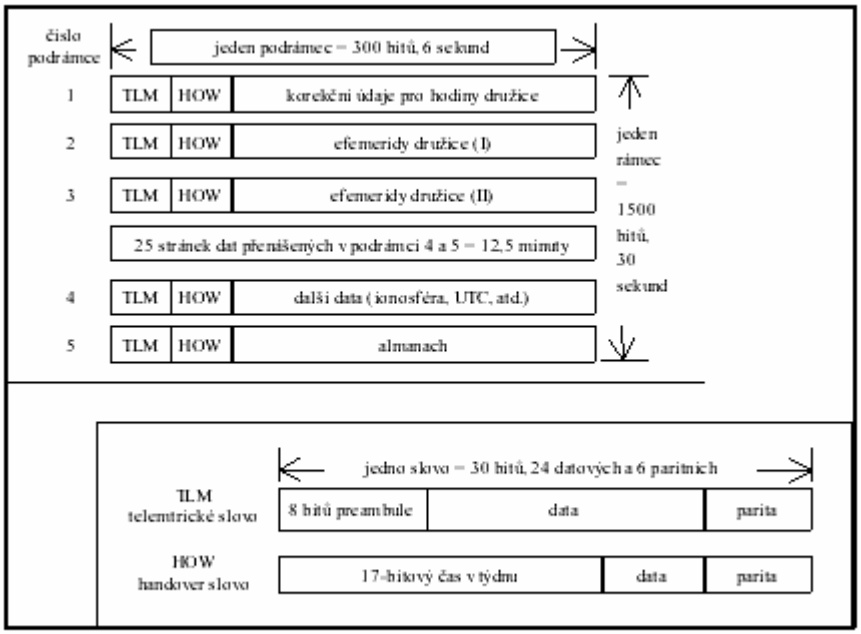
Pro vyřešení úlohy určení polohy přijímače při měření je třeba znát co nejpřesnější polohy družic (efemeridy) použitých pro měření, aby bylo možné protnutím určit polohu přijímače. Také je třeba zajistit uživateli informace o stavu systému. Proto je na nosné

frekvence modulována také navigační zpráva. Jedna navigační zpráva platí po dobu čtyř hodin a obsahuje dle [8] tyto části :

- **čas vysílání počátku zprávy**
- **keplerovské efemeridy družice-** určují polohu družice na oběžné dráze Země s přesností cca. 3,5 m
- **údaje umožňující přesně korigovat čas vysílání družice-** napomáhají při opravách chyb hodin družice a upřesňují čas odvysílání PRN kódu.
- **almanach**.- obsahuje méně přesné údaje o ostatních družicích sytému GPS, jejich poloze, stavu atp. Tyto údaje poté pomáhají při měření pro plánování měření (aby bylo v daném terénu nad horizontem dostatečné množství družic), rychlejší inicializaci přístroje nebo pro usnadnění vyhledání přístroji dostupných družic během měření.
- **koeficienty ionosférického modelu**. Jedná se o předdefinovaný matematický model ionosféry, který lze využít pro výpočet oprav. Nepodává ovšem tak dobré výsledky jako měření na dvou frekvencích.
- **stav družice (angl. health) a další systémové údaje**

Struktura navigační zprávy je znázorněna na obr. **2.**

Obrázek 2: Zdroj [8]



Struktura navigační zprávy GPS

1.6 Přijímač GPS

Přijímače GPS jsou již součástí uživatelského segmentu GPS. Jejich hlavním úkolem je zpracovávat signály vysílané družicemi tak, aby na výstupu poskytovaly užitečnou informaci. Základní podmínkou je přesná poloha přijímače a přesný čas měření. Z těchto dvou údajů lze odvodit mnoho dalších veličin, jako je rychlost pohybu, trajektorie atd. Přijímač GPS tvoří tři základní bloky viz [8] resp. [16] :

- **anténa**

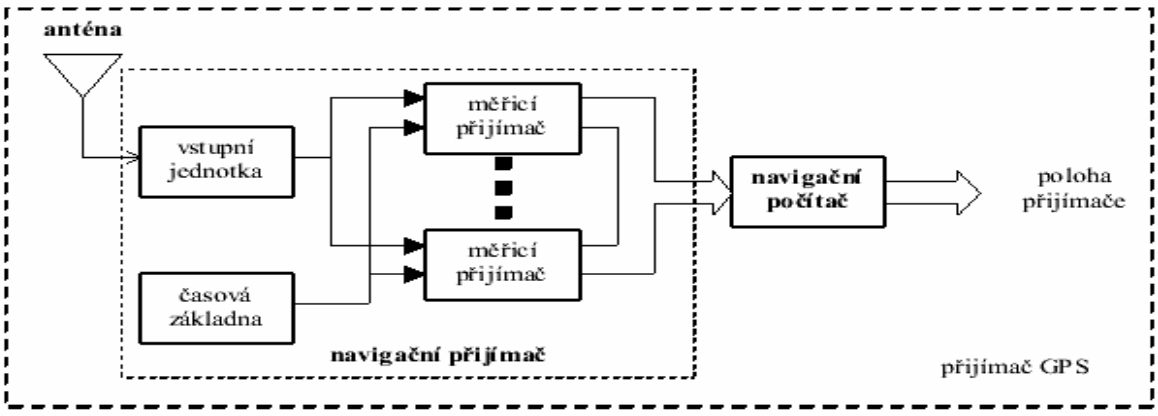
- **navigační přijímač**
- **navigační počítač**

Anténa je zásadní pro co nejpřesnější určení naměřených veličin. Vzhledem k tomu, že družice vysílají poměrně slabé signály, jsou důležité parametry její citlivosti, odolnosti vůči rušení a odfiltrování odražených signálů. U geodetických antén, kde zároveň požadujeme vysokou přesnost měření, se sledují také parametry polohy a stability fázového centra antény. V neposlední řadě jde také o cenu antény. V dnešní době stojí celý geodetický přístroj od zhruba 150 000 Kč až po několik milionů korun právě na základě těchto charakteristik.

Navigační přijímač slouží k zpracování signálů přijatých anténou. Na základě těchto zpracování se určují pseudovzdálenosti a obsah navigační zprávy. Zde vyvstává několik problémů a jednotlivé přijímače se od sebe liší právě tím, jak tyto problémy řeší. Pro správné určení polohy je potřeba měřit na více družic, a proto je vhodné, aby přijímač měl více vstupních kanálů. Dle tohoto kritéria jsou přijímače děleny na:

- **Jednokanálové**- u těchto přijímačů nelze přijímat signály z více družic, a proto je třeba rychle mezi nimi přepínat. Přijímač vždy identifikuje pomocí PRN kódu družici, provede nezbytná měření a začne vyhledávat další. Tento způsob není příliš efektivní a nepřináší dobré výsledky.
- **Vícekanálové**- mají dostatečný počet přijímacích kanálů (u dnešních geodetických přijímačů běžně okolo osmi až dvanácti), a tak mohou přijímat signál z více družic najednou. Měření je díky tomu mnohem rychlejší, spolehlivější a přesnější, protože je možno určovat nadbytečné údaje. Tyto přijímače umožňují měření i za ztížených podmínek.
- **Hybridní**- jsou sice vybaveny pouze několika vstupními kanály, ale jejich počet není dostatečný. Proto je využíváno opět přepínání mezi jednotlivými družicemi na jednom kanále. Tento způsob představuje jakousi střední cestu mezi předchozími dvěma způsoby.

Obrázek 3: Zdroj [8]



Struktura přijímače GPS

Navigační počítač zpracovává naměřená data a určuje na jejich základě aktuální polohu přijímače, čas GPS a další veličiny. Zde již zcela záleží na libovůli výrobce a přání zákazníků na komfort a výsledné veličiny přístroje.

2 Současný stav existujících aplikací

2.1 Principy měření

Jak již bylo uvedeno, jsou dnes budovány družicové polohové systémy pasivního charakteru. Přijímač určuje svou vzdálenost z vysílání jednotlivých družic kosmického segmentu. Svoji polohu určuje protínáním. Měřené vzdálenosti lze určovat na základě:

- **kódových měření**
- **fázových měření**
- **dopplerovských měření** (tento způsob se v GPS běžně nevyužívá, proto jej zanedbán)

2.1.1 Kódová měření

Kódové měření se využívá při určování vzdáleností mezi přijímačem a družicemi pomocí dálkoměrných kódů vysílaných jednotlivými družicemi. Tyto kódy slouží jako přesné časové značky umožňující určit čas, kdy byla odvysílána kterákoliv část signálu. Přijímač v příchozím signálu identifikuje dálkoměrný kód příslušné družice, zjistí čas odeslání a přijetí jedné sekvence kódu. Z toho určí časový rozdíl Δt_i a vzdálenost mezi přijímačem a družicí d_i dle vztahu:

$$d_i = \Delta t_i . c \ ,$$

rovnice 3

kde c je rychlost šíření radiových vln.

Kde hodiny přijímače nejsou zcela synchronní s časem systémovým, je hodnota Δt_i zatížena chybou hodin přijímače. Tím je způsobeno to, že neurčíme výpočtem skutečnou vzdálenost, ale tzv. zdánlivou vzdálenost (angl. pseudorange).

Při odvození reálně dosažitelné přesnosti pro kódová měření berme v úvahu, že frekvence dálkoměrných kódů je v úrovni jednotek megahertz pro frekvenci L1 a desítek megahertz pro frekvenci L2. Vlnové délky, odpovídající těmto frekvencím, jsou 300 m resp. 30 m. V [8] se udává reálně dosažitelná přesnost měření 1 - 2 % vlnové délky (vychází se z praktických zkušeností), a tak vychází reálně dosažitelná přesnost v prvním případě 3 až 6 m, v druhém případě 0,3 až 0,6 m. Ovšem jedná se pouze o chybu zpracování dálkoměrného kódu, další chyby jako je prostředí, nepřesnosti hodin apod. zde započteny nejsou, a pokud není provedena jejich eliminace, je výsledná přesnost samozřejmě horší.

2.1.2 Fázová měření

Zatímco u kódových měření se snažíme získat informaci namodulovanou na nosnou vlnu vysílanou družicí, u fázových měření zpracováváme samotnou nosnou vlnu. Snažíme se spočítat počet vlnových délek mezi přijímačem a družicí, která vysílá signál. Zůstává zde ještě část posledního kmitu vlny, ten jsme schopni určit s dostatečnou přesností přímo v přijímači. Celý problém se nám tím zmenší pouze na určování počtu celých vlnových délek. Tento pojem se nazývá celočíselná nejednoznačnost (angl. ambiguity).

Pro řešení nejednoznačnosti existuje celá řada metod a pracovních postupů. Konkrétní řešení je závislé na druhu a kvalitě používaného vybavení a jeho řídícího softwaru. Ovšem jakmile je jednou nejednoznačnost určena, je již přijímač schopen sledovat změny ve fázi nosné vlny, a tím i případnou změnu své polohy a z toho odvoditelné další veličiny, např. rychlost, trajektorie a jiné.

Pokud se přeruší plynulé sledování nosné vlny, dojde k tzv. fázovému skoku a přijímač již není schopen dále sledovat a určit svou polohu. Musí se k opětovně určit celočíselné nejednoznačnosti. Výpadek nastává v důsledku odstínění signálu (terénní překážkou, vegetací, obsluhou) nebo v důsledku přílišného oslabení signálu a jeho ztrátě v šumu.

Přesnost fázového měření je závislá na vlnové délce zpracovávané nosné vlny. Opět předpokládejme chybu zpracování signálu v přijímači 1 - 2% vlnové délky. Vlnová délka je rovna řádově několika málo desítkám centimetrů. Na základě toho lze říci, že přesnost určení vzdálenosti mezi přijímačem a družicí bude řádově milimetrová, ovšem platí to samé jako u kódových měření, a sice že do odhadu chyby není zahrnuta chyba hodin přijímače, atmosférické vlivy a další opravy.

2.2 Metody měření a vyhodnocování

Obecně to jsou :

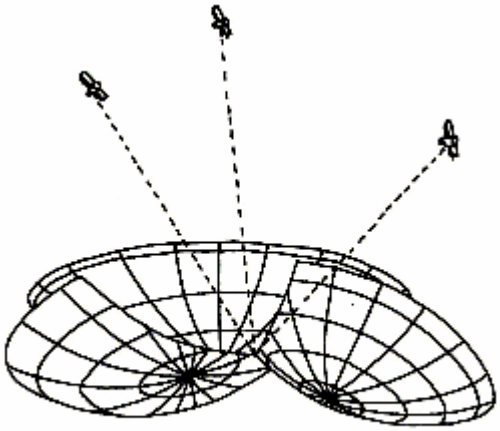
- **Určování absolutní polohy přímo v terénu**
- **Určování relativní polohy**
- **Přesná geodetická měření**

2.2.1 Určování absolutní polohy přímo v terénu

Pomocí kódových měření nebo fázových měření lze určovat délky na družice. Absolutní poloha přijímače je poté odvoditelná z těchto naměřených délek. Jde nám o polohu v 3-D prostoru, proto je teoreticky potřeba tří naměřených délek, jejichž protnutím získáme polohu v prostoru.

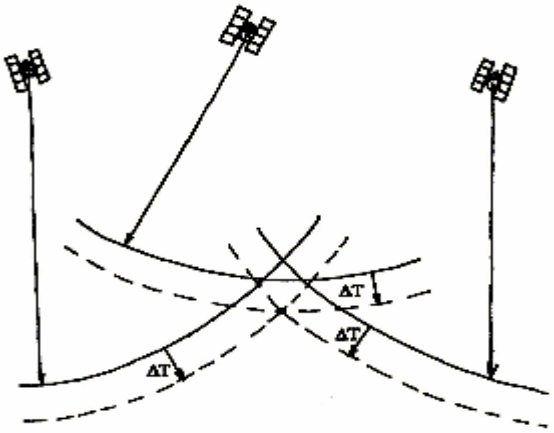
Ovšem, jak jsem již uvedl, u jednotlivých metod měření jsou tyto délky zatíženy různými druhy chyb. U absolutního určení polohy lze eliminovat chybu synchronizace hodin. Opravu hodin na družicích zajišťuje řídící segment, proto zůstává otázkou pouze oprava hodin přijímače ΔT vůči systémovému času. Tento časový posun způsobí špatné určení vzdáleností na družice (určíme pouze pseudovzdálenosti). Chyba délek je rovna $c.\Delta T$. Proto se nám délky neprotnou v jednom bodě, ale pouze určí v prostoru oblast, kde se bude daný bod vyskytovat. Je proto nutné ΔT určit a provést opravu.

Obrázek 4: Zdroj [8]



Možné polohy přijímače vzhledem ke třem družicím - dva body

Obrázek 5: Zdroj [8]



Vliv časového posunu hodin přijímače na přesnost měření

Máme tedy čtyři neznámé X, Y, Z a ΔT. V původní soustavě (rovnice 2) jsou ovšem pouze tři rovnice, ty na určení čtyř neznámých nestačí. Je třeba zavést další rovnici do soustavy a tedy i určit čtvrtou pseudovzdálenost k další družici. Výsledná soustava pak vypadá takto:

$$
\begin{aligned}
r_1 &= \sqrt{(X - x_1)^2 + (Y - y_1)^2 + (Z - z_1)^2} - c.\Delta T \\
r_2 &= \sqrt{(X - x_2)^2 + (Y - y_2)^2 + (Z - z_2)^2} - c.\Delta T \\
r_3 &= \sqrt{(X - x_3)^2 + (Y - y_3)^2 + (Z - z_3)^2} - c.\Delta T \\
r_4 &= \sqrt{(X - x_4)^2 + (Y - y_4)^2 + (Z - z_4)^2} - c.\Delta T
\end{aligned}
$$

rovnice 4

Proměnné r_i znamenají naměřené pseudovzdálenosti. X,Y,Z jsou souřadnice přijímače. x_i, y_i, z_i jsou souřadnice družic, ΔT je chyba v synchronizaci hodin a c je rychlost světla. Neznámé, které určujeme, jsou souřadnice přijímače a ΔT.

Takto získáme souřadnice v systému WGS84 (a jeho následných zlepšeních). Převod těchto souřadnic do jiných, většinou národních systémů, se musí realizovat až následně. Přesnost absolutního určení polohy není příliš vysoká a je silně ovlivněna atmosférou i dalšími poruchami (viz níže). Její hodnota je udávána řádově v metrech.

2.2.2 Určování relativní polohy

Princip relativního určování polohy se užívá i u geodetických úloh. Ovšem zde se jedná o určování polohy na základě pouhého sledování dálkoměrných kódů. Při tomto způsobu určování polohy nejsou měřeny absolutní polohové souřadnice, ale určujeme polohu vzhledem k pevnému známému bodu, na kterém je umístěna další GPS aparatura. Ta je nazývána referenční.

Referenční aparatura také určuje svoji pozici absolutně, a tím že zná své správné souřadnice, může určit opravné korekce souřadnic získaných z absolutního měření. Tyto korekce jsou buď v reálném čase předávány do přijímače používaného pro měření nebo jsou použity až při následném zpracování měření v kanceláři (angl. postprocesing).

Tato metoda předpokládá, že podmínky měření jsou u obou používaných přístrojů stejné a měření jsou tedy zatížena stejnými chybami, které se formou korekcí opraví. Touto metodou lze dosáhnout přesnosti až několik decimetrů u kódových měření a milimetrovou přesnost u fázových měření.

2.2.3 Přesná geodetická měření

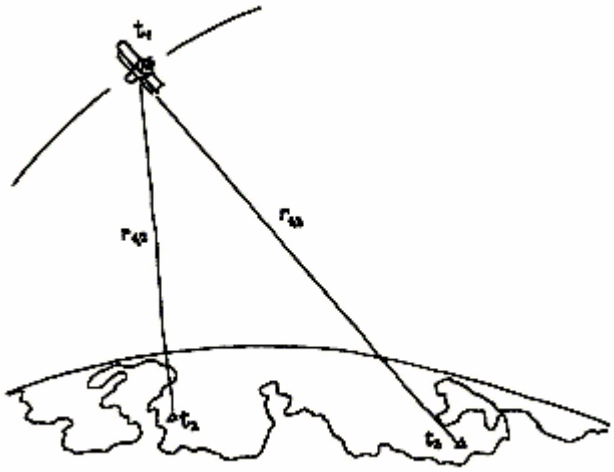
Zde se dostáváme k způsobům využití GPS, který musí dávat polohovou přesnost na centimetry. Toho již nelze dosáhnout použitím dálkoměrných kódů. V geodézii se využívá měření fázových. Dálkoměrné kódy jsou využívány doplňkově v některých postupech řešení celočíselné nejednoznačnosti.

Používané metody měření jsou vždy relativní a je nutno použít dvou a více přijímačů GPS. Ty zaznamenávají data v epochách, předem definovaných časových intervalech (1s, 15s apod.). Vždy se měří na co největší počet družic, nejméně však na čtyři. Data jsou poté zpracovávána počítačově pomocí specializovaných softwarů, jedná se o post processing. Pouze u metod jako je RTK (angl. Real Time Kinematics, více viz kapitola 3.1) jsou data zpracovávána v reálném čase a jako výsledek měření dostáváme hotové souřadnice.

Způsob vyhodnocení naměřených GPS dat pro geodetické účely probíhá u měření relativního vektoru mezi dvěma přijímači následujícím způsobem:

V měřených datech se vyhledají epochy, ve kterých bylo měřeno oběma přijímači na stejnou družici. Pro toto měření spočítáme jednoduché diference. Jedná se o diference mezi fázovými měřeními provedenými dvěma přijímači k jedné družici ve stejné epoše. Pak můžeme s vysokou nominální přesností (kolem 3mm) určit rozdíly vzdáleností mezi družicí a dvěma stanicemi pro stejný čas. Tyto diference eliminují vliv chyb hodin družice, ve velké míře eliminuje nepřesnost efemerid družice a také vliv troposféry a ionosféry [2].

Obrázek 6: Zdroj [8]



Jednoduché diference

Chybu hodin družice popíšeme takto: předpokládejme nejprve, že hodiny družice i přijímače jsou skutečně synchronní a zanedbejme vliv prostředí na šíření signálu, protože to, co skutečně svazuje všechny tři segmenty družicového polohového systému, je pouze přesný čas. Řídící segment představuje časový normál a předává ho dál do kosmického segmentu. Družice kosmického segmentu pak vysílají signály s časovou značkou podle tohoto času. Uživatelský segment je přijímá a za předpokladu, že má systém dobře fungovat, musí používat stejný čas jako segment kosmický. Toto ovšem v praxi neexistuje. Družice mají atomové hodiny, které jsou ještě k tomu kontrolovány a průběžně kalibrovány řídícím segmentem, přesto i tak jsou zatíženy určitou chybou. Naproti tomu hodiny v přijímačích uživatelů používají hodiny s křemíkovým krystalem, které mají o mnoho horší přesnost a nejsou kalibrovány, zde již dochází k podstatnějším chybám.

Další postup zpracování jsou dvojité diference. Počítají se jako rozdíl dvou jednoduchých diferencí, neboli musíme měřit v jedné epoše současně dvěma aparaturami na dvojici družic. Tento druh diferencí je téměř nezávislý na chybě hodin přijímačů. Také je v praxi nejčastěji používán pro měření krátkých (do 50 km) a středně dlouhých (do 500 km) základen.

Výpočet diferencí může pokračovat i dál. Lze počítat trojité (používané pro dlouhé základny) i další diference. Počet počitatelných diferencí je omezen pouze počtem současně sledovaných družic a počtem vstupních kanálů aparatur. V praxi se ale nejčastěji používají dvojité diference, a to díky tomu, že výsledky jsou robustnější.

Další z výhodných postupů zpracování je vytvářet různé kombinace měření kódových a fázových. Je tak snadnější a rychlejší určit počáteční celočíselnou nejednoznačnost. Pak je také možno lineárně kombinovat měření na frekvencích L1 a L2. Tyto kombinace lze definovat vztahem $L_i = a_i.L_1 + b_i.L_2$, kde L_1, L_2 jsou původní měřené veličiny na

odpovídajících nosných vlnách; a_i, b_i jsou koeficienty kombinace. Používané koeficienty jsou viz [2] :

Tabulka 1: Lineární kombinace nosných frekvencí L1 a L2

Lineární kombinace	Vlnová délka	Koeficienty kombinace		Užití pro měření	
		a_i	b_i	kódová	Fázová
L_1	19 cm	1	0	ano	ano
L_2	24 cm	0	1	ano	ano
L_3	0 cm	2,5	-1,2	ano	ano
L_4	∞	1	-1	ne	ano
L_5	86 cm	4,5	-3,5	ne	ano

- L_1, L_2 jsou původní fázová (kódová) měření na nosných kmitočtech L_1, L_2 (výhodou je jejich velmi malý měřický šum)
- L_3 je tzv. *narrow-lane* lineární kombinace zbavená vlivu ionosférické refrakce, nevýhodou je větší měřický šum (cca trojnásobně větší než u původních měření L_1 a L_2)
- L_4 je lineární kombinace nezávislá na geometrii družic a chodu přijímačových hodin.
- L_5 je tzv. *wide-lane* lineární kombinace s větší vlnovou délkou (čtyřnásobně větší než původní kmitočty), a tak je vhodná například pro řešení ambiguit

2.3 Určování polohy a času

Primárním úkolem systému GPS je určovat polohu a čas. Pro jakékoliv určování polohy platí, že tato poloha musí být vztažena k nějakému souřadnicovému referenčnímu systému. To samé platí pro určování času, zde je ovšem čas určen vzhledem k časové škále.

2.3.1 Souřadnicový systém

Samotný systém GPS je složen ze tří segmentů. Pro uživatelský a řídící segment jsou používány geocentrické souřadnice a pro kosmický užíváme souřadnice vztažené ke středu sluneční soustavy. Mezi těmito systémy je nutné provádět transformace. Tento problém se běžného uživatele systému netýká, jsou řešeny provozovatelem systému.

Samotný systém GPS poskytuje souřadnice vztažené k světovému geodetickému sytému WGS-84 a jeho následným zpřesněním WGS 84(G730) a WGS 84(G873) [11-1]. Tato diplomová práce je zaměřena na problémy katastru nemovitostí a problémy geodetických měření. Tato jsou prováděna relativními metodami, a proto nejsou tato měření závislá na souřadnicovém systému. Lze je připojit k jakémukoliv nadefinovanému systému. V případě katastru nemovitostí jde potom o systém S-JTSK a ETRS89 (více viz níže).

2.3.2 Čas GPS

Počítání času pro systém GPS je řízeno velmi přesnými hlavními atomovými hodinami. Podle těchto hodin jsou opravovány atomové hodiny na jednotlivých družicích. Počítání GPS času započalo 5. ledna 1980 v 24:00:00 a je počítáno v sekundách a týdnech uplynuvších od tohoto okamžiku. Tento čas je synchronizován s UTC s tím rozdílem, že není opravován vzhledem k rotaci Země.

Družicový čas je primárně řízen hodinami na družici, ale zároveň je sledován pozemními stanicemi, aby odchylka od systémového času nepřesáhla jednu milisekundu. Korekce družicových hodin jsou uloženy do navigační zprávy.

2.4 Faktory ovlivňující přesnost systému GPS

Kromě přesnosti, která je dosažitelná z principu měření pomocí GPS, jsou zde ještě jiné faktory, které v konečném výsledku ovlivňují měření. Jedná se převážně o tyto faktory:

- **řízení přístupu k signálům z družic (selective aviailability)-** Možnost Ministerstva obrany USA zavést systematickou chybu GPS. V současné době je toto opatření mimo provoz.
- **stav družic**- V družicích je zabudován systém automatické kontroly technického stavu. V případě, že některé ze zařízení důležitých pro správný chod systému GPS neplní dobře svou funkci, je družice označena jako nezdravá a přijímače ji vyřadí z měření. Také je takto označována družice, která není přesně na své stanovené oběžné dráze, například v důsledku umisťování nové družice, v případě manévrování s družicí, v případě zavádění nových korekcí hodin atd.
- **poměr signál/šum**- Signály vysílané družicemi GPS jsou poměrně slabé. Proto jsou velmi citlivé na rušivé vlivy, které vnášejí šum do užitečného signálu. Zdroje šumu jsou například vegetace, terénní překážky, zdroje elektromagnetického vlnění, nadzemní rozvody elektrické energie atd.
- **vícecestné šíření signálu**- Signál šířený družicemi nemusí dorazit k přijímači vždy přímou cestou. Může se po cestě odrazit od objektů v okolí přijímače. Poté dochází k interferenci mezi tímto přímým signálem a odraženým a k následné chybě měření. Záleží na schopnostech antény, jak dokáže tento vliv eliminovat.
- **počet viditelných družic**- Jak již bylo uvedeno výše, je pro měření nezbytné přijímat signál alespoň čtyř družic, pokud je možné jich sledovat, více není měření ohroženo ztrátou signálu některé z nich. Jestliže se jedná o fázová, měření je větší počet naměřených signálů z různých družic vhodný pro určování diferencí, a tím k zpřesňování měření.
- **geometrické uspořádání viditelných družic**- Měření pomocí GPS poskytuje výrazně horší výsledky, pokud jsou použitelné družice relativně příliš blízko u sebe nebo ve špatné geometrické konfiguraci vzhledem k přijímači. Vlivem chyby synchronizace hodin nejsou vzdálenosti naměřené k jednotlivým družicím přesné, ale zatížené chybou, která způsobí, že přijímač vzhledem k družici neleží na sféře, ale v prostoru rozdílu dvou koulí. Takto je to u každé z použitých družic. Uděláme-li průnik všech těchto prostorů, zjistíme, že měřený bod neleží v jednoznačném průniku (viz obrázek (6)). Poté již záleží na tom, jak je prostor tohoto průniku veliký, abychom určili jakou chybou ovlivní naše měření. Toto lze matematicky ohodnotit. Z toho důvodu byl zaveden parametr snížení přesnosti, neboli DOP (angl. Dilution Of Precision, doslovný překlad je ovšem rozložení přesnosti). DOP je definován jako poměr střední chyby v souřadnici, v poloze, v čase apod. ke střední chybě σ_0 měření zprostředkující veličiny. Je zavedeno několik druhů těchto parametrů. Obecně ovšem platí, že čím menší hodnota parametru DOP, tím přesnější je měření. Parametrů DOP je několik, každá měřená veličina má jiný parametr (viz [9]):

  - $GDOP = \left(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + c^2\sigma_T^2\right)^{1/2} / \sigma_0$ **geometrický** **(rovnice 5)**

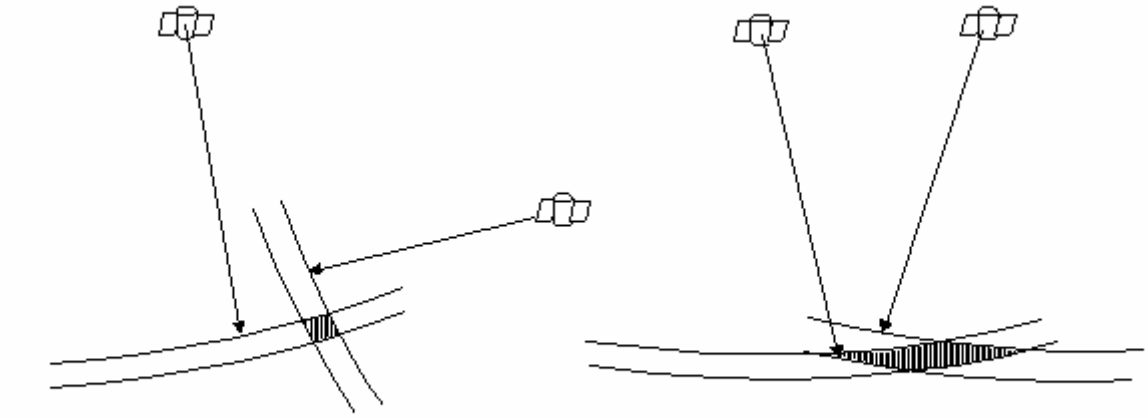
- $PDOP = \left(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2\right)^{1/2} / \sigma_0$ **polohový** **(rovnice 6)**
- $HDOP = \left(\sigma_x^2 + \sigma_y^2\right)^{1/2} / \sigma_0$ **horizontální** **(rovnice 7)**
- $VDOP = \sigma_z / \sigma_0$ **vertikální** **(rovnice 8)**
- $TDOP = c\sigma_T / \sigma_0$ **časový,** **(rovnice 9)**

kde σ_i jsou střední chyby souřadnic. Souřadné osy jsou v tomto případě definovány tak, že osy x a y jsou umístěny do vodorovné roviny, z do svislice vůči přijímači.

- **typ přijímače**- Podle účelu, pro jaký využíváme přijímač GPS, je i odvozena chyba, se kterou je možno s tímto přijímačem měřit. Geodetické přístroje vyžadují centimetrové přesnosti, proto musí být schopné používat fázová měření, mít větší počet vstupních kanálů, kvalitní anténu atd. Navigační přístroje mají naopak přesnost mnohem horší, proto lze některé věci omezit a používat třeba jen kódová měření a pod. Vždy záleží na druhu přístroje, který si chceme koupit, a ceně, kterou jsme ochotni zaplatit. U geodetických přístrojů je důležitá kvalitní anténa se stabilním fázovým centrem, dobrou schopností přijímat slabé signály z družic a schopností potlačit rušivé vlivy.
- **pečlivé plánování měření**- GPS měření jsou citlivá na geometrické uspořádání družic a na stínění signálu (například objektem, vegetací nebo terénem). Proto je na některých místech možno měřit pouze v určitou denní dobu. Existují specializované programy, které jsou schopné přibližně určit polohu družic na daném místě v danou dobu, a tím měření umožnit nebo usnadnit. Dalším faktorem jsou i atmosférické podmínky při měření. Například za bouřky jsou přesná měření GPS prakticky nemožná.
- **platnost efemerid**- Pro správné určení polohy přijímače je nutné ve výpočtu používat co nejpřesnější a nejaktuálnější dostupné efemeridy družic. Ty lze získat různými způsoby z navigační zprávy družice nebo z internetových stránek provozovatele GPS. Můžeme získat i efemeridy z almanachu (pokud nebyl zrovna aktualizován) v navigační zprávě nebo pomocí různých softwarů na jejich výpočet. U těchto efemerid nelze zaručit jejich platnost, protože mohlo dojít ke změnám v kosmickém segmentu GPS, které v nich nejsou podchyceny.
- **přesnost efemerid**- Efemeridy družic systému GPS jsou průběžně určovány řídícím segmentem. Tyto efemeridy jsou poté nahrávány na družice a jimi vysílány uživatelům. Takové efemeridy mají řádově decimetrovou přesnost. Lze získat i efemeridy přesnější, a to na zvláštní žádost u provozovatele systému. V celém systému bohužel neexistuje kontrolní mechanizmus, který by detekoval případné chyby v efemeridách vysílaných družicemi (například vlivem selhání družice nebo výpočtu v řídícím centru atd.), a proto je nutné toto ověřit jinak, třeba dvojím zaměřením bodů. Bohužel v případě například letecké navigace by mohlo dojít k tragickým následkům.
- **přesnost hodin na družicích**- Družice sice mají na palubě atomové hodiny, ale jejich přesnost není dostatečná. Navíc jsou opět opravovány řídícím centrem, proto opět hrozí selhání jako v případě efemerid.
- **vliv ionosféry a troposféry**- Tyto chyby se označují jako ionosférická a troposférická refrakce. Vliv ionosférické refrakce lze vyloučit použitím měření na dvou frekvencích, protože je průchod signálu ionosférou frekvenčně závislý. Také při měření dvěma přijímači lze tento vliv eliminovat použitím diferencí. Troposférickou refrakci lze velmi přesně modelovat a existují na to specializované softwary.
- **chyba hodin přijímače**- Tato chyba je řešena jako neznámá při určování polohy.

- **způsob měření a vyhodnocování-** Při použití speciálních technik měření a vyhodnocování lze výrazně zlepšit přesnost měření. Jedná se o relativní způsoby měření, diferenciální metodu měření neboli DGPS, metodu RTK, metodu virtuálních referenčních stanic neboli VRS a o použití pseudodružic. Dalším parametrem vyhodnocení GPS měření je použitá výpočetní metoda. Dnes jsou již tyto metody implementovány pomocí specializovaných softwarů. Je ovšem nutno používat kvalitní a prověřený software. Dalším vliv na přesnost má i transformace měřených veličin do národních referenčních systémů.
- **hrubé chyby**- jakékoli chyby obsluhy přijímače či chyby v samotném přístroji nebo použitém softwaru.

Obrázek 7: Zdroj [8]



Ukázka řezu objemem vymezeným kulovými plochami při dobré (vlevo) a špatné (vpravo) geometrii uspořádání družic

2.5 Aplikace GPS

- **turistika, cykloturistika**: navigace v neznámém terénu v kombinaci s mapou i bez ní, statistika o prošlé trase, času, rychlosti apod., možnost zaznamenání trasy a zajímavých míst po trase
- **doprava**: navigace po silnicích a cestách s mapou i bez ní, statistika max. a prům. rychlosti, možnost ukládání trasy se zpětnou navigací, ukládání svých vlastních bodů a tras
- **letecká doprava**: navádění letadel, vytváření leteckých map, alokace černých skřínek
- **UL létání, paragliding**: navigace za letu, záznam proletěné trasy pro vyhodnocení letu na závodech
- **námořní doprava**: navigace na moři buď s modely obsahujícími podrobné námořní mapy nebo ve spolupráci s papírovou mapou, funkce navigace zpět po projeté trase, alarm pro případ utržení kotvy, navigace "muž přes palubu"
- **potápění**: možnost zaměření zajímavých lokalit se zpětnou navigací s přesností na několik metrů
- **rybaření**: možnost záznamu míst na vodní ploše, kde je možné pravidelně vnadit a chytat ryby, při použití GPS ve spojení se sonarem možnost mapování rybích hejn a možnost vytvoření mapy pohybu ryb na vodní ploše
- **zemědělství, lesnictví, hydrologie, ekologie**: možnosti mobilního mapování, data pro analýzy, prostorová lokace zkoumaných jevů
- **botanika, zoologie, archeologie**: možnost protokolace nálezu kdekoliv na světě

- **geologie, geofyzika:** zaměření objektů ve volném terénu, navádění na plánované profily měření
- **meteorologie, klimatologie**: data pro výpočet předpovědí počasí, modely chování ionosféry
- **stavebnictví**: vytyčování, monitorování deformací
- **geodézie, mapování, GIS**: měřické práce, vyhledání trigonometrických, polygonových a jiných bodů, zaměřování prvků map s odpovídající přesností, sběr dat pro GIS, geodetické základy
- **státní správa, policie, zdravotnictví**: monitorovací a vyhledávací systémy, navigační systémy
- **logistika**: zaměření odběratelů a dodavatelů pro vytvoření logistického modelu
- **sběr dat**: propojení sběru databázových dat s pozicí objektu - možnost propojení na digitální mapu
- **výpočetní technika, komunikace**: časové servery - zdroj velmi přesného času (40 nanosekund, tj. 40.10^{-9} sec)
- **sledování pohybu vozidel a objektů**: GPS jako zdroj informace o pozici objektu.
- **bezpečnostní služby**: informace o pozici s možností napojení na bezpečnostní systém.
- **astronautika**: navádění a řízení kosmických letů, sledování polohy těles v blízkosti Země

3 GPS aplikace vhodné pro KN

Dnešní úkoly rezortu zeměměřičství a katastru nemovitostí otevírají mnoho možností pro aplikaci systému GPS. Jedná se především o tyto okruhy činností:

- **využití GPS a jeho aplikací pro mapování.**
- **využití GPS a jeho nadstaveb k budování a provozu geodetických základů.**

3.1 Aplikace GPS v mapování

Při vytváření map je nejzákladnějším faktorem měřítko vyhotovované mapy. Od něj je poté odvozena potřebná přesnost měření pro takovouto mapu. Rezort katastru nemovitostí se, podle nových pravidel, zcela výhradně zabývá tvorbou katastrálních map u nichž je nutná přesnost stanovena v Návodu pro správu a vedení katastru nemovitostí. Přesnost bodu v katastrální mapě, určeného geodetickým měřením, je zde charakterizována střední souřadnicovou chybou 14 centimetrů. Proto jsou pro potřeby katastru vhodná relativní fázová GPS měření, využívající zpřesňujících postupů, jako je metoda DGPS, RTK nebo VRS (budou popsány níže). Při mapování v hrubším měřítku např. 1:10000 by nám již stačila přesnost metrová. Postačující metoda měření by zde byla opět relativní ovšem pomocí kódových signálu GPS.

Výhody používání GPS v měřičství jsou dle [8] shrnuty takto:

- není vyžadována přímá viditelnost
- měření je nezávislé na počasí, denní i roční době (kromě nevhodnosti využití GPS za bouřky)
- při výběru míst pro měření nejsme vázáni na žádné existující geodetické sítě
- nepřetržitý provoz
- ekonomické výhody plynoucí z větší efektivnosti a rychlosti měření
- snadné dosažení geodetické přesnosti
- měření ve třech rozměrech.

Existují však i nevýhody, ke kterým patří:

- větší nároky na plánování měřické kampaně a na logistické zajištění
- musí být zajištěna přímá viditelnost oblohy, jakékoli překážky nelze tolerovat (nelze proto měřit v podzemí, v budovách, pod hustou vegetací apod.)
- trojrozměrné souřadnice určené přijímačem GPS musí být přepočítávány do národních referenčních systémů (polohových i výškových)
- přesnost GPS je často podstatně vyšší, než přesnost existujících zaměřených bodů
- vysoké vstupní náklady
- potřeba nových znalostí a zkušeností

Metody měření, absolutní i relativní, dělíme na statické, dynamické a kombinované, podle toho zda se přijímače během měření pohybují vzhledem k zemskému povrchu či nikoliv. Dále pak odlišujeme metody používající princip DGPS.

3.1.1 Statická metoda

Všechny přijímače použité při měření jsou v klidu vzhledem k zemskému povrchu. Při použití relativního způsobu měření se určují vektory spojnic určovaných bodů. Jedná se o velice přesný způsob měření s přesností souřadnic určovaného vektoru okolo 5mm+1ppm (tento údaj je závislý na výrobci přístroje, zde uvedená hodnota odpovídá běžnému průměru). Tento způsob je vhodný pro budování základních geodetických sítí, při národních a kontinentálních měřeních apod., měření takovýchto sítí je značně efektivnější a při určování delších vzdáleností je i přesnější než klasické metody. Přesnost metody je taková, že lze sledovat i tektonické pohyby bodů. Časový interval nutný pro měření je odvozen od délky základny viz. [9], informace jsou shrnuty do tabulky (2):

Tabulka 2: Observace základen statickou metodou

Základna (km)	Doba observace (min)
0,1 – 1	10 – 30
1,1 – 5	30 – 60
5,1 – 10	60 – 90
10,1 – 30	90 - 120

Lze měřit i delší základny, ovšem nestává se to v praxi tak často. Důležitou veličinou při GPS měření je také doba, za kterou se provede odečet měřených dat, tzv. epocha. Čím kratší jsou epochy, tím rychleji se provede úspěšná observace a výsledky jsou přesnější. Více viz tabulka (3).

Tabulka 3: Tabulka přesnosti statické metody, zdroj [12-3]

Frekvence	Délka základny [km]	Počet družic	Délka observace [min]	Přesnost [ppm]
STATICKÁ METODA MĚŘENÍ				
L1	1	4	30	5 - 10
		5	15	5 - 10
	5	4	60	5
		5	30	5
	10	4	90	4
		5	60	4
	20	4	120	3
		5	90	3
L1 + L2	50	4	10	1.0
	100	5	60	0.1
	500	5	120	0.1 – 0.01

3.1.2 Dynamická (kinematická) metoda

Jeden z přijímačů umístíme na bodě o známých souřadnicích a započneme měření. Mobilním přijímačem musíme na počátku měření určit svou hodnotu celočíselné nejednoznačnosti a zjištění výchozích souřadnic. Tento úkon je označován jako inicializace a trvá 5 až 10 minut. Zároveň se nastaví interval odečtu nových bodů. Poté se již stačí

s mobilním přijímačem přesunovat k nově měřeným bodům a přístroj již sám v daném intervalu zaznamenává nově změřené body. Přijímač sleduje změny fáze nosné frekvence, a tím i změny ve své poloze. Přesnost metody je 1 až 2 cm + 1 ppm (tento údaj je závislý na výrobci přístroje, zde uvedená hodnota odpovídá běžnému průměru), více viz tabulka (4). Po dobu měření je potřeba zajistit, aby nedošlo k přerušení sledování signálu z minimálně čtyř družic. Pokud by tato podmínka nebyla splněna, došlo by k fázovému skoku a museli bychom opět určit novou hodnotu celočíselné nejednoznačnosti a až poté pokračovat v měření.

Tabulka 4: Tabulka přesnosti kinematické metody, zdroj[12-3]

Frekvence	Délka základny [km]	Počet družic	Délka observace [min]	Přesnost [ppm]
KINEMATICKÁ METODA MŘENÍ				
L1	3	5	0.1	10
		5	3	3
L1 + L2	10	5	0.1	3

3.1.3 Kombinované metody

Spojují principy obou výše zmiňovaných metod. Přesnost statické a rychlost a flexibilnost kinematické metody. Jedná se o metodu STOP and GO, Rychlou statickou metodu a metodu RTK.

3.1.3.1 Rychlá statická metoda (angl. Fast static)

Velmi se podobá klasické statické metodě, potřebná doba observace je však podstatně nižší. Tohoto zkrácení bylo dosaženo díky rychlejšímu určování ambiguit, díky použití přijímačů schopných měření na dvou frekvencích s možností přijímání P-kódu nebo pomocí speciálních statistických postupů zpracování měření. Také je potřeba observace více než čtyř družic, jejichž výška nad horizontem je větší než 15 stupňů.

Měření pomocí rychlé statické metody potom vypadá takto:

- Máme přijímač se schopností zpracování P-kódu. Ten určí polohu z pseudovzdáleností s přesností větší než 10 cm. Poté již známe polohu dostatečně přesně, abychom snadno určili ambiguity, a tím i přesné polohy přijímače. Celý proces trvá několik minut.
- Pokud provádíme nadbytečná pozorování z většího počtu družic, lze využít statistických výpočtů k určení ambiguit (například algoritmus FARA – Fast Ambiguity Resolution Approach). Celý postup opět trvá několik minut a je závislý na počtu sledovaných družic a jejich konfiguraci. Vztah mezi počtem družic a dobou pozorování udává následující tabulka (5) viz [8]:

Tabulka 5: Závislost doby měření na počtu družic

Počet družic	Doba měření (min)
4	20 a více
5	10-20
6 a více	5-10

Jedná se o relativní způsob měření. Vzdálenost mobilní stanice od referenční by neměla překračovat 20 km [13]. Další podmínkou je dobrá konfigurace družic, proto by hodnota PDOP neměla překročit číslo 4. Pak bude přesnost určení souřadnic bodu 5 až

10 mm + 1 ppm (tento údaj je závislý na výrobci přístroje, zde uvedená hodnota odpovídá běžnému průměru). Dnešní technologická úroveň přístrojů a výpočetního softwaru umožňuje měřit i na větší vzdálenosti, ale tyto možnosti a hlavně jejich přesnost a spolehlivost nejsou prozatím podrobně prozkoumány. Například v [15] se mluví o měření na vzdálenost 38 km při délce observace 15 minut a délce epochy 30 vteřin. Výsledné souřadnice při takovémto měření mají střední souřadnicovou chybu do 9 cm v poloze a 12 cm ve výšce.

Jiné zhodnocení přesnosti je uvedeno v [12-3] viz tabulka (6). Byla použita nezávislá opakovaná měření GPS, rychlou statickou metodou.

Tabulka 6: Opakovatelnost určení základny rychlou statickou metodou, zdroj [12-3]

Délka základny [km]	Délka observace [min]	N [mm]	E [mm]	U [mm]
10	14	+4,0	-0,3	-3,1
	15	+1,9	-5,8	+14,3
	16	-10,4	+4,3	-9,7
	20	+4,6	+1,8	-1,5
10 - 20	14	-2,5	-3,2	+7,2
	15	+13,1	-1,9	+1,8
	16	-19,3	+1,3	+10,9
	20	+8,7	+3,9	+1,8
Střední chyba [mm]		14,4	3,2	7,6

3.1.3.2 Metoda STOP and GO

Tato metoda je někdy označována jako polokinematická. Pro počáteční inicializaci je využito měření v kinematickém režimu na koncových bodech známé základny nebo využití výměn antén mezi dvěma blízkými přijímači (5-10 m). Poté se na obou přístrojích zahájí měření v kinematickém režimu. Samotné měření probíhá stejně jako v kinematickém režimu s tím rozdílem, že měřič na podrobném bodě zapíná nové observování sám. Přesnost souřadnic podrobných bodů je potom 1 až 2 cm + 1 ppm (tento údaj je závislý na výrobci přístroje, zde uvedená hodnota odpovídá běžnému průměru).

Opět nesmí během celého měření dojít k přerušení signálu z družic. Pokud se tak stane, je potřeba se vrátit na poslední změřený bod a vykonat nové měření.

3.1.3.3 Metoda RTK (Real Time Kinematics)

Metoda RTK je dalším rozšířením kinematického způsobu měření. Tato metoda se ovšem liší svou velmi rychlou inicializací (za normálních podmínek okolo deseti vteřin) a možností určovat přesné souřadnice v reálném čase během měření. Referenční a mobilní stanice jsou mezi sebou propojeny výkonným komunikačním kanálem. Při začátku měření se pomocí statistického odhadu určí nejpravděpodobnější správné určení ambiguit. Poté je tento odhad zopakován, a pokud dojde k dobré statistické shodě mezi oběma odhady, je první z nich označen jako správné řešení. V případě, že by ke shodě, nedošlo je tento proces opakován.

Samotný výpočet souřadnic v reálném čase je zajištěn přenosem dat z referenční stanice do stanice mobilní pomocí komunikačního kanálu. Nedílnou součástí těchto dat jsou i opravné diference (viz metoda DGPS níže). Zde jsou zpracovávány a pokud je v mobilní stanici k dispozici i transformační klíč ze systému WGS84 do používaného národního

systému, dostáváme na výstupu celého procesu hotové souřadnice bez nutnosti jakéhokoliv dalšího zpracování.

Obecně udávaná maximální vzdálenost mezi referenční stanicí a mobilní stanicí je, v závislosti na výrobci, udávána okolo 10 km až 30 km. Poté je deklarována dosažitelná přesnost 5-10 mm + 1-2ppm, opět v závislosti na výrobci. Typická doba inicializace je udávána 10 vteřin, ovšem se zvětšujícím se vektorem nebo ztížením podmínek se tato doba prodlužuje. Praktické zkušenosti se systémy RTK však ukazují, že zásadní podíl na délce inicializace nemá délka vektoru, ale právě konkrétní podmínky na měřeném bodě. Délce inicializace musí odpovídat i periodicita odečtu a odeslání dat mezi referenční a mobilní stanicí.

Tato metoda našla v praxi značné uplatnění díky své efektivnosti a komfortu při měření. Mnoho výrobců dnes dodává RTK systémy s různou kvalitou parametrů. Například firma Leica (ale nejen ta) vyrábí přístroje schopné RTK měření do vzdálenosti až 30 km s deklarovanou přesností 25-65mm [12-1]. Velkou nevýhodou RTK sytému je nemožnost použití v členitém nebo zarostlém terénu a jeho pořizovací cena.

V referátu [12-1] je popsáno zajímavé testování RTK systému Leica, které charakterizuje obecné praktické zkušenosti mnoha uživatelů této technologie. Jsou zde prováděna měření vektorů délek od 4 km po 28 km. Každý vektor byl změřen třikrát, přitom střední souřadnicová chyba pro vektor 28 km vyšla 14 mm a průměrná délka inicializace byla okolo 20 vteřin. Nejvyšší střední souřadnicová chyba byla zjištěna u vektoru 14 km, její hodnota je 26 mm.

3.1.4 Metoda DGPS (Diferenciální GPS)

Metoda DGPS je vylepšením relativního způsobu měření. Používá se pro zpřesnění kódových i fázových měření. Je při ní využíváno minimálně dvou GPS přijímačů. Jeden slouží jako tzv. referenční stanice a je umístěn na bod o známých souřadnicích a druhým, mobilním, se provádějí samotná měření. Referenční stanice určuje takzvané diference, které jsou buď opravami pseudovzdáleností u kódových měření nebo opravami přímo naměřených souřadnic. Tyto diference jsou předávány do zpracování měření mobilní stanice a to buď až po samotném měření, jedná so o tzv. postprocessing, nebo v reálném čase. Pro účel předávání diferencí v reálném čase je třeba zřídit mezi referenční a mobilní stanicí komunikační kanál. V praxi se tento problém řeší mnoha různými způsoby. Nejpoužívanější je přenos pomocí mobilních sítí, družicových sítí, internetu nebo rádiových vysílaček.

3.1.4.1 Předávání diferencí v reálném čase

Pokud chceme aplikovat korekce v reálném čase, je potřeba předem určit, jak často bude provedeno odečtení nových korekcí. Rychlost odečtu korekcí by také měla odpovídat dynamice jevů ovlivňujících měření. Pokud se pohybujeme v těžkém terénu, kde často dochází k odrazům signálu a podobným rušivým vlivům, musí nové korekce včas tyto vlivy postihnout a opravit. Další požadavek na periodu odečtu korekcí klade také použitá metoda měření. Metoda RTK vyžaduje jednovteřinová data (data s periodou odečtu jedna vteřina) statické metody data dvacetivteřinová, ovšem kratší interval zvyšuje přesnost měření a snižuje dobu, po kterou je potřeba měřit na neznámém bodě.

3.1.4.2 Opravy pseudovzdáleností

Zde započne referenční stanice určovat pseudovzdálenosti k dostupným družicím. Vzhledem k tomu, že zná svou polohu, je schopna určit diference mezi naměřenými pseudovzdálenostmi a skutečnými vzdálenostmi od družic, vypočtených ze souřadnic stanice

a družic. Tyto diference jsou vlastně chybami v měření pseudovzdáleností a jsou určovány pro každou epochu měření. Epochou rozumíme předem domluvený časový interval, ve kterém se provádí odečet dat.

Druhým přístrojem se provádí samotné měření nových bodů. Pseudovzdálenosti měřené zde jsou zatíženy chybami, které silně korelují s chybami určenými referenční stanicí. Proto lze použít diference z referenční stanice pro opravu měřených pseudovzdáleností v dané epoše.

3.1.4.3 Opravy souřadnic

Pokud používáme fázových měření, neurčuje referenční stanice opravu pseudovzdáleností, ale přímo opravu naměřených souřadnic. Velkou nevýhodou je, že oprava musí být určena pro stejnou kombinaci družic, jakou používá mobilní stanice. Proto pro každou kombinaci čtyř družic v dohledu musí referenční stanice určit patřičné opravy. Dalším problémem je silná závislost fázových měření na ionosférické a troposférické refrakci. Z těchto dvou důvodů nesmí referenční stanice být příliš vzdálena od mobilní. Mezní vzdálenost nelze jednoznačně definovat vzhledem k značné náhodnosti veličin, které ji ovlivňují.

3.1.5 Síť referenčních stanic DGPS

Tato metoda našla v praxi široké uplatnění. Po celém světě se budují sítě permanentních referenčních stanic, které usnadňují a zpřesňují používání systému GPS. Permanentní síť je složena z přijímačů GPS umístěných trvale na známém bodě a nahrazuje druhý přistroj, který by jinak uživatel musel vlastnit a obsluhovat během měření a tím vlastní měření zefektivňují a zlevňují. Další funkcí permanentních stanic je kontrola integrity systému GPS. Pokud některé družice vysílají špatné údaje, jsou stanice schopny tyto chyby identifikovat a upozornit mobilní měřicí přístroj, aby danou družici vyloučil z měření.

Provozovatelé sítí referenčních stanic většinou zřizují řídící centrum takové sítě, kde se shromažďují data z jednotlivých stanic. Tato data pak poskytují uživatelům. Může jít buď o data pro postprocessing nebo zřizují různé dálkové přístupy pro poskytování dat v reálném čase (nejčastěji pomocí mobilních sítí nebo internetu).

Kamenem úrazu u sítě referenčních stanic bývá jejich hustota pokrytí daného prostoru. Referenční stanice musí určovat korekce ve stejném prostředí jako mobilní, aby bylo možné splnit předpoklad korelace mezi diferencemi. Zde je rozdíl mezi poskytováním korekcí pro fázová a pro kódová měření. Podle [9] pro kódová měření jsou použitelné korekce do vzdálenosti okolo 200 km, pro fázová měření je tato vzdálenost okolo 40 až 50 km.

Typická referenční stanice takovéto sítě se skládá z velmi kvalitního GPS přijímače, PC stanice, zajišťující správu a archivaci naměřených dat, a z komunikačního propojení. Sítě referenčních stanic mohou být vybudovány různými způsoby. Ty jsou shrnuty do tří modelů.

- **Centralizovaný model**- Sytém tvoří jednotlivé referenční stanice, které nejsou navzájem propojeny. Existuje pouze centrální (nebo také řídící) referenční stanice, ke které jsou ostatní připojeny. Data sbíraná referenčními stanicemi jsou na nich částečně archivována a předávána dál do řídící stanice. Ta zajišťuje kompletní správu dat a archivaci ze všech připojených stanic. Je schopná je výpočetně zpracovat a například predikovat přesnější efemeridy (bohužel je zde nebezpečí, že toho již nebude výpočtově schopna, vzhledem k tomu, že jí podléhá mnoho referenčních stanic). Nasbíraná data je potřeba distribuovat dál, a proto je hlavní stanice vybavena komunikačním rozhraním s uživateli systému, nejčastěji na bázi internetu.

- **Distribuovaný model**- Referenční stanice v tomto systému jsou propojovány mezi sebou tak, aby si sousední stanice mohly vyměňovat observační data mezi sebou. Každá z referenčních stanic provádí vlastní správu dat a zároveň má k dispozici i data z okolí a je schopna na základě těchto informací zpřesňovat poskytované korekce. Dlouhodobou archivaci dat poskytuje regionální řídící stanice. Ta je díky datům z jí podřízených stanic schopna zpřesňovat pozorování například výpočtem kvalitnějších efemerid než poskytuje sám systém GPS. Distribuce korekcí uživatelům probíhá na bázi regionálních stanic. Tento systém by byl spolehlivější než centralizovaný, protože nebude kladeno tolik úkolů na jedinou stanici.
- **Hybridní model**- Referenční stanice jsou propojeny k regionální stanici, kam pouze předávají data. Ostatní potřebné funkce jako komunikaci s uživateli, zpracování a archivace dat jsou řešeny na regionální řídící stanici (stejně jako u distribuovaného modelu).

Za optimální je považován distribuovaný model. Metoda DGPS je pomocná a zlepšuje přesnost jiných použitých metod. Její hlavní přínos je v oblasti zpřístupnění a zefektivnění GPS měření.

Pokud se sítí referenčních stanic má pokrýt souvislé území, je třeba vhodně určit maximální možnou vzdálenost mezi referenčními stanicemi v této síti. Jak už bylo řečeno, je metoda DGPS pomocná pro ostatní metody měření pomocí GPS. Proto je vzdálenost od referenční stanice určena také limitními parametry těchto metod. Například u rychlé statické metody je to 30-40 km. Při použití výkonných systémů RTK by vzdálenost referenčních stanic mohla být i větší (viz. výše popis metody RTK). Záleželo by na tom, jak výkonnou máme RTK aparaturu. Pokud by byla schopna měřit vektory až do 30 km, mohla by být vzdálenost referenčních stanic 60 km. Pokud by to bylo více, nemusely by být zmiňované metody pro měření vůbec použitelné nebo by mohlo dojít k zhoršení přesnosti či k prodloužení inicializačních časů metod.

3.1.6 Metoda VRS (Virtuální Referenční Stanice)

Tato metoda navázala na metodu DGPS a RTK. Předpokládá existenci sítě propojených referenčních stanic a centrálního řídícího střediska. Lze jich použít pro postprocessing. U metody RTK předpokládá existenci komunikačního kanálu mezi řídícím centrem a mobilní stanicí. Stanice určují korekce a jsou schopné je poskytnout řídícímu centru. Uživatel v terénu započne GPS měření a zaměří svou přibližnou polohu pomocí absolutního určení polohy, pro tuto přibližnou polohu se při postprocessingovém zpracování vygeneruje virtuální referenční stanice na základě interpolace z dat okolních referenčních stanic. Tato data si před zapracováním musíme obstarat z centrální řídící stanice. Všechny opravy jsou pak vztaženy k této virtuální stanici.

Pokud se při použití metody RTK připojí uživatel k řídícímu centru, kterému poskytne svou přibližnou polohu na základě absolutního určení pomocí GPS. Řídící centrum je poté schopné, ze znalosti této polohy a pomocí znalosti korekcí z okolních referenčních stanic, vygenerovat virtuální referenční stanici v blízkosti uživatele a jemu pak poskytnout korekce vztažené k této virtuální stanici.

Koncepce VRS se velice podobá centralizovanému modelu metody DGPS, je však vylepšena o možnost výpočtu virtuální referenční stanice. Její umístění v těsné blízkosti mobilní stanice má za důsledek zkrácení relativních vektorů, a tím jejich větší přesnost. Další podstatnou výhodou je zvětšení potřebného rozestupu mezi referenčními stanicemi. U sítě VRS je maximální vhodná vzdálenost okolo 70 km [12-2], to platí ale při použití kvalitního softwaru a vybavení.

Přesnost a využitelnost této metody byla testovány rezortem ČUZK, na jediný fungující VRS síti u nás. Jejím vlastníkem a provozovatelem je společnost by/S@T group a.s. Výsledky byly publikovány formou výzkumné zprávy.

„Měření pro testování bylo prováděno na těchto bodech :

1) 10 bodů testovací základny GPS Skalka,
2) min. 32 bodů testovacích polygonů by/S@T,
3) 40 bodů bodových polí ve Středočeském kraji a
4) 18 bodů na GO Pecný.

Měření na vybraných bodech bylo provedeno Ing. Pavlem Tarabou z firmy Viageos ve dnech 13. 6. - 4.7. 2002.

Závěry a doporučení výzkumné zprávy :

Střední souřadnicová chyba v určení polohy bodu z jednoho měření systémem VRS je mxy=0,019 m. Porovnáním s vyhláškou ČÚZK č. 31/1995 Sb. v platném znění vyplývá, že tato přesnost vyhovuje pro určení podrobného bodu při mapování katastrální mapy (vč. zaměřování změn - mxy=0,14 m), pro určení bodu podrobného polohového bodového pole (mxy=0,06 m) i pro určení zhušťovacího bodu (mxy=0,02 m). Střední chyba v určení výšky z jednoho měření systémem VRS je 0,051 m. To odpovídá přibližně přesnosti trigonometrického určování výšek v triangulaci. Požadavky na měření se systémem VRS pro resort ČÚZK jsou následující: Při určování podrobných bodů katastrální mapy je prováděno jedno měření, kdy musí být hodnota HDOP menší než 4. V případě, že hodnota HDOP je větší než 4 (a menší než 7), je pro akceptování určení bodu nutné ověřit jeho polohu dvěmi kontrolními mírami. Pro ostatní určené body (na kterých je HDOP menší než 4) je množství požadovaných kontrolních měr obvyklé současným předpisům. Při určování bodu podrobného polohového bodového pole je doporučeno zaměřovat pouze body, kde je obloha zakrytá maximálně z 50%. Je doporučeno provést dvě zaměření bodu při dodržení časového rozdílu. Každé zaměření by mělo obsahovat alespoň 60 odečtů. Akceptovat lze pouze měření, jejichž hodnota HDOP je menší než 4. Při určování zhušťovacího bodu je nutné provádět měření pouze na bodech, kde je obloha zakrytá maximálně ze 40%. Je bezpodmínečně nutné provést dvě zaměření bodu při dodržení časového rozdílu a je velmi vhodné provést každé zaměření v jiný den, aby i atmosférické podmínky byly různé. Délka měření by měla být mezi 1 a 5 minutami (60 až 300 odečtů). Použitelná jsou měření, jejichž hodnota HDOP je menší než 4. Pro určení výšky je potřebné, aby počet pozorovaných družic byl alespoň 8, výška pak bude určena s přesností obvyklou pro trigonometrické určování výšek.“ Viz [14].

3.2 Aplikace GPS v oblasti geodetických základů

3.2.1 Legislativní zabezpečení

Geodetické základy České republiky jsou ustanoveny dle zákona č. 200 ze dne 29. září 1994 o zeměměřičství a o změně a doplnění některých zákonů souvisejících s jeho zavedením. Jsou zde stanoveny zeměměřičské činnosti, pojmy a práva a povinnosti s nimi související. Tento zákon dále upravuje vyhláška ČÚZK č. 31 ze dne 1.2.1995, kterou je zákon č. 200/1994 Sb. prováděn. Vyhláška se, mimo jiné, konkrétněji zabývá předmětem a obsahem bodových polí a jejich náležitostmi. Dále je platné nařízení vlády ČR č. 116 ze dne 19.4.1995, stanovující geodetické referenční systémy, státní mapová díla závazná na celém území státu a

zásady jejich používání. Geodetických základů se týká i zákon ČNR č. 359 ze dne 7.5.1992 o zeměměřičských a katastrálních orgánech a zákon č. 107 ze den 27.4.1994, kterým se mění a doplňuje zákon č.359/1992 Sb.

3.2.2 Geodetické referenční systémy v ČR

Jak již bylo řečeno, všechna GPS měření používaná v geodesii jsou prováděna relativními metodami. Je proto třeba vztáhnout tato měření k nějakému referenčnímu systému. Závaznými geodetickými referenčními systémy pro zeměměřické činnosti jsou viz [16]:

- světový geodetický referenční systém 1984 (závazná zkratka "WGS84")
- evropský terestrický referenční systém (závazná zkratka "ETRS")
- souřadnicový systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální (závazná zkratka "S-JTSK")
- souřadnicový systém 1942 (závazná zkratka "S-42")
- výškový systém baltský - po vyrovnání (závazná zkratka "Bpv")
- tíhový systém 1995 (závazná zkratka "S-Gr95")

V oblasti katastru nemovitostí je používán národní systém S-JTSK a geocentrický systém ETRS resp. jeho referenční rámec ETRF (angl. European Terrestrial Reference Frame) epocha 1989.0 označovaná ETRF-89. Vše viz. níže.

3.2.3 Bodová pole

V České republice existují tato bodová pole:

- **Polohové bodové pole** – dále rozdělené na:
  - **základní polohové bodové pole** je spravováno Zeměměřickým úřadem a obsahuje:
    - body referenční sítě nultého řádu (dále jen NULRAD – 10 bodů)
    - body Astronomicko-geodetické sítě (dále jen AGS – 63 bodů)
    - body České státní trigonometrické sítě (dále jen ČSTS – okolo 28 900 bodů)
    - body geodynamické sítě (32 bodů)
  - **zhušťovací body** (dále jen ZhB)- tyto body jsou charakterizovány střední souřadnicovou chybou 0,02 m vzhledem k nejbližším bodům základního polohového bodového pole. Stabilizovány jsou žulovými hranoly a opatřeny ochrannými znaky. Jejich správu provádí rezort katastru nemovitostí
  - **body podrobného polohového bodového pole** (dále jen PBPP)- tato kategorie je charakterizována střední souřadnicovou chybou 0,06 m vzhledem k nejbližším bodům základního polohového bodového pole. Způsob stabilizace těchto bodů je buď žulový hranol, zabetonovaná kovová trubka, trubka s plastovou hlavou, ocelové hřeby nebo vhodné rohy budov. Jejich správu provádí rezort katastru nemovitostí
- **Výškové bodové pole -** reprezentované Českou státní nivelační sítí (ČSNS)
- **Tíhové bodové pole -** tvořené základním tíhovým bodovým polem (ZTBP)

3.2.4 S-JTSK

Jedná se dnes již o klasické geodetické základy. Tato síť byla budována v letech 1920 až 1959. Měřeno bylo triangulačními metodami, jako kartografické zobrazení bylo použito

Křovákovo na Besselově elipsoidu. V dalších letech byla síť postupně zhušťována a v dnešní době ČSTS obsahuje okolo 28 900 bodů, rozdělených do pěti hierarchických řádů. Body sítě jsou stabilizovány žulovými hranoly a opatřeny ochrannými znaky, ovšem je potřeba vzít v úvahu značné stáří bodů a jejich obtížnou údržbu. Polohová přesnost této sítě je velmi dobrá, střední chyba v poloze bodů V. řádu je rovna okolo 10 mm. Více o S-JTSK najdeme například v [17].

Tato síť má několik nedostatků pro její použití pro systém jako je GPS:

- Při budování sítě nebyly měřeny nové délkové základny, pouze se převzala stará měření základen ze starší rakouské vojenské triangulace. Díky nedostatku přímo měřených délek nedošlo k zmírnění nejistot v určování délek trigonometricky dle zákona o hromadění chyb triangulace. Díky tomu má dnes katastrální síť proměnlivé lokální měřítko, způsobené místním smršťováním a roztahováním sítě. Tím dochází k velkým kolizím s velmi přesně měřenými délkami pomocí GPS nebo pomocí elektronických dálkoměrů.
- Při budování sítě byla převzata opět stará astronomická měření z rakouské vojenské triangulace pro určení její orientace na elipsoidu. V té době nebyly známy tížnicové odchylky a proto je dnes JTSK otočena o cca 10´´ a je posunuta o přibližně 15´´ směrem k východu.
- JTSK nebyla propojena a vyrovnána se sítěmi okolních států.

Tyto důvody vedly k tomu, že bylo potřeba modernizovat polohové geodetické základy. Proto byla schválena „Koncepce modernizace a rozvoje československých geodetických základů“ Koordinační radou tehdejších resortů ČUGK (Český úřad geodetický a kartografický), SÚGK (Slovenský úrad geodetický a kartografický) a FMO (Federální ministerstvo obrany), v roce 1991 byly zahájeny práce na nových geodetických základech tehdejší Československé republiky. V těchto pracích bylo pokračováno i po rozdělení ČSFR.

Cílem bylo hlavně dle [22]:

- snížení významu hierarchické struktury klasických geodetických sítí
- určování prostorové polohy bodů s převážným využitím metod kosmické geodézie
- homogenita v rozsahu velkých územních celků
- univerzální využití pro řešení vědeckých i praktických úloh geodézie a zeměměřictví
- přiřazení časoprostorových charakteristik definičním souborům bodů
- integrované pojetí (zahrnuje jednoznačné přiřazení fyzikálních parametrů tíhového pole parametrům geometrickým a jednoznačné definování vztahů mezi polohou bodu v trojrozměrném geometrickém a v tíhovém prostoru
- flexibilita a operativnost využití

Tento krok byl bezprostředně spojen s nástupem družicové geodézie a jejích přesných měřických technik, schopných provést přesná měření i na velké vzdálenosti (kontinentální, celosvětové). V té době již existoval celosvětový, velmi přesný referenční systém ITRS (angl. International Terrestrial Reference System), jehož evropský podsystém je nazýván ETRS (angl. European Terrestrial Reference System). V rámci rozšiřování a zhuštění ETRS bylo provedeno na území ČR několik měřických kampaní. Proto odtud byl již logický krok k vytvoření nových geodetických základů v referenčním systému ETRS.

3.2.5 ETRS

Realizace globálního referenčního systému ITRS započala v roce 1988. Byla kvůli tomu ustanovena nová Mezinárodní služba rotace Země (angl. International Earth Rotation Service - IERS). Práce byly prováděny výhradně technikami kosmické geodézie jako je:

- **VLBI** (angl. Very Long Baseline Interferometry)
- **SLR** (angl. Satellite Laser Ranging)
- **LLR** (angl. Lunar Laser Rabging)
- **GPS**
- **DORIS** (angl. Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)
- **PRARE** (angl. The Precise Range And Range-Rate Equipment)

Sytém IERS je složen ze dvou částí:

- **IERS standardy**- konstanty a modely použité při zpracování pozorování pro tvorbu systému
- **IERS referenční rámce**- soubory souřadnic bodů a stanic zahrnuté do IERS rozdělené do epoch, protože tyto body mění svou polohu v čase. V současné době existují dva rámce: terestrický ITRF (angl. IERS Terrestrial Reference Frame) a nebeský ICRF (angl. IERS Celestial Reference Frame)

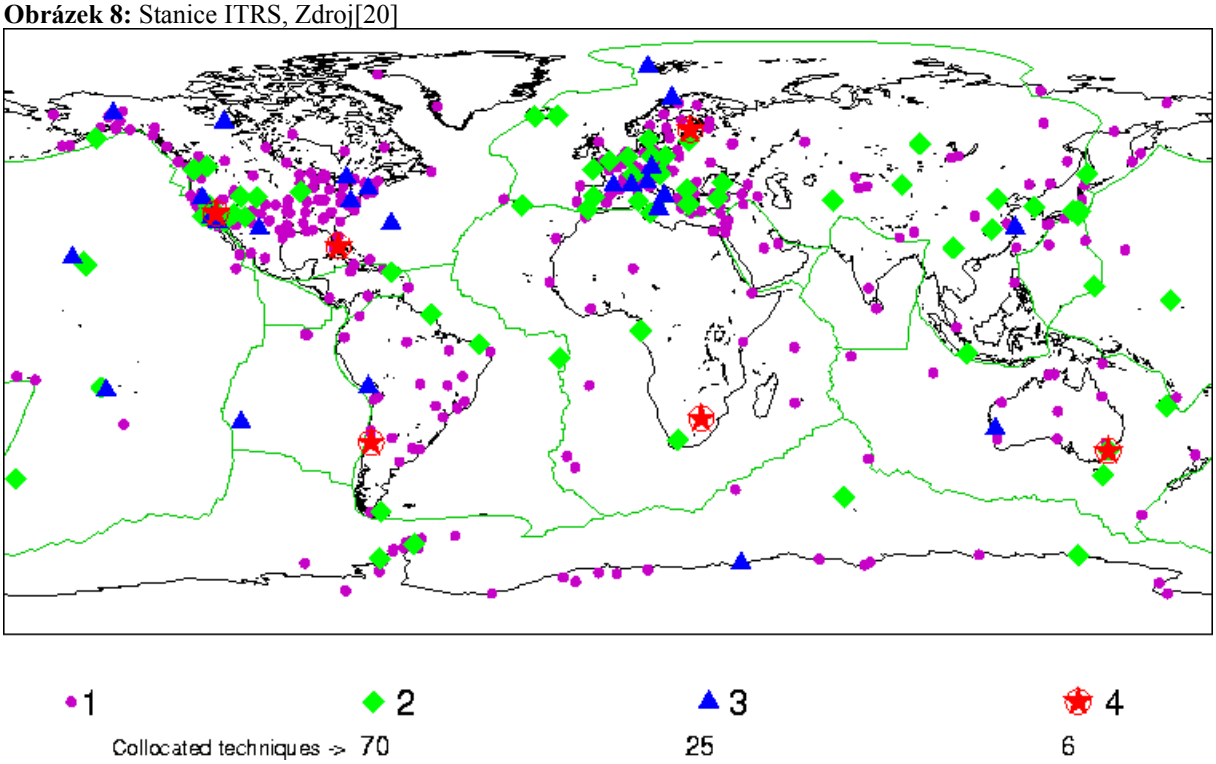
„Počátek ITRF systému je v zemském těžišti s nejistotou 0,1 m. Délkovou jednotkou je metr. Referenční pól (je určen osou Z kartézské souřadnicové soustavy) a referenční poledník (identický s rovinou tvořenou osami XZ kartézské soustavy) jsou konzistentní s odpovídajícími směry v systému BTS (BIH Terestrial System, Bureau International de l'Heure) s přesností asi 0,003″.“ Jak je uvedeno v [19].

V současné době je nejaktuálnější řešení ITRF2000 obsahující přibližně 1400 souřadnic bodů a 500 souřadnic stálých pozorovacích stanovišť s osmi sty pozorovacích stanic, viz obrázek (9), dle [20]. K souřadnicím bodů a stanic jsou přiřazeny i rovnice časových změn těchto souřadnic.

Ovšem souřadnice ITRF podléhají časovým změnám v důsledku pohybu tektonických ker. Pro evropský kontinent byl zaveden speciální referenční systém ETRS, opět s příslušnými konstantami a algoritmy řešení veličin, a jeho rámec ETRF. V Evropě dochází k posunům tohoto rámce v průměru okolo 2,7 cm ročně [21], což už není z geodetického hlediska zanedbatelné. Proto podkomise, organizace IAG (angl. International Association of Geodesy), EUREF (angl. European Reference Frame- Evropský Referenční Systém), která byla pověřena definicí evropského referenčního systému, rozhodla o vytvoření referenčního rámce ETRF89 takového, aby byl v klidu vůči euro-asijské tektonické desce.

ETRF89 je tvořen souřadnicemi stanic a bodů ITRF89 v epoše 1989.0 a souřadnicemi všech bodů změřených následných zhušťovacích kampaních, které byly pořádány pod patronací EUREF. Tyto kampaně byly prováděny metodou GPS v letech 1988-1999 ve většině zemí Evropy, včetně Československa. Na ně navazovaly další, již národní, zhušťovací kampaně.

Obrázek 8: Stanice ITRS, Zdroj[20]



Legenda značí stanice disponující více technikami družicové geodézie na daném místě (tzv. kolokační).

3.3 Realizace ETRS89 v České republice

Zde uvádím jednotlivé měřické kampaně, chronologicky seřazené.

3.3.1 Kampaň EUREF-CS/H-91

Poté, co byl v západoevropských zemích realizován systém ETRF89, bylo dalším logickým krokem jeho rozšíření směrem do středu a na východ Evropy. Proto v roce 1991 došlo k zaměření nových bodů, metodou GPS, na území České a Slovenské republiky a Maďarska.

V Čechách bylo měřeno na třech bodech (Pecný, Přední příčka a Kleť). Vyhodnocení kampaně proběhlo v roce 1992 v německém IFAG (něm. Institut für Angewandte Geodäsi – Frankfurt/Main). Výsledky byly publikovány v roce 1993 a byly první realizací ETRF89 na našem území.

3.3.2 Referenční GPS síť nultého řádu (kampaň CS-NULRAD-92)

V roce 1992 byly konečně vytvořeny podmínky pro realizaci koncepce modernizace geodetických základů. Proto bylo přikročeno k vytvoření referenční sítě nultého řádu, tzv. NULRAD. Měření opět proběhla metodou GPS na devatenácti bodech. Neprováděla se ovšem nová stabilizace bodového pole, bylo využito bodů AGS. Tento výběr nebyl náhodný, protože AGS představuje vrchol klasicky budovaných geodetických základů a referenční S42/83 systém zbudovaný na základě této sítě je prozatím nejkvalitnější v ČR. Dalšími podmínkami pro výběr vhodných bodů byla dobrá prostorová konfigurace nově budované sítě, možnost centrického měření na bodě a vhodné podmínky pro GPS měření. Více viz [23]. Předběžné zpracování výsledků kampaně proběhlo softwarem Trimvec/Trimnet firmy Trimble Navigation Ltd. Definitivní zpracování pak proběhlo za použití přesných efemerid, při využití některých simultánních GPS pozorování na dvanácti stanicích okolních států a za použití

výsledků EUREF-CS/H-91, kde body této kampaně vstupovaly do vyrovnání jako pevné. Použit byl bernský software, verze 3.4. Formální nepřesnost v jednotlivých souřadnicích vyšla viz tabulka (7), upraveno dle [19]:

Tabulka 7: Střední chyby kampaně EUREF-CS/H-91

	Střední chyba (v metrech)					
	X	Y	Z	šířka	délka	Výška
Průměr	0,0013	0,0004	0,0015	0,0003	0,0002	0,0020

Celé řešení je závislé právě na výsledcích kampaně EUREF-CS/H-91, proto lze konstatovat, že vnější přesnost bude horší pro horizontální polohu ±1 cm, pro výšku ±3 cm [19].

3.3.3 Kampaň CS-BRD-93

V roce 1993 nabídl Bavorský zeměměřický úřad propojení německé sítě DREF se sítí NULRAD. Byly provedeny simultánní observace na 10 bodech, 6 z nich ze sítě NULRAD, 4 ze sítě DREF. Měřeno bylo metodami GPS po dobu tří dnů v šesti pětihodinových seancích. Všechna měření byla provedena skupinami z České a Slovenské republiky. Zpracování měření se ujal VÚGTK a bylo provedeno opět bernským softwarem verze 3.4 s přesnými efemeridami. Výsledek kampaně je dán střední polohovou chybou 2,3 cm a ve výšce 3,5 cm [24].

3.3.4 Kampaň DOPNUL

Dalším pokračováním zhuštění geodetických základů v systému ETRF89 byla kampaň DOPNUL (DOPlnění NULtého řádu). Ta proběhla v letech 1993-1994. Měřeno bylo metodami GPS na 176 bodech. Byly vybrány identické body s body I. řádu české trigonometrické sítě. Průměrná vzdálenost sousedních bodů byla cca 25 km. Současně byly přeměřeny i všechny stávající body NULRAD.

Vlastní měření probíhalo po sektorech, vždy ve třech osmihodinových seancích. Sektorů bylo v republice celkem 10 a každý z nich obsahoval minimálně tři body sítě NULRAD. Zpracování měření proběhlo softwarem Bernese. Body NULRAD byly brány jako pevné.

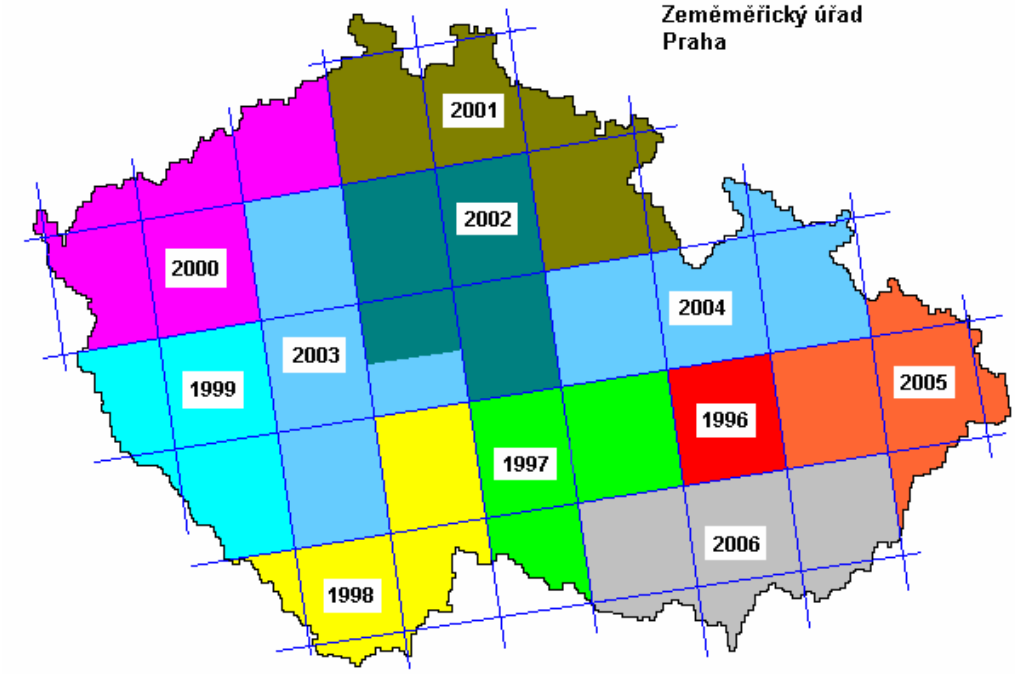
Obrázek 9: Rozložení sektorů kampaně DOPNUL, Zdroj [17]

3.3.5 Zhuštění sítě DOPNUL

Protože hustota bodů sítě DOPNUL nedostačuje praktickým požadavkům geodetické práce, probíhá od roku 1996 až do teď systematické zhušťování sítě DOPNUL o vybrané body ČSTS. Někdy jsou tyto body označovány jako body „Vybrané údržby“. Dle plánu ZU budou tyto práce pokračovat až do roku 2006 (viz obrázek (9)). Vzniká tak stále rozsáhlejší síť bodů určených jak v sytému S-JTSK, tak v geocentrickém systému ETRS89. Základním výběrovým kritériem je požadovaná hustota nově vznikající sítě a ta je dána průměrnou vzdáleností 5 km mezi sousedními body. To platí pro celé území republiky, kromě rozsáhlých lesních komplexů.

Zároveň s těmito pracemi probíhá údržba nově zaměřených bodů a osazení ochrannými znaky. Kromě klasického tyčového ochranného znaku jsou body osazovány betonovou skruží vysunutou minimálně 0,5 m nad úroveň terénu. Toto opatření se samozřejmě netýká bodů, u kterých to podmínky nedovolují. Zaměření je prováděno metodami GPS přibližně jednohodinovými seancemi. K výpočtům jsou použity firemní softwary dodávané k jednotlivým aparaturám. Naměřené vektorové sítě jsou vyrovnány jako vázané, připojené na pevné body DOPNUL. Více o zhuštění DOPNUL viz [11-2].

Obrázek 10: Rozvržení etap zhuštění DOPNUL, Zdroj [21]



3.3.6 Projekt zhuštění polohového bodového pole

V roce 1995 byl schválen Projekt zhuštění polohového bodového pole (ČUZK č.j.315/1995-10, 20.9.1995). Cílem tohoto projektu je vytvoření bodového pole na území ČR s hustotou 2 body na km^2 v intravilánu a 1 bod na km^2 v extravilánu (kromě rozsáhlých lesních komplexů). Provedením projetu byly pověřeny tehdejší katastrální úřady I. typu.

Práce se týkaly revize a následného zhuštění a přeměření pole zhušťovacích bodů, vybraných trigonometrických bodů a orientačních bodů bez souřadnic. Měřické práce byly provedeny skoro výhradně metodami GPS. Trigonometrické body byly použity jako body připojovací pro připojení měření na S-JTSK. Orientační body byly nově přeměřeny a převedeny do kategorie zhušťovacích bodů. Všechny body pole zhušťovacích bodů jsou

stabilizovány žulovými hranoly s jednou podzemní stabilizační značkou a opatřeny ochranným tyčovým znakem.

Měřické práce probíhaly od roku 1996 a většina katastrálních úřadů je dokončila do roku 2002. GPS měření byla prováděna tak, že všechny nově určené body v dané lokalitě jsou připojeny na vybrané okolní trigonometrické připojovací body, tyto lokality byly poté systematiky propojeny na nejbližší body sítě DOPNUL. Toto propojení bylo provedeno statickou metodou.

Výsledkem všech těchto prací je nové velmi husté bodové pole obsahující přibližně 35000 zhušťovacích bodů. Toto pole je kompletně změřeno metodami GPS. Díky průběžnému zpracovávání měření na katastrálních úřadech pomocí firemních softwarů má již dnes mnoho zhušťovacích bodů ve svém geodetickém údaji neoficiální souřadnice v ETRF89, spočtené vyrovnáním volných sítí připojených na nejbližší body DOPNUL. Ovšem tyto souřadnice jsou pouze neoficiální a čeká se na celkové vyrovnání pole zhušťovacích bodů.

Toto vyrovnání je ovšem závislé na dokončení zhuštění sítě DOPNUL pomocí bodů vybrané údržby, na které jsou měření v poli zhušťovacích bodů navázána. Mělo by se tedy posunout minimálně do roku 2006.

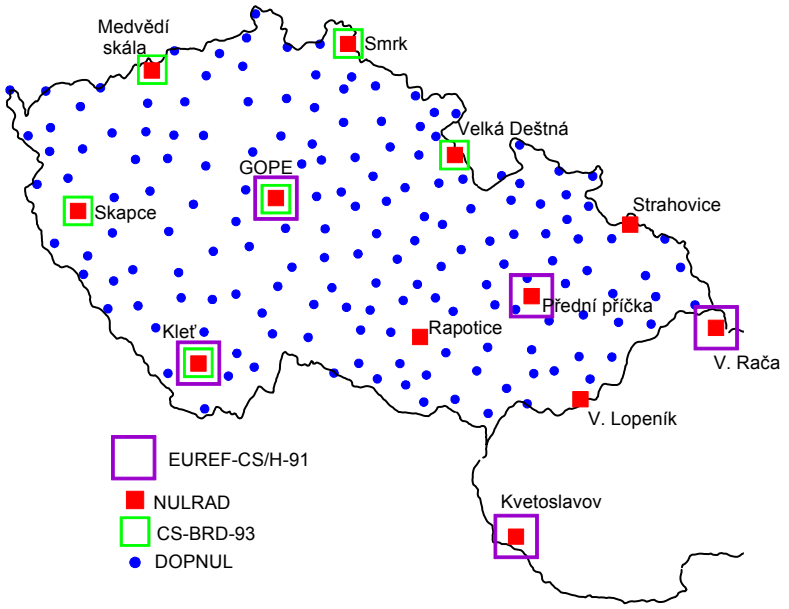
3.3.7 Současný stav realizace ETRS89

Po skončení kampaně DOPNUL byla v ČR k dispozici kvalitnější měření, než jakých bylo použito při základní realizaci ETRS u nás kampaní EUREF-CS/H-91. Dalším krokem ke zpřesnění geodetických základů bylo tedy přepočítání a celkové převyrovnání sítě nultého řádu postupem (upraveno dle [24]) :

- Kampaň CS-NULRAD-92 byla zpracována znovu softwarem Berense 3.5, přičemž výsledky kampaně EUREF-CS/H-91 byly ponechány jako fixní. Dále byl do výpočtů zapojen bod GOPE (Geodetická Observatoř PEcný), který je stálou pozorovací stanicí ITRS
- Pro vyrovnání vektorové prostorové sítě byl použit program VUGNET. Byly určeny nové souřadnice bodů NULRAD z měření získaných v kampaních DOPNUL a CS-BRD-93. Vše proběhlo po jednotlivých seancích. Původní souřadnice bodů NULRAD byly použity pouze jako opěrné. Do vyrovnání vstupovaly jako data výsledné souřadnice, získané zpracováním jednotlivých seancí softwarem Bernese. Jednalo se ovšem pouze o souřadnice sítě NULRAD změřených v jednotlivých seancích v dané epoše. Souřadnice ostatních bodů ze seance byly vypuštěny. Bylo použito varianty vyrovnání s jedním fixním bodem. Výsledky vyrovnání jsou charakterizovány střední chybou výsledných prostorových souřadnic v rozsahu 6 – 14 mm.
- Výsledné souřadnice bodů vypuštěných z vyrovnání v předchozím kroku (tedy všech kromě bodů NULRAD) byly určeny sedmiprvkovou transformací na body vyrovnané v předešlém kroku. Průměrné zbytkové odchylky od této transformace činí 3 mm v každé souřadnici, maximální zbytková odchylka v polohové souřadnici je 10 mm, ve výšce 29 mm. Střední hodnota změny měřítka je 0,02 ppm, maximální změna 0,1 ppm.

Do správného zhodnocení přesnosti nám vstupuje samotný program Berense 3.5, který nadhodnocuje formální chyby výsledných souřadnic. Na základě výpočtů rozptylů, opakujících se nezávislých měření na jednotlivých bodech, byla určena střední souřadnicová chyba 2 až 8 mm v polohových souřadnicích a 1 až 3 cm ve výšce pro body v jedné seanci a také mimo body NULRAD. Současný stav rozložení bodů ETRS89 v ČR je znázorněn na obrázku (13).

Obrázek 11: Zdroj [21]
Rozložení stanic, realizujících ETRS-89
na území České republiky



3.3.8 Systém S-JTSK/95

Po zjištění chyb v S-JTSK, následovala snaha o nápravu. Nutnost této nápravy je o to aktuálnější, že používání nových technologií, jako je GPS a elektronické totální stanice, se střetává s nedokonalostmi stávající katastrální sítě, jak již bylo zmíněno v odstavci 3.2.4. Proto byla ve VÚGTK Zdiby vypracována výzkumná zpráva zabývající se možností nápravy. Některé závěry z této zprávy jsou:

„S–JTSK/95 představuje moderní geocentrický systém, který splňuje následující požadavky:

- zavádí geocentrický souřadnicový systém, což umožňuje bezprostřední nasazení techniky GPS
- z geocentrických souřadnic (X, Y, Z) resp. (j, l, H) definuje (jednoznačně, pomocí jisté modifikace Křovákova zobrazení) rovinné geodetické souřadnice odpovídajících bodů v Křovákově zobrazení – umožňuje tedy provádět klasická geodetická měření (měření úhlů pomocí teodolitů, měření vzdáleností dálkoměry, nasazení totálních stanic)
- umožňuje použití stávajících grafických podkladů vyhotovených v S–JTSK od měřítka 1:1 000 směrem k menším měřítkům; je tedy vyhovující pro přesné technické a katastrální měřické práce i pro řešení otázek lokalizace údajů v rámci GIS/LIS; numerická odlišnost od souřadnic dosavadního S–JTSK je zanedbatelná –střední hodnota rozdílu je cca 10 cm.“

Zdroj [17].

Systém, pracovně nazvaný S-JTSK/95, je snahou o realizaci těchto požadavků. Pro systém je navrženo nové zobrazení, které je vlastně modifikací Křovákova zobrazení. Změny v zobrazení spočívají v přidání dalšího členu do výpočtu jeho zkreslení. Tento člen zohledňuje deformace stávajícího S-JTSK. Pokud existují rovinné souřadnice, musí existovat

i sytém nadmořských výšek. Tím by byl „Balt po vyrovnání“. Základními souřadnicemi, které by toto zobrazení používalo by byly souřadnice v ETRS89. Jinými slovy by v systému existovaly jak geocentrické souřadnice (ETRS89), tak rovinné souřadnice (modifikované Křovákovo zobrazení) s nadmořskými výškami (Bpv).

3.3.9 Aktivní polohové základy

Aktivní polohové základy jsou zatím poslední z vymožeností, které přináší družicová geodézie. Dosavadní způsoby měření předpokládaly existenci polohových základů v dostatečné blízkosti lokality měření. Ovšem rozvoj metod DGPS, ukázal že hustota geodetických základů může být mnohonásobně nižší.

Metody DGPS a jejich dosah jsou podrobně rozebrány v kapitole 3.1.4. Pokud bychom si přáli pomocí těchto metod vybudovat ekvivalentní náhradu stávajících polohových základů, je nutné dodržet legislativní předpisy a splnit polohovou přesnost měřených bodů. Pro nejpřesnější bodová pole je to tedy střední souřadnicová chyba 0,02 m. Od tohoto předpokladu se poté bude odvíjet druh použitých technologií a hlavně hustota sítě referenčních stanic. Konečným rozhodovacím hlediskem je ekonomické hledisko různých návrhů sítě DGPS.

Nejlepší se dnes jeví systém sítí VRS, který vyžaduje průměrnou vzdálenost mezi referenčními stanicemi okolo 70 km. V [12-3] je popsán návrh několika DGPS sítí a jejich předpokládaná hustota. Pro síť se vzdáleností stanic 100 km by bylo třeba pro pokrytí území ČR vbudovat přibližně šest referenčních stanic. Při vzdálenosti referenčních stanic 50 km by jich stačilo 19 a při vzdálenosti referenčních stanic 30 km by jejich počet vzrostl na 37.

Dobře zpracovaná koncepce aktivních polohových základů je zpracována v [6] a [7].

3.3.9.1 Srovnání aktivních polohových základů s bodovým polem

- **Výhody**
  - Stačí vybudovat pouze základní geodetickou síť se vzdáleností mezi sousedními body řádově několik desítek kilometrů (zde záleží na záměru jak hustou síť DGPS budeme budovat), pro území ČR pak stačí vybudovat pouze několik desítek bodů.
  - Není nutné provádět údržbu velkého počtu bodů bodového pole.
  - Měření jsou snadná rychlá a přesná.
  - K využití výhod relativního způsobu měření GPS měření stačí pouze jeden GPS přístroj.

- **Nevýhody**
  - Cena vybavení a provozu stanic DGPS je vysoká.
  - Uživatel musí být vybaven drahým zařízením.
  - Oblasti, kde lze bez problémů přijímat GPS signál a signál z referenčních stanic, jsou omezené.

4 Návrh metodických opatření a úpravy stávajících předpisů pro možnost využití GPS v Katastru nemovitostí.

V této kapitole se snažím vytvořit pravidla pro měření pomocí GPS, taková, aby bylo možné tyto výsledky přebírat do katastru nemovitostí ČR. V průběhu psaní mé diplomové práce byla vydána pravidla umožňující používat měření GPS i pro práce v PBPP a pro měření podrobných bodů [5]. Tato pravidla se do značné míry překrývají s obsahem této kapitoly.

Pro vytváření katastrálních map a správu bodových polí, spadajících pod rezort katastru nemovitostí, je třeba provádět různorodé měřické práce v terénu. V této oblasti se velice dobře uplatní technologie GPS. Ačkoliv tato technologie existuje, a je využívána, již řadu let, až v nedávné době se objevila legislativní úprava pro rezort katastru nemovitostí, která určuje podmínky převzetí výsledků měření pomocí této technologie do katastru nemovitostí. Tato úprava je v podobě [5]. Již předtím bylo využití technologie GPS zmíněno v návodech ČÚZK, jako třeba [4], ale tyto návody platí pouze vnitroresortně.

4.1 Využitelnost GPS pro KN

Pro katastr nemovitostí je závazné předávat výsledky měřických prací v S-JTSK. Ovšem tento systém má své specifické problémy ve vztahu k měřením pomocí GPS. Jedná se o proměnlivé délkové zkreslení (více kapitola 3.2.4). Toto zkreslení je patrné již na úrovni jednotlivých trigonometrických bodů (v [21] je uvedeno, že střední souřadnicová chyba S-JTSK na bodech vybrané údržby má průměrnou hodnotu 11 cm). Síť bodů vybrané údržby je volena na vybraných trigonometrických bodech s průměrnou vzdáleností 5 km mezi sousedními dvěma body.

Takováto přesnost už by stačila podle předpisů platných pro KN pouze pro zaměřování podrobných bodů. Zcela nevyhovující už by byla pro práci v bodových polích a pokud bychom navázaly na takovéto polohové základy, došlo by k zbytečné degradaci výsledků. Proto je nutné navázat veškerá GPS měření na polohové základy určené v ETRS89, tedy v současné době na body sítě NULRAD, DOPNUL a body vybrané údržby. Zároveň je ovšem nutné zachovat zpětnou vazbu na S-JTSK, aby nová měření byla slučitelná s předchozími zaměřenými klasickými metodami. Proto musíme transformovat všechna GPS měření do S-JTSK, a to lokálně, s ohledem na její deformace na úrovni trigonometrické sítě.

Pro lokální transformaci je potřeba zaměření identických bodů, jejichž hustota bude dobře vystihovat průběh deformací S-JTSK, jinými slovy, vzdálenosti mezi sousedními body by neměly překročit 5 km. Identickými body jsou myšleny ty, které mají správné souřadnice v ETRS89 (tedy musí být připojeny na stávající platné polohové základy určené v tomto systému) a v S-JTSK. Pro body, které mají dvojí platné souřadnice, je používáno označení „připojovací body“. Jedním z důsledků tohoto stavu je, že nelze za současné situace využívat GPS měření na vzdálenosti delší než zmiňovaných 5 km, což je vzhledem k možnostem technologie značná škoda.

Samozřejmě, naskýtá se otázka, zda tato situace nevolá po změně závazných polohových základů pro KN na vhodnější systém, například systém S-JTSK/95 nebo přímo ETRS89. Samotné použití přímo ETRS89 se zdá být nevhodné kvůli již existujícím rozsáhlým mapovým dílům v S-JTSK. Bylo by obtížné předělávat od základů kartografické zobrazení. Proto by byl nejvhodnější systém S-JTSK/95. Pokud bychom jej mohli závazně využívat, odpadlo by diskutabilní lokální transformování do S-JTSK a umožnilo by se provádět GPS měření na podstatné větší vzdálenosti.

4.2 Lokální transformace bodů z ETRS89 do S-JTSK

V kapitole 4.1 jsou rozebrány důvody, proč lokálně transformovat výsledky měření GPS a na jak velkém území lze tuto transformaci provést. Transformace musí splňovat:

- **musí být použit správný převod výšek**- Z GPS měření získáme geocentrické souřadnice na elipsoidu GRS 80 (resp. WGS-84) v systému ETRS89 (resp. WGS). Z této soustavy chceme přejít na rovinné souřadnice v S-JTSK s nadmořskými výškami v systému Bpv. Takovéto úlohy velice dobře řeší Helmertova sedmiprvková transformace. Vztah mezi elipsoidickými a nadmořskými výškami musí být určen pomocí co nejpřesnějšího modelu kvazigeoidu, jaký je k dispozici (např. CR 2000 viz [21]). Aby bylo možné správně provést transformaci je potřeba minimálně trojice identických bodů.
- **geometrické rozložení bodů nesmí přesahovat mimo transformovanou lokalitu**- Rozložení připojovacích bodů má reprezentovat proměnlivost S-JTSK, proto musí být všechny nově změřené body vždy uvnitř uzavřeného obrazce připojovacích bodů. Kdyby tomu tak nebylo, docházelo by k značným rozdílům ve výsledných souřadnicích dvakrát změřených bodů, díky netransformování úplně jiným transformačním klíčem. Pokud bude celé území transformováno jen po relativně malých lokalitách (viz kapitola 4.1), bude zaručeno, že použitý transformační klíč pro body v dané oblasti bude velice podobný klíči, který pro tento bod určí jiný geodet při dalším nezávislém zaměření.
- Správné provedení měření vyžaduje vytvoření dostatečně husté sítě připojovacích bodů, kde vzdálenost mezi sousedními body bude průměrně 5 km.

4.3 Měření technologií GPS v KN – metodický návrh

Jednotlivé postupy měřičských prací při měření pomocí GPS jsou odvozeny od druhu vybavení, které má měřič k dispozici a metody měření, jakou lze nebo je třeba, využít. Rozhodujícím faktorem ovlivňujícím konkrétní provedení prací je přesnost prováděných měření a jistota jejího dosažení. Je tedy nutné vytvořit jednoznačná pravidla, jaká měření, z hlediska přesnosti, odpovídají platným předpisům pro KN. Tento metodický návod je vytvořen pro potřeby KN, jinými slovy pro měřické práce v PBPP, při zaměřování podrobných bodů a práce v poli ZhB. Ovšem pro práce v ZhB platí speciální vnitrorezortní předpis [25], proto se zde budeme zabývat pouze podrobným měřením a pracemi v PBPP.

4.3.1 Nutná přesnost měřických prací v KN

Aby bylo možné převzít výsledky měřické činnosti do KN je třeba vypracovat technickou zprávu, která prokáže splnění kritérií jejich přesnosti, definovaných ve vyhlášce č. 190/1996 Sb., ve znění pozdějších předpisů. Jsou to především:

- **Zaměření bodu PBPP**- zde je deklarována střední souřadnicová chyba vztažená k nejbližším bodům základního polohového bodového pole 0,06 m (vyhláška č.190/1996 Sb. bod 11 přílohy). Ve stejném bodu jsou popsány postupy, jak tuto přesnost prokázat.
- **Zaměření podrobných bodů**- zde je deklarována střední souřadnicová chyba 0,14 m a mezní odchylka měřených délek od délek vypočtených ze souřadnic 0,21 m (vyhláška č.190/1996 Sb. bod 12 přílohy). Ve stejném bodu jsou popsány postupy, jak tuto přesnost prokázat.

4.3.2 Metody měření pomocí GPS splňující zákonná kritéria pro použití v KN

Všechna GPS měření musí být provedena relativními metodami a navázána na připojovací body pro transformaci z ETES do S-JTSK (viz kapitola 4.1, 4.2). Vzdálenost mezi připojovacími body nesmí být veliké, proto se ve výsledné chybě měření zásadně neprojeví samotná přesnost měřických metod pomocí GPS a hlavně není nutné stanovovat vzdálenostní limit pro jednotlivé měřické metody, protože do 5 km jsou všechny níže uvedené metody dostatečně přesné. Jsou to:

- **Statická metoda** (viz kapitola 3.1.1)
- **Kinematická metoda** (viz kapitola 3.1.2)
- **Rychlá statická metoda** (viz kapitola 3.1.3.1)
- **Metoda STOP and GO** (viz kapitola 3.1.3.2)
- **Metoda RTK** (viz kapitola 3.1.3.3)
- **Metoda DGPS** (viz kapitola 3.1.4, 3.1.5)
- **Metoda VRS** (viz kapitola 3.1.6)

4.3.3 Dokumentace GPS měření

K tomu aby byly výsledky měření pomocí GPS ověřitelné, musí být vybaveny správnou dokumentací. Zde je seznam věcí, které musí takováto dokumentace obsahovat:

- **Použité přístroje-** výrobce, typ přístroje, typ antény; u DGPS bez postprocessingu, RTK a VRS druh komunikačního zařízení pro přenos dat
- **Požitou měřickou metodu-** dle kapitoly 4.3.2
- **Protokol měření na bodech**- obsahující informace o DOP, délce měření na bodech, výšce antény nad měřeným bodem
- **Způsob výpočtu geocentrických souřadnic-** pro výpočet musí být použit software s ověřenou správností výpočtu. Tato ověření vydává ČUZK.
- **Způsob transformace geocentrických souřadnic do S-JTSK-** pro výpočet musí být použit software s ověřenou správností výpočtu. Tato ověření vydává ČUZK. Výpočetní postup musí dodržet zásady zmíněné v kapitole 4.2. Správná konfigurace změřených bodů musí být doložena přehledným náčrtem.

Názorná varianta vhodného protokolu je uvedena v [5].

4.3.4 Postup měření

Zde je nutné rozdělit, o jaké měřické práce se bude jednat, zda o práce v PBPP či zaměřování podrobných bodů polohopisu. V obou případech musí být GPS měření napojena na připojovací body s platnými souřadnicemi ETRS89 a pak transformovány do S-JTSK.

4.3.4.1 Měřické práce v PBPP

Bod PBPP musí splňovat všechny požadavky, které jsou určeny ve vyhlášce č.190/1996 Sb., bod 11 přílohy, ve znění pozdějších předpisů. Pokud pro jeho určení používáme technologii GPS, je nutné dodržet ještě tyto další zásady. Jsou to:

- Při měření je nutné použít: přístroje s geodetickou přesností, vhodnou metodu a dodržet podmínky měření stanovené výrobcem přístroje. Souhrn dostupných metod je uveden v kapitole 4.3.2.
- Určovací prvky pro bod PBPP se měří nezávisle dvakrát. Výsledkem musí být dvojí určení bodu v S-JTSK, z něhož se pak určuje výsledná střední souřadnicová chyba měření. V případě měření GPS to znamená provést druhé zaměření bodu a jeho výpočet v S-JTSK.
- Při zaměření bodu nesmí hodnota (DOP*(základní chyba měření)) překročit hodnotu požadované střední souřadnicové chyby měření. Pokud by došlo k takové situaci jsou měření nepoužitelná. Např. při měření rychlou statickou metodou na vzdálenost 5 km je základní souřadnicová chyba 15 mm (u přístroje s chybou 10 mm + 1 ppm). DOP v tomto případě nesmí při zaměření bodu překročit hodnotu 4. Parametr TDOP a VDOP nejsou použitelné.
- Za nezávislou je pokládána konstelace družic v jiné denní době. Tato denní doba musí být minimálně 3 hodiny před nebo po zaměření prvního bodu viz [5]. Druhé zaměření musí být provedeno s novým postavením stroje a určením výšky antény.
- Podmínky transformace bodů do S-JTSK musí splňovat zásady popsané v kapitole 4.2.
- Pro přebrání výsledků měření do KN musí být vyhotovena dokumentace dle kapitoly 4.3.3, sloužící jako podklad pro posouzení jejich přesnosti.
- Střední souřadnicová chyba měření musí vyhovovat kritériím přesnosti stanovených ve vyhlášce č. 190/1996 Sb., bod 11 přílohy.

4.3.4.2 Výsledky určení souřadnic podrobných bodů

Výsledky měření podrobných bodů musí splňovat všechny požadavky, které jsou určeny ve vyhlášce č.190/1996 Sb., bod 12 přílohy, ve znění pozdějších předpisů. Pokud pro jeho určení používáme technologii GPS, je nutné dodržet ještě tyto další zásady. Jsou to:

- Při měření je nutné použít přístroje s vhodnou geodetickou přesností a měřit vhodnou metodou a dodržet podmínky měření stanovené výrobcem přístroje. Souhrn těchto metod je uveden v kapitole 4.3.2.
- Ověření přesnosti podrobného bodu se provádí druhým zaměřením bodu, kontrolními oměrnými nebo druhým zaměřením bodu jinou technologií. Druhé zaměření musí být provedeno s novým postavením stroje a určením výšky antény.
- Při zaměření bodu nesmí hodnota (DOP*(základní chyba měření)) překročit hodnotu požadované střední souřadnicové chyby měření. Pokud by došlo k takové situaci, jsou měření nepoužitelná. Např. při měření rychlou statickou metodou na vzdálenost 5 km je základní souřadnicová chyba 15 mm (u přístroje s chybou 10 mm + 1 ppm). DOP v tomto případě nesmí při zaměření bodu překročit hodnotu 9. Parametr TDOP a VDOP nejsou použitelné.
- Podmínky transformace bodů do S-JTSK jsou stejné jako u PPBP nebo lze dle [5] využít globální transformační klíč, který vyhovuje přesností požadavkům na podrobné body (např. klíč VÚGTK).
- Pro přebrání výsledků měření do KN musí být vyhotovena dokumentace dle kapitoly 4.3.3, sloužící jako podklad pro posouzení jejich přesnosti.
- Střední souřadnicová chyba měření a rozdíly měřených délek oproti délkám vypočtených ze souřadnic musí vyhovovat kritériím přesnosti stanovených ve vyhlášce č. 190/1996 Sb., bod 12 přílohy.

5 Ověření navržených zásad

Abych dokázal správnost a funkčnost návodu uvedeného v kapitole 4, využil jsem se svolením KÚ Plzeň-město několik měření, jenž jsem prováděl nebo se jich účastnil jako zaměstnanec KÚ Plzeň Město. Jedná se o rekonstrukci PBPP v KÚ Domažlice a zaměřování podrobných bodů polohopisu při obnově katastrální mapy přepracováním na DKM v KÚ Kralovice.

5.1 Zaměření sítě pomocných měřických bodů v KÚ Domažlice

V rámci obnovy katastrální mapy Domažlice přepracováním na DKM byla provedena rekonstrukce podrobného polohového bodového pole (vyhledání stávajících bodů a doplnění sítě PPBP). Nové body byly určovány převážně rajóny z bodů sítě pomocných bodů, určené metodou GPS. Současně byla prováděna měření polygonových pořadů, které se napojují v některých částech sítě na zhušťovací nebo trigonometrické body.

V měřené lokalitě tedy vznikla jak síť zaměřená klasickými geodetickými metodami, tak metodou GPS. Tyto dvě sítě bylo možné porovnat a posoudit jejich vzájemnou přesnost, a tím i přesnost GPS měření. Konfigurace měřené sítě je znázorněna na přehledce viz příloha 1. Technická zpráva k rekonstrukci PBPP je uvedena v příloze 2. Technická zpráva k GPS měřením je uvedena v příloze 3. Okolnosti měření, použité přístroje a metody uvádím v příslušných technických zprávách. V této kapitole se pojednává o výsledku těchto měření a rozborem jejich přesnosti. Všechna měření proběhla dle platných legislativních předpisů.

5.1.1 Zaměření pomocných měřických bodů a bodů PBPP metodou GPS

Konfigurace a postup zaměření sítě splňuje podmínky stanovené v kapitole 4.3. Dokumentace je uvedena v technické zprávě v příloze 3. Náčrtek GPS sítě je na obrázku (11). Transformace z geocentrického systému do S-JTSK proběhla na pěti identických bodech viz tabulka (8):

Tabulka 8: Odchylky na bodech transformačního klíče, jedná se o odchylky rovinných souřadnic.

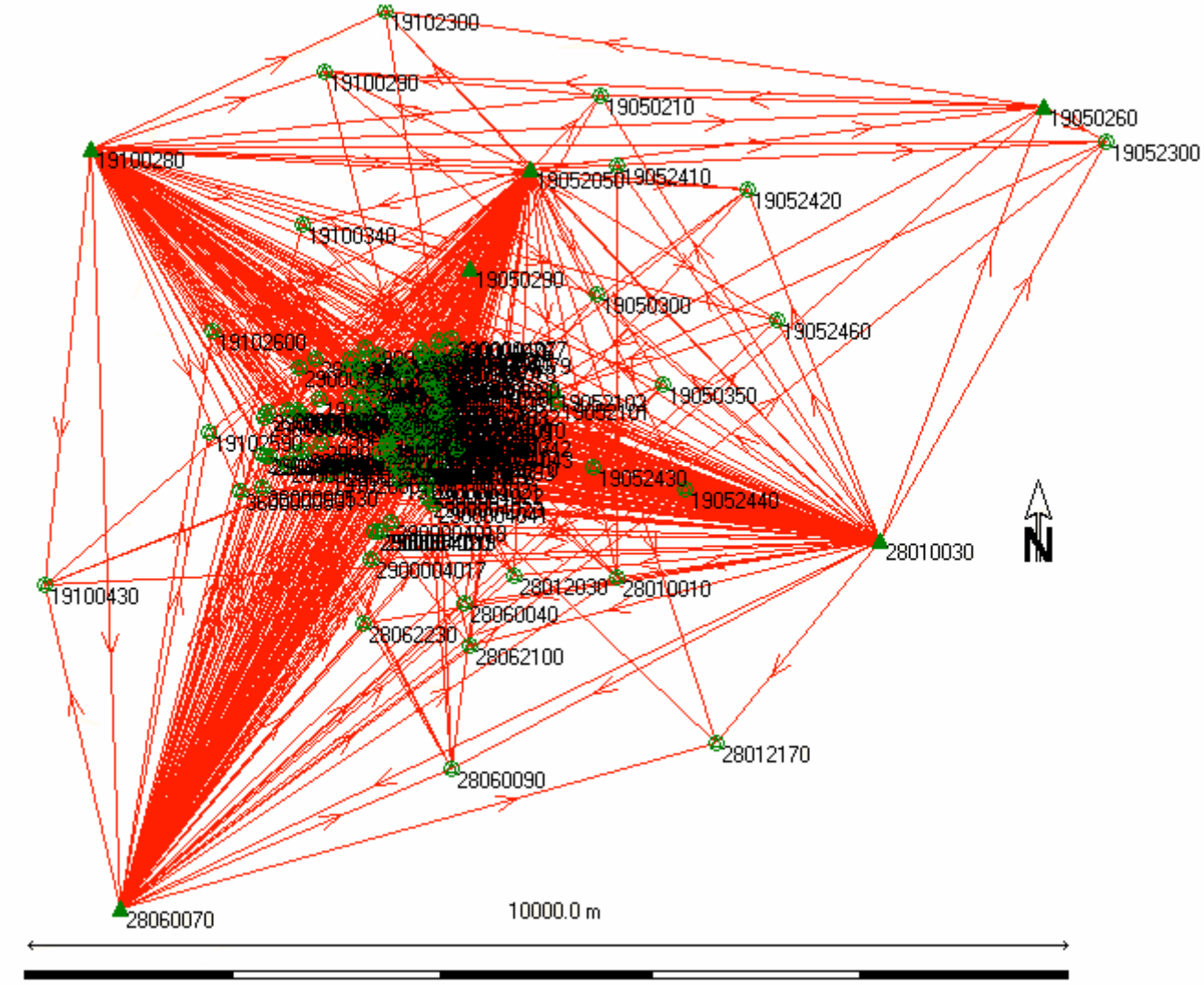
System WGS84	System S-JTSK	dY [m]	dX [m]	dZ [m]
19050260	19050260	0.0079	0.0141	0.0015
19050290	19050290	0.0083	-0.0087	-0.0152
19100280	19100280	0.0051	0.0083	0.0084
28010030	28010030	-0.0266	-0.0053	0.0055
28060070	28060070	0.0053	-0.0084	-0.0002

K výpočtu byl použit software Ski Pro, schválený ČUZK. Výsledky transformace viz tab.(9):

Tabulka 9: Statistika transformačního kliče

Počet ident. bodů pro souřadnice	5
Počet ident. Bodů pro výšky	5
Počet určovaných bodů	120
Počet určovaných výšek	120
Empirická stř. souř. chyba souboru (M_{XY}) [m]	0.02
Maximální střední souřad. chyba (M_{MAX}) [m]	0.06

Obrázek 12: Konfigurace sítě zaměřené GPS



5.1.2 Zaměření pomocných měřičských bodů a bodů PBPP klasickou metodou

Síť byla měřena na dostupné orientační body pomocí trojpodstavcové soustavy. Bohužel původní úmysl navázat měření nových PBPP pouze na síť GPS zapříčinil nedostatek měřených nadbytečných veličin a některé volné konce sítě nejsou vůbec připojeny na bodové pole, viz přehledka v příloze 1. Pořad z bodu (1910)2710 na bod 531 není žádným způsobem spojen se zbytkem sítě, navazuje pouze na body změřené GPS, proto tak velký výskyt chyb. Stejná tak to platí i pro body 4063-4071.

Výsledná měření byla vyrovnána postupně jako volná síť pro posouzení přesnosti provedených měření, a tím i vnitřní přesnosti celé sítě. Poté jako síť vázaná na dostupné bodové pole a nakonec jako síť vložená na body určené GPS (viz kapitola 5.1.1). Na vyrovnání byl použit software GROMA 6.0.

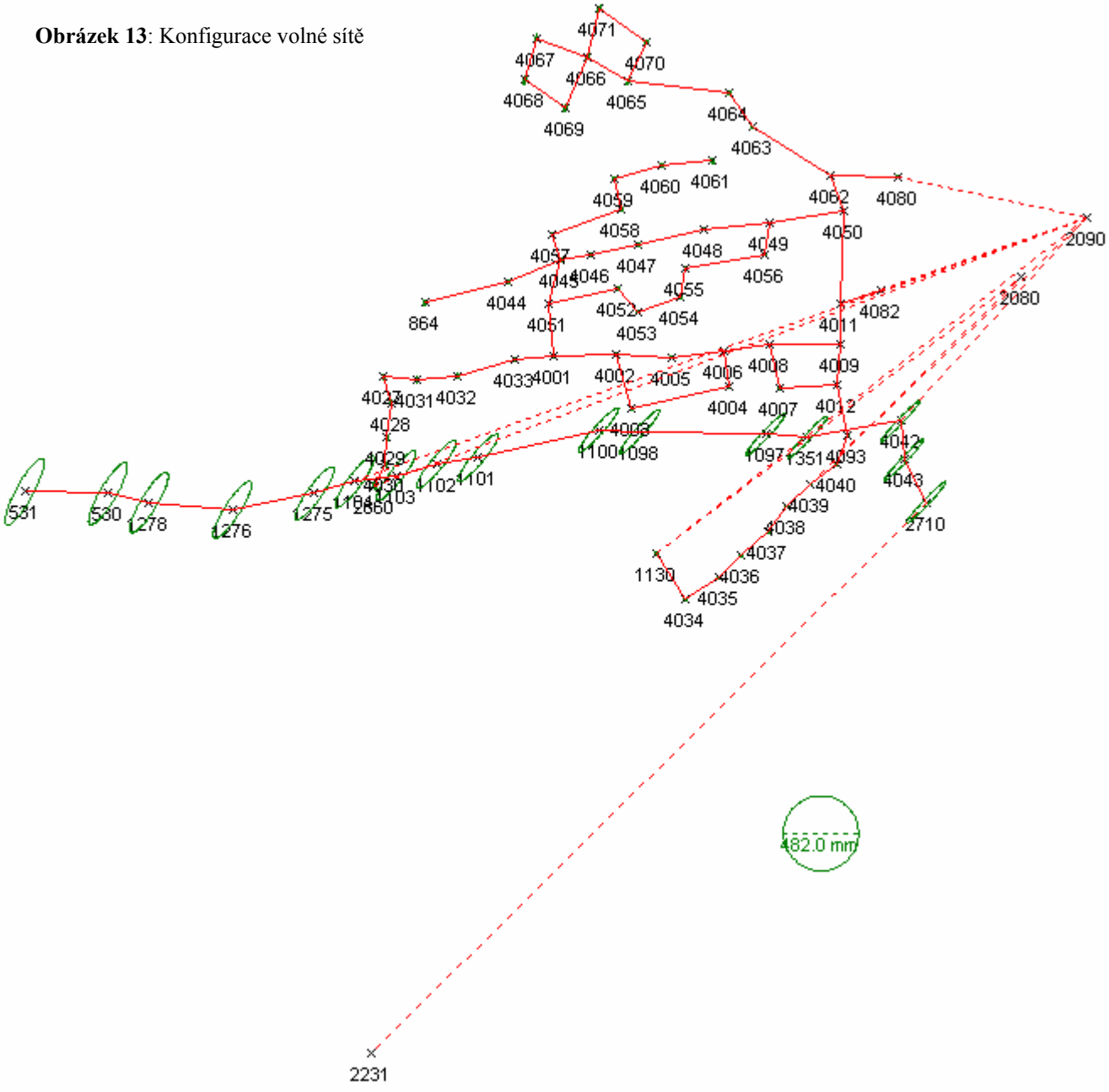
5.1.2.1 Vyrovnání volné sítě

Konfigurace volné sítě a elipsy výsledných chyb jsou znázorněny na obrázku (12). Jako pevný byl zvolen bod 4011 s orientací na 19052090 (v obrázku má číslo 2090). Na

obrázku (12) se uvádí neúplná čísla bodů, jedná se o body (1905)2090, (1905)2080, (1910)1130, (1910)2660, (1910)2710, (2806)2231.

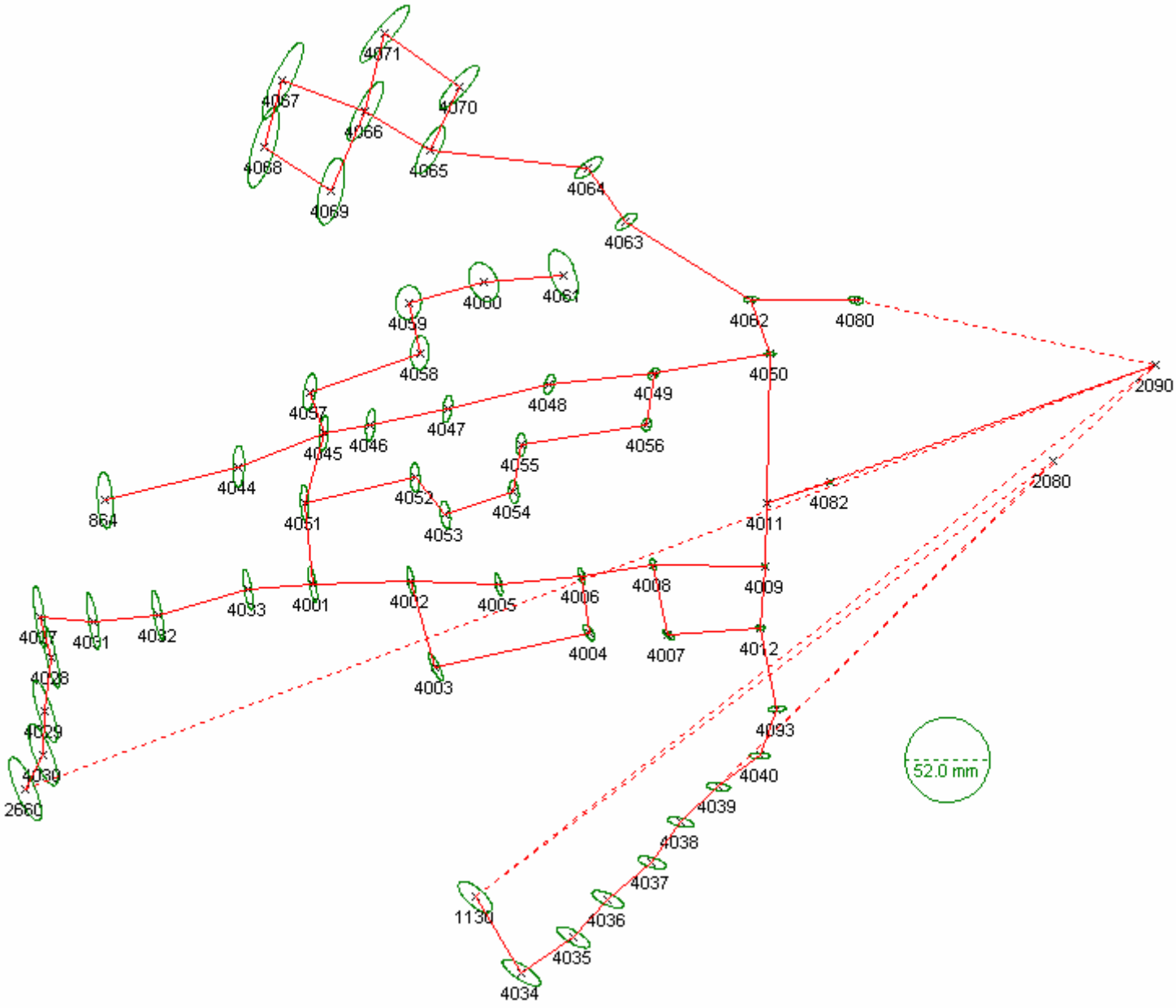
Apriorní chyba měřené délky	[mm]	: 5 + 3 ppm
Apriorní chyba měřeného směru	[cc]	: 15
Průměrná střední chyba vyrovnané délky	[mm]	: 3.18
Průměrná hodnota měřené délky	[m]	: 127.4179
Průměrná hodnota vyrovnané délky	[m]	: 127.4179
Základní střední chyba m0 apriorní	[cc]	: 10.00
Základní střední chyba m0 aposteriorní	[cc]	: 12.80
m0 aposteriorní / m0 apriorní		: 1.28
Interval spolehlivosti		: 0.72 - 1.28
Průměrná střední chyba vyrovnaného směru	[cc]	: 17.73
Střední souřadnicová chyba m_{xy}	[mm]	: 136.26

Obrázek 13: Konfigurace volné sítě



Kvůli přehlednosti zde uvádím detail střední části volné sítě, viz obrázek (13). Opět na něm neuvádím úplná čísla těchto bodů: (1905)2090, (1905)2080, (1910)1130, (1910)2660.

Obrázek 14: Detail volné sítě



Další parametry této volné sítě viz technická zpráva v příloze 4.

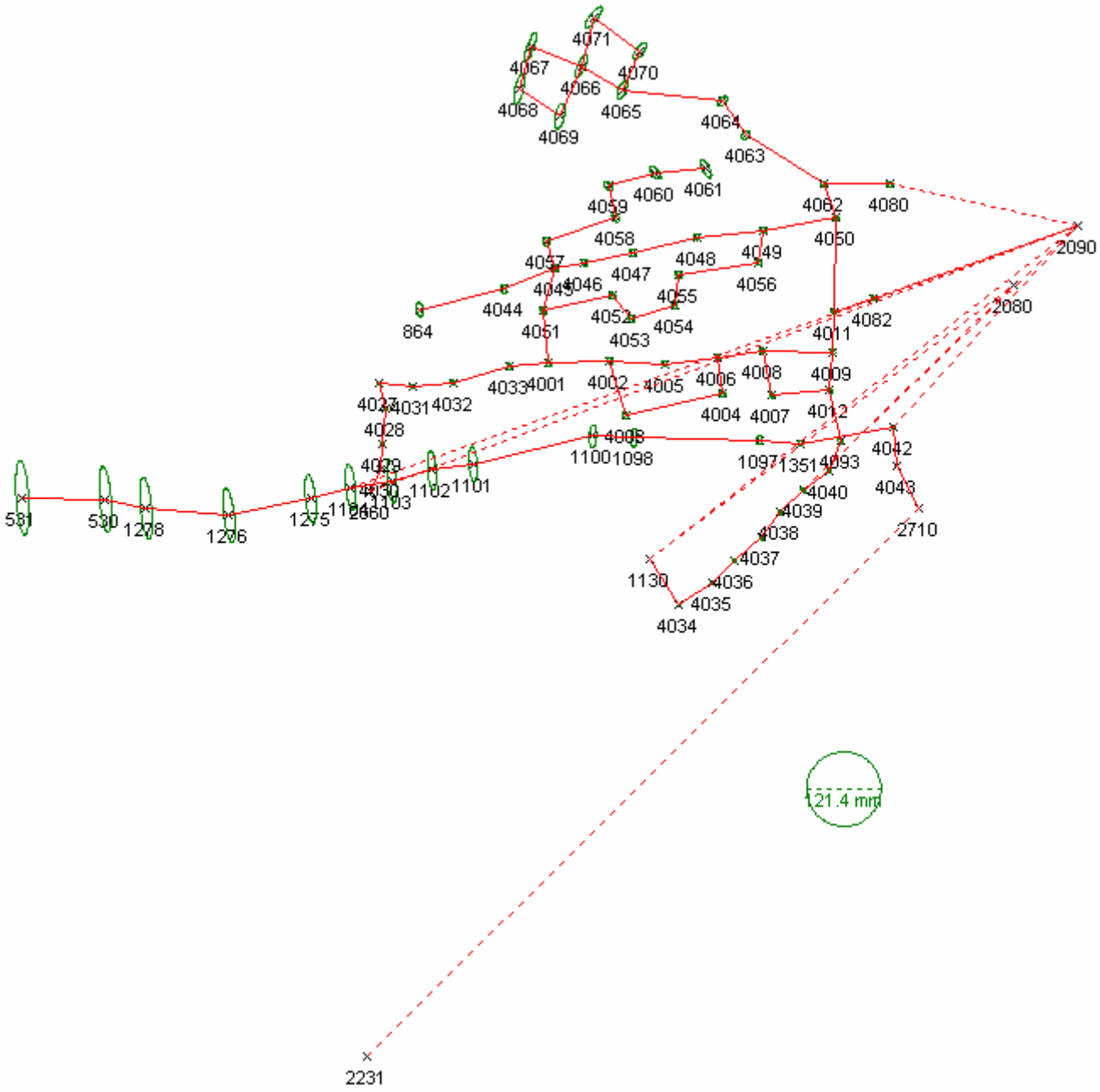
5.1.2.2 Vyrovnání vázané sítě

Konfigurace vázané sítě a elipsy výsledných chyb jsou znázorněny na obrázku (14). Síť je připojena na bodové pole v bodech (1905)2090, (1905)2080, (1910)2710, (1910)2660, (1910)1130, (2806)2231. Na obrázku (14) nejsou úplná čísla těchto bodů.

Apriorní chyba měřené délky	[mm]	: 5 + 3 ppm
Apriorní chyba měřeného směru	[cc]	: 15
Průměrná střední chyba vyrovnané délky	[mm]	: 3.13
Průměrná hodnota měřené délky	[m]	: 127.4179

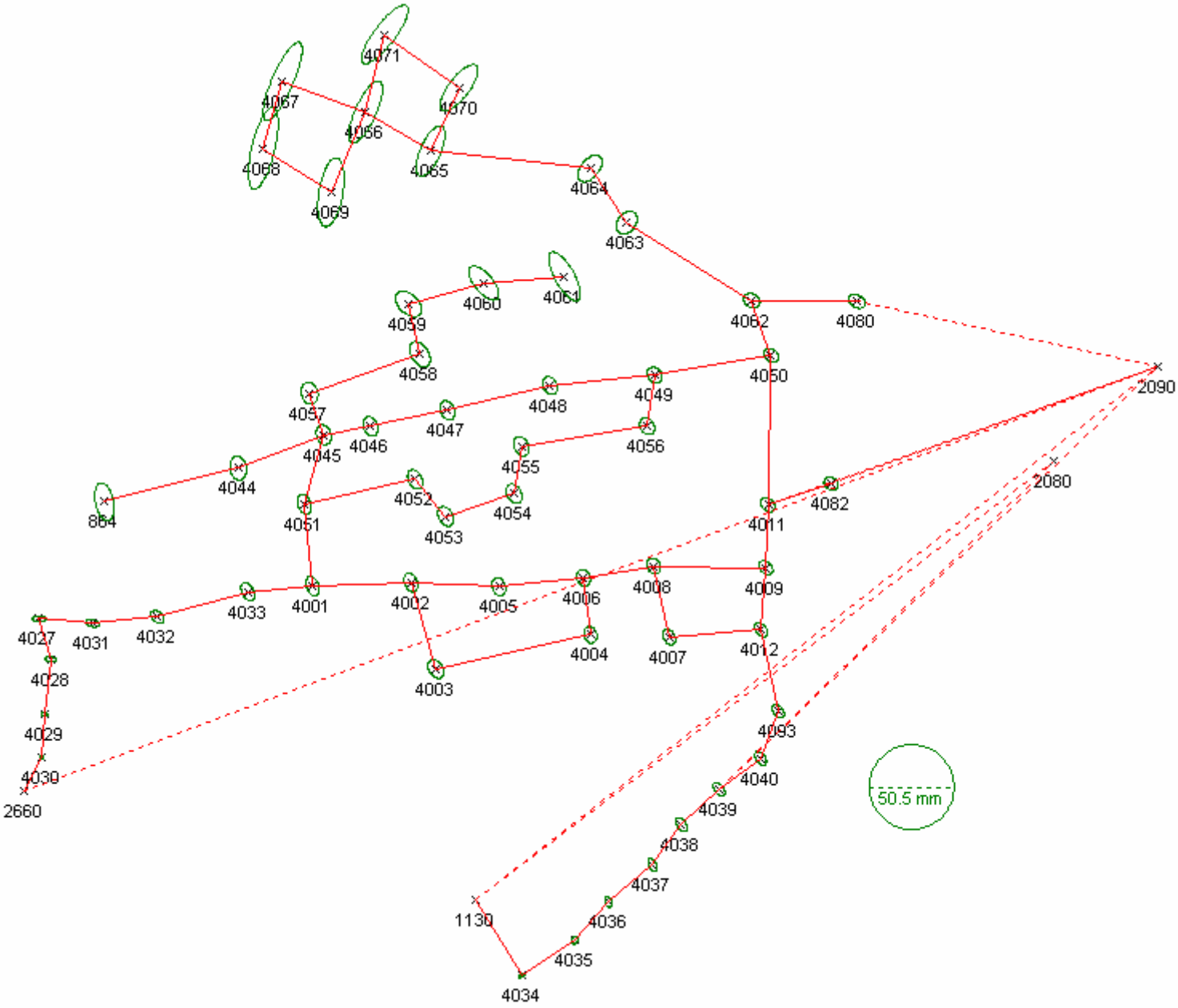
Průměrná hodnota vyrovnané délky	[m]	: 127.4179
Základní střední chyba m0 apriorní	[cc]	: 10.00
Základní střední chyba m0 aposteriorní	[cc]	: 12.59
m0 aposteriorní / m0 apriorní		: 1.26
Interval spolehlivosti		: 0.74 - 1.26
Průměrná střední chyba vyrovnaného směru	[cc]	: 17.23
Střední souřadnicová chyba mxy	[mm]	: 26.21

Obrázek 15: Konfigurace vázané sítě



Kvůli přehlednosti zde uvádím detail střední části volné sítě na obrázku (15). Opět na něm nejsou úplná čísla bodů jedná se o body (1905)2090, (1905)2080, (1910)1130, (1910)2660.

Obrázek 16: Detail vázané sítě



Další parametry vázané sítě viz technická zpráva v příloze 4.

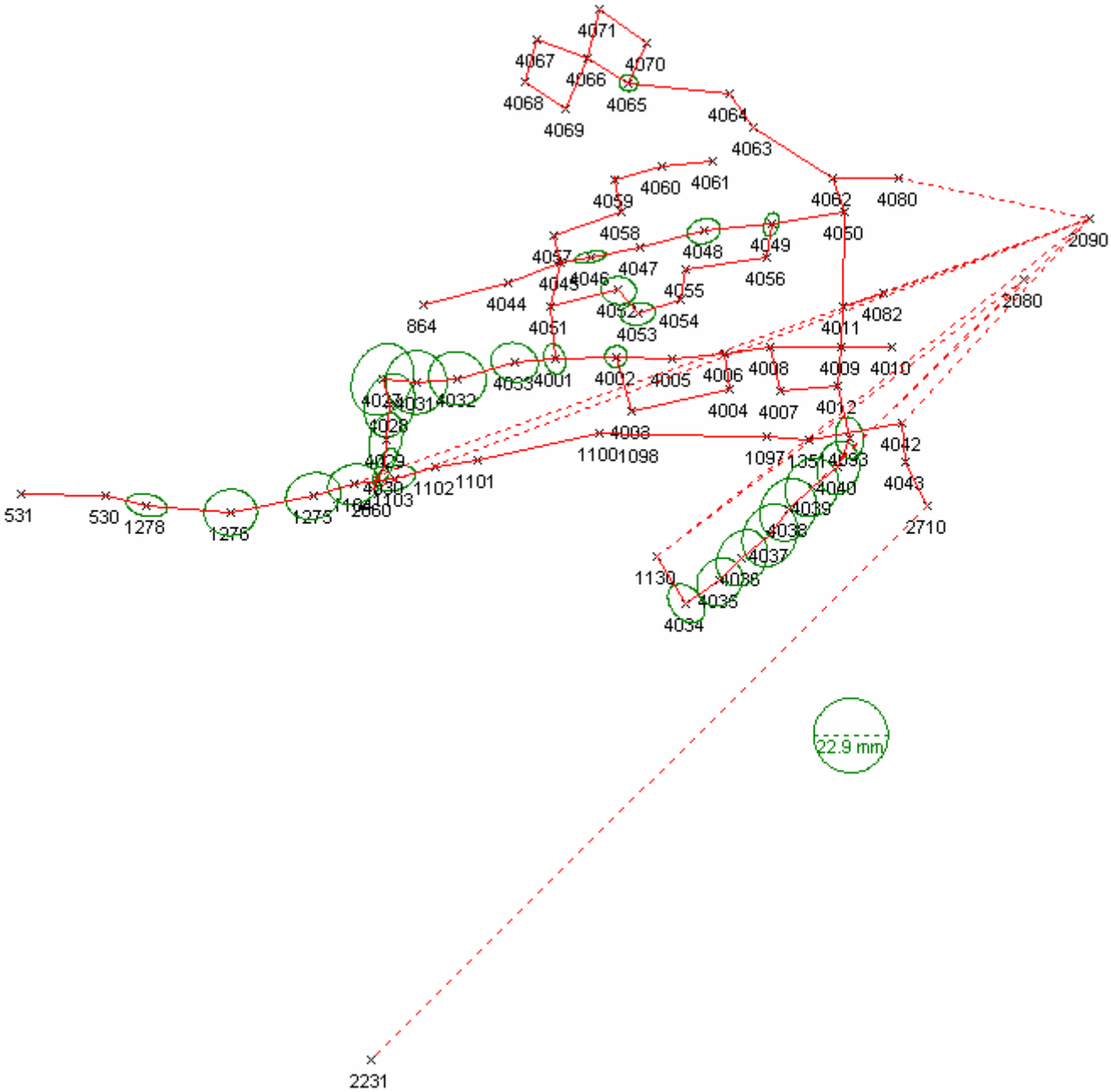
5.1.2.3 Vyrovnání vložené sítě

Konfigurace vložené sítě a elipsy výsledných chyb jsou znázorněny na obrázku (16). Síť je připojena na všechny pomocné měřické body určené GPS viz kapitola 5.1.1. Na obrázku (16) jsou neúplná čísla bodů jedná se o body (1905)2090, (1905)2080, (1910)1130, (1910)2660, (1910)2710, (2806)2231.

Apriorní chyba měřené délky	[mm]	: 12 + 3 ppm
Apriorní chyba měřeného směru	[cc]	: 38
Průměrná střední chyba vyrovnané délky	[mm]	: 7.76
Průměrná hodnota měřené délky	[m]	: 127.5777
Průměrná hodnota vyrovnané délky	[m]	: 127.5727

Základní střední chyba m0 apriorní	[cc]	: 10.00
Základní střední chyba m0 aposteriorní	[cc]	: 11.31
m0 aposteriorní / m0 apriorní		: 1.13
Interval spolehlivosti		: 0.87 - 1.13
Průměrná střední chyba vyrovnaného směru	[cc]	: 33.46
Střední souřadnicová chyba mxy	[mm]	:13.63

Obrázek 17: Konfigurace vložené sítě



Další parametry této volné sítě viz technická zpráva v příloze 4.

5.1.3 Porovnání vyrovnaných sítí

Z výsledků vyrovnání je patrné, že naměřené veličiny nekorespondují se sítí GPS. Aby poměr apriorní ku aposteriorní chybě nevybočil z intervalu spolehlivosti, musela být apriorní střední chyba směrů zvětšena z 15″ (použitých při vyrovnání vázané sítě) na 38″ a apriorní

střední chyba měřených délek z 5 mm + 3 ppm na 12 mm + 3 ppm. V středních chybách došlo k posunu průměrné střední chyby vyrovnané délky z hodnoty z hodnoty 3,18 mm (u vyrovnání vázané sítě) na hodnotu 7,76 mm (u vyrovnání vložené sítě). Ještě pro srovnání u volné sítě byla střední hodnota délky 3,15 mm (tato hodnota koresponduje s hodnotou u vázané sítě). Stejný trend lez pozorovat i u měřených směrů. Průměrná střední chyba vyrovnaného směru vzrostla z 17,23″ na 33,46″. Došlo tedy ke zkreslení, jak úhlových, tak délkových veličin. Zkreslení u úhlů i délek je zhruba dvojnásobné.

Zde je zřetelně vidět důležitost lokální transformace mezi ETRS a S-JTSK. Ačkoliv došlo ke zhoršení vnitřní přesnosti sítě, nejsou tím zásadně ovlivněny souřadnice nově určovaných bodů viz tabulka (10):

Tabulka 10: Srovnání souřadnic vázané a vložené sítě

Počet bodů (n)	44
Požadovaná střední chyba (U_{xy})	0.060m
Počet bodů s u_{xy} v intervalu <0, U_{xy}>	42 (95.5%)
Počet bodů s u_{xy} v intervalu (U_{xy}, $2U_{xy}$>	2 (4.5%)
Maximální dosažená střední odchylka v poloze (u_p)	0.085m
Výběrová střední souřadnicová chyba X (s_x)	0.035m
Výběrová střední souřadnicová chyba Y (s_y)	0.014m
Výběrová střední souřadnicová chyba (s_{xy})	0.026m

K výsledkům je třeba dodat, že dva body mimo interval požadované střední chyby jsou právě body 530 a 531 na volném konci problémového pořadu z bodu 19102710 na 531. Maximální polohová odchylka je dosažena právě na bodě 531. Pokud bychom tyto dva body vypustili, byla by výsledná s_{xy}=0,024 m a maximální u_p= 0,051 m (na bodě 4080). Další statistiky dalších bodů viz technická zpráva v příloze 4.

5.2 Měření podrobných bodů polohopisu v KÚ Kralovice

V rámci obnovy katastrální mapy KÚ Kralovice přepracováním na DKM byly nově zaměřovány, v tomto katastru, některé parcely nebo jejich části. Měření probíhalo metodami GPS, konkrétně technologií RTK. Lokální transformační klíč pro RTK byl získán z předchozího měření PBPP v tomto katastrálním území a je uveden v příloze 5.

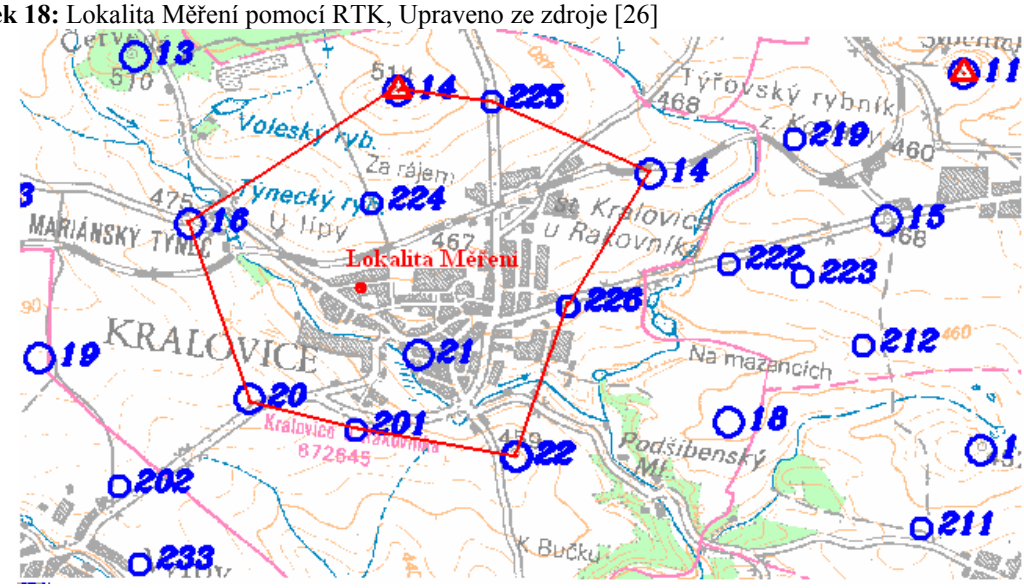
Určení PBPP probíhalo podobným způsobem, jak je popsáno v kapitole 5.1.1. Toto měření odpovídá všem právním náležitostem a bylo převzato do dokumentace katastrálního úřadu Kralovice. Tím je zajištěna i platnost transformačního klíče. Vzhledem k velkému rozsahu prací na tomto klíči, se mi nepodařilo získat kompletní dokumentaci použitou k jeho tvorbě. Obdržel jsem pouze samotný transformační klíč, seznam identických připojovacích bodů (bez jejich souřadnic) a odchylky po transformaci na bodech klíče.

Jako připojovací body pro definici transformačního klíče jsou použity body sítě DOPNUL a vybrané údržby, dále pak pomocné měřické body určené klasickými metodami v S-JTSK a zároveň rychlou statikou metodou v ETRS. Síť pomocných připojovacích bodů je velmi hustá. Vzdálenost mezi sousedními body činí vždy pouze několik set metrů. Lokalita měření pomocí RTK se nachází bezpečně uvnitř sítě připojovacích bodů, viz obrázek (18).

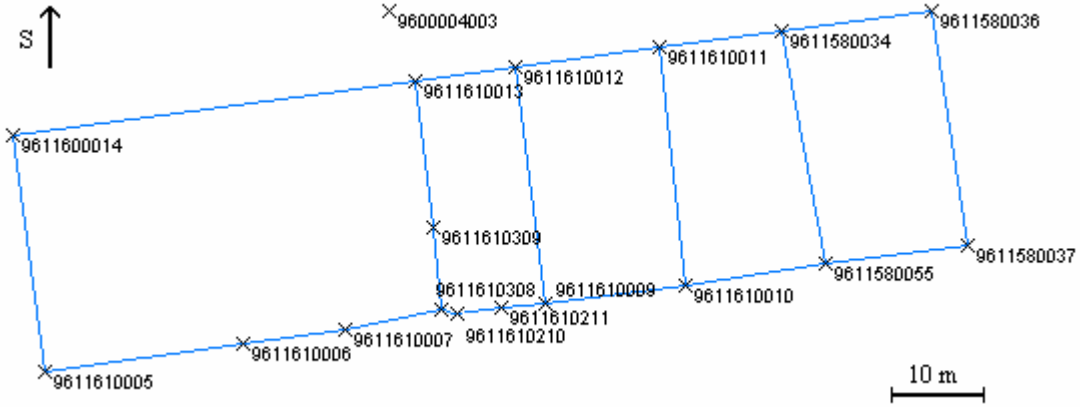
Dále jsem získal souřadnice bodu, na kterém byla postavena referenční stanice pro soustavu RTK. Jednalo se o bod 9600004003, který byl použit v transformačním klíči jako jeden z identických bodů: má tedy platné souřadnice v ETRS s také v S-JTSK a lze ho použít jako připojovací bod. Vzdálenost mezi místem měření a připojovacím bodem je přibližně 30 m.

Celkem bylo zaměřeno 15 podrobných bodů, jedná se o rohové body zahradních parcel. Výsledek měření byl ověřen kontrolními oměrnými. Dopustné odchylky nebyly překročeny. Technická zpráva a protokoly k tomuto měření jsou v příloze 5. Během měření byly splněny podmínky měření určené v kapitole 4.3.4.2. Zároveň všechna měření proběhla dle platných legislativních předpisů pro katastr nemovitostí viz technická zpráva v příloze 5. V této příloze je uveden i seznam souřadnic výsledných bodů.

Obrázek 18: Lokalita Měření pomocí RTK, Upraveno ze zdroje [26]



Obrázek 19: Konfigurace bodů zaměřených RTK



Tabulka 11: Test měřených souřadnic s oměrnými měřenými pásmem:

počet délek vyhovujících kritériu $\|d_m-d_k\|<=0,06$ m	21, tj. 100%, celkového počtu délek
počet délek vyhovujících kritériu $\|d_m-d_k\|<=0,06$ m	21, tj. 100%, celkového počtu délek

Kde d_m je délka měřená a d_k je délka vypočtená ze souřadnic změřených bodů.

6 Závěr

V prvních dvou kapitolách mé diplomové práce jsem se snažil obecně popsat družicový navigační systém GPS- NAVSTAR. Uváděl jsem jak byl budován, z jakých částí se skládá, na jakých principech funguje, jaké jsou jeho klady zápory a aplikace. Protože se systém GPS neustále vyvíjí a zdokonaluje, snažil jsem se poukázat na směry a možnosti tohoto rozvoje.

U problematiky geodetických měření, která lze za pomoci tohoto družicového navigačního systému provádět, jsem se nažil upozornit na určování přesné polohy systémem GPS, jaké metody lze využít, s jakými úskalími musíme počítat a naopak jaké výhody zde existují. Snažil jsem se uvést komplexní seznam vlivů na měření, aby bylo možné si udělat dobrou představu s jakými problémy se technologie potýká a jak je třeba jim při měření předcházet. To platí jak o samotných měřických metodách a metodách zpracování výsledů měření, ale také o navázání výsledků měření na geodetické základy platné pro KN.

Finálním výsledkem práce je pak metodický návrh jak postupovat při měření pomocí technologie GPS, aby bylo možné výsledky těchto prací převzít do katastru nemovitostí ČR. V průběhu mé práce byla vydána oficiální pravidla [5], která do značné míry korespondují se zde předkládaným návrhem a po jejich shlédnutí jsem upravil několik mých špatných závěrů.

Jeden z bodů v navrhovaném návodu, kde se rozcházím s pravidly [5] jsou dopustné hodnoty DOP při GPS měřeních. Nestanovoval jsem napevno hranici těchto parametrů, ale ponechal jsem ji dle jejich definice závislou na základní střední souřadnicové chybě měření.

Dlouho jsem přemýšlel, zda v návodu ponechat požadavek dvojího nezávislého určení bodu PBPP. To, že bod musí být určen dvakrát je nesporné, ale nezávislá konfigurace družic mezi prvním a druhým zaměřením je v několika ohledech nepotřebným požadavkem. Měření je kvůli tomuto méně ekonomické: měřič musí čekat 3 hodiny na měřeném bodě nebo se na bod opětovně vrátit. Důvodem tohoto nařízení nezávislé konfigurace je obava z chyb vniklých převážně špatnou geometrií družic, atmosférickými poruchami, vlivy šíření signálu atd. (více viz kapitola 2.4).

Ovšem v systém GPS zároveň poskytuje možnosti tyto chyby kontrolovat. Matematický model chyb poloh družic je vyjádřen parametry DOP. Atmosférické korekce lze opravit měřením na dvou frekvencích nebo použitím diferencí (viz kapitola 2.2). Počet viditelných družic hlídá GPS přístroj, přesné efemeridy lze získat atp. Ovšem prozatím nevím uspokojivý způsob, jak kontrolovat chyby z špatného příjmu signálu a jeho vícecestného šíření, proto jsem požadavek nezávislého zaměření ponechal.

Výsledky měření shrnuté v kapitole 5.1.3 ukazují, že síť zaměřená metodou GPS je po transformaci zkreslená. Střední chyby hodnot při pokusu vložit geodeticky zaměřenou síť na GPS body dvojnásobně vzrostly. Předtím si u volné i vázané sítě drželi stejné hodnoty. Nicméně souřadnice bodů vázané sítě jsou s se souřadnicemi GPS bodů velice dobře shodné díky způsobu transformace GPS sítě na lokální připojovací body.

7 Použitá literatura

1. Kostelecký, J. - *K převodu výsledků měření aparaturami GPS do souřadnicového systému S-JTSK* **Seriál :Geodetický a kartografický obzor Svazek/Č 39/7; Stránky s. 133 - 139, 4 obr.; Rok 1993**

2. Karský, G., Kostelecký, J., Novák, P., Šimek, J., - *Budování sítě nultého řádu na území České a Slovenské republiky*, **Nakladatel VÚGTK; Místo vydání Zdiby; Rok vydání 1993; 44 s., příl.**

3. Karský, G.- *Výzkumná zpráva č.997 K PROBLEMATICE SYSTÉMU OVĚŘOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ GPS, Zdiby; VÚGTK VÝZK-Z 997/1*; **Vydal: VÚGTK, 1999 – 17 s.: 3 obr. – Lit.16.**

4. *Technologický postup pro revizi a zřizování zhušťovacích bodů, ve znění č.j. 2112/1997-22 ze dne 23.5.1997, dodatku č. 1 č.j. 1131/1998-22 ze dne 27.3.1998, dodatku č. 2 č.j. 2086/1998-22 ze dne 28.5.1998*; **Vydal: ČÚZK 1998**

5. *PRAVIDLA Českého úřadu zeměměřického a katastrálního pro přejímání a hodnocení výsledků určení bodů podrobného polohového bodového pole a podrobných bodů technologií GPS*; **Č.j.: 5896/2003-22; ČUZK 2004**

6. Leitmannová, Katarína, Klobušiak, Matěj- *Slovenská permanentná GNSS služba na prevádzkovanie slovenského priestorového obseravačného systému – Nové geodetické priestorové základy*; **GKU 2002, Dokument PDF; zdroj www.gku.sk**

7. Leitmannová, Katarína, Klobušiak, Matěj, Priam, Štefan, Ferianc, Dušan - *SKTRF 2001 – Referenčný rámec pre štátmu priestorovú sieť*; **GKU 2001, Dokument PDF; zdroj www.gku.sk;**

8. Rapant, Pertr- *Družicové polohové systémy*; **Vydáno: Ostrava 2002 počet stran 200. Vydala VŠB – Technická univerzita Ostrava; ISBN 80-248-0124-8**

9. Švábenský, Otakar, Fixel, Jan, Weigel, Josef- *Základy GPS a jeho praktické aplikace*; **Vyšlo v srpnu 1995; Vydavatel Fakulta stavební VUT v Brně; Akademické nakladatelství CERM s.r.o Brno; ISBN 80-214-0620-8**

10. *Zpracování měření GPS, sborník referátů;* **Brno 4.2.2003, Referáty**

- **10-1. Kratochvíl, V.-** *Základní principy a možnosti autonomního určení polohy bodu pomocí GPS*; **VA Brno**
- **10-2. Hefty, J., Kratochvílová, H., Kováč, M.-** *Metody analýzy výsledkov dlouhodobých meraní permanentních staníc GPS;* **STU Bratislava**
- **10-3. Mervart, L., Lukeš, Z.-** *Metody řešení ambiguit v režimu RTK;* **ČVUT Praha**

11. *Prostorový referenční rámec v České Republice, Správa a modernizace*; **Sborník referátů; Brno 1.2.2001; VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie**

- **11-1. Raděj, K.-** *Geodetické referenční systémy v AČR – vývoj a perspektiva*
- **11-2. Provázek, Jiří-** *Správa a modernizace geodetických základ;* **Zeměměřický úřad;**

12. *GPS- diferenční systémy a RTK; Sborník referátů*; **Brno 12.2.2002; VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie**

- **12-1. Hampl, Kobrle-** *Výsledky testování GPS aparatur firmy Leica Geosystems*
- **12-2. Jindra, David** - *RTK a DGPS systémy Trimble;* **Geortonics Praha, s.r.o.**
- **12-3. Landsperský, David, Šimek, Jaroslav, Kostelecký, Jan-** *Vývoj přesného systému DGPS s využitím Internetu a postprocessingu v resortu ČUZK;*

13. *GPS stručný přehled a základy;* **Zdroj: http://gama.fsv.cvut.cz/~hampl/gps.html; stav k roku 2004;**

14. *Internetové stránky společnosti by/S@T group a.s.;* **Zdroj: http://www.bysat.net/ ; Stav k roku 2004;**

15. Kostelecký, Jakub, Šimek, Jaroslav– *Projekt permanentní sítě DGPS, technická zpráva č.1051/2003- verze 1.0;* **VUGTK Zdiby, Ondřejov srpen 2003;**

16. *NAŘÍZENÍ VLÁDY 116/1995 Sb. ze dne 19. dubna 1995,kterým se stanoví geodetické referenční systémy, státní mapová díla závazná na celém území státu a zásady jejich používání*;

17. *Křovákovo zobrazení*; **Zdroj: http://krovak.webpark.cz/index.htm; Stav k roku 2004;**

18. Hrdina, Z., Pánek, P., Vejražka, F.- *Rádiové určování polohy. (Družicový systém GPS)*; **vysokoškolské skriptum, ČVUT Praha, 1996. 267 stran;**

19. Novák, Pavel, Karský, Gregorij- *Česká a slovenská síť nultého řádu, řešení 1993-CSNUL92(93);* **VÚGTK Zdiby 1994, publikace č.11, ročník 40**

20. *The International Terrestrial Reference Frame ITRF;* **Zdroj: http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/ ;**

21. Kostelecký, Jan - *Výzkumná zpráva 1021/2001, K možnostem zpřesnění polohových základů v ČR*; **VÚGTK Zdiby, listopad 2001**

22. Kostelecký, J., Dušátko, D.- *Geodetické referenční systémy v ČR: Vývoj od klasických ke geocentrickým souřadnicovým systémům;***VÚGTK a VZÚ, ročník 44, č. 21.1998. 186 s.**

23. Provázek, J.- *Vývoj polohových základů na území České republiky*; **Praha: ZÚ, 1999. 11 s.**

24. Kostelecký, Jan- *Geocentrický systém a trigonometrická síť České republiky;* **Sborník prací 1996.; Roč.41.; Zdiby: VÚGTK, 1997. - s.23-30.**

25. *TP pro revizi a zřizování zhušťovacích bodů, ve znění č.j. 2112/1997-22 ze dne 23.5.1997 ve znění dodatku č. 1 č.j. 1131/1998-22 ze dne 27.3.1998 a dodatku č. 2 č.j. 2086/1998-22 ze dne 28.5.1998;* **Vydal: ČUZK 1998**

26. *Databáze trigonometrických a zhušťovacích bodů DTATZ;* **Zdroj: http://dataz.cuzk.cz/**

Přílohy

Příloha 1

Přehledka bodů PBPP a pomocných měřických bodů v KÚ Domažlice. Přehledka je vložena do desek společně s diplomovou prací. Soubory s přehledkami jsou uloženy na přiloženém CD v adresáři *Měření/Přehledky*

Příloha 2

Technická zpráva k rekonstrukci PBPP v KÚ Domažlice. Zpráva je umístěna na přiloženém CD v adresáři *Měření/TC_Domažlice*. Přiložené CD viz příloha 6.

Příloha 3

Projekt sítě GPS v KÚ Domažlice. Projekt a jeho technická zpráva jsou umístěny na přiloženém CD v adresáři *Měření/GPS_Domažlice*. Přiložené CD viz příloha 6.

Příloha 4

Technická zpráva o vyrovnání sítí z kapitoly 5.1.2. Tato zpráva je uložena na přiloženém CD v adresáři *Měření/Vyrovnání* . Přiložené CD viz příloha 6.

Příloha 5

Technická zpráva o měření bodů podrobného polohopisu v KÚ Kralovice metodou RTK. Tato zpráva je uložena na přiloženém CD v adresáři *Měření/RTK_Kralovice*. Přiložené CD viz příloha 6.

Příloha 6

CD přiložené k této diplomové práci. CD obsahuje adresáře

- **měření**- zde jsou data, výpočetní protokoly a technické zprávy z měření
- **text**- zde jsou uloženy všechny texty, které jsem nabíral v rámci zpracování diplomové práce