

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Numerické metody určení polohy z dat GPS

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Ing. Bohuslav Peterka, Ph.D.

Autor diplomové práce: Bc. Aleš Hrobský

PRAHA 2013

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra jakosti a spol. strojů

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hrobský Aleš

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Numerické metody určení polohy z dat GPS

Anglický název

Numerical methods for evaluating GPS data

Cíle práce

Cílem práce je popsat metody satelitního určování polohy, problematiku projekce do kartografických souřadných systémů a pro konkrétní příklad navrhnout a realizovat algoritmus pro určení vzájemné polohy dvou bodů z dat GPS ve vybraném souřadném systému.

Metodika

Student se seznámí s problematikou a vypracuje literární rešerši k tématu práce. Bude vybrán vhodný projekční a souřadný systém a pro něj sestaven a popsán alespoň jeden algoritmus pro určení vzájemné polohy dvou bodů. V praxi bude provedeno měření užitím navrženého postupu. Závěr práce bude obsahovat shrnutí a diskuzi k použitelnosti popsaných metod.

Osnova práce

1. Úvod
2. Literární rešerše
3. Vlastní práce
4. Diskuze
5. Závěr
6. Literatura

Rozsah textové části

50-60 stran

Klíčová slova

GPS, navigace, projekce, geografie, určení polohy

Doporučené zdroje informací

ŠVÁB, Ondřej. Satelitní určování polohy : Současný stav. ČZU, 2009. 36 s.
Přednáška. ČZU.

KRATOCHVÍL, Vlastimil. Problematika určení polohy autonomním měřením GPS pro účely geodetického zabezpečení :
Habilitační práce. Brno : Vojenská akademie, 2003. 114 s.

BÖHM, Josef. Transformace souřadnic v geodesii. 1., Praha : Knihovna Typus, 1948. 31 s.

Vedoucí práce

Peterka Bohuslav, Ing., Ph.D.

Termín zadání

listopad 2011

Termín odevzdání

duben 2013

prof. Ing. Josef Pošta, CSc.

Vedoucí katedry



prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Dekan fakulty

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Bohuslava Peterky, Ph.D. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal. Další informace mi poskytl Ing. Ondřej Šváb z Ministerstva dopravy.

V Praze dne

.....

Aleš Hrobský

Poděkování:

Zde bych chtěl poděkovat za ochotu a vstřícnost za poskytnuté informace Ing. Ondřeji Švábovi z Ministerstva dopravy. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Bohuslavu Peterkovi, Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce za trpělivost, poskytnutí důležitých informací a podporu při vytváření této práce.

Abstrakt: Cílem této diplomové práce bylo navrhnout algoritmu pro vzájemné určení polohy dvou bodů ve vhodném souřadném kartografickém systému. V kapitole „Určování polohy“ je nastíněn vývoj určování polohy. Dále tato kapitola obsahuje charakteristiku používaných souřadnicových systémů a jejich rozdíly. Také je definována vhodnost transformace do jiných souřadných systémů. V kapitole „Navigační systémy“ je popsán princip zjišťování polohy a jejich vlastnosti. Dále jsou charakterizovány technologie určování polohy pomocí navigačních systémů a jejich vlastnosti. V závěru práce „Vlastní práce“ jsou popsány jednotlivé možnosti výpočtu vzdálenosti dvou bodů. Práce je ukončena diskuzí o dané problematice.

Klíčová slova:

J-TSK, WGS-84, GNSS, GPS, Galileo, Glonass, Ortodroma, Loxodroma

Summary: The aim of this diploma thesis was to designing the algorithm for the mutual positioning of two points in an appropriate coordinate cartographic system. In the chapter „Determining the position“ is outlining the development of positioning. Further, this chapter includes characteristics used coordinate systems and their differences. Also is defined suitability transformation to other coordinate systems. In the chapter „Navigation systems“ is describes the principle of position detection and their properties. There are also characterized positioning technology with navigation systems and their properties. In conclusion „My work“ describes the different options for calculating the distance between two points. This diploma thesis is concluded with discussion about certain problems together with it's summary.

Key words:

J-TSK, WGS-84, GNSS, GPS, Galileo, Glonass, Great-circle, Rhumb lines

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíl práce a metodika	2
3. Určování polohy	3
3.1. Určování polohy nepřímým měřením	3
3.2. Určování polohy přímým měřením.....	5
3.2.1. Datum.....	6
3.2.2. Souřadnicový systém	7
3.2.3. Souřadnicový referenční systém	7
3.3. Souřadnicové systémy pro určování horizontální polohy	9
3.3.1. Geografický souřadnicový systém.....	9
3.3.2. Geodetický souřadnicový systém	10
3.3.3. Souřadnicové systémy kartografických zobrazení	11
3.3.4. Sférický diskrétní souřadnicový systém	15
3.3.5. Lokální souřadnicové systémy.....	18
3.4. Používané souřadnicové systémy.....	18
3.4.1. WGS 84.....	20
3.4.2. S-JTSK.....	21
3.5. Transformace souřadnic z WGS-84 do S-JTSK	23
4. Navigační systémy	25
4.1. Princip družicové navigace	25
4.1.1. Čas	26
4.1.2. Výkon signálu	27
4.1.3. PRN Code	27
4.1.4. Přesnost určení polohy.....	29
4.2. Systémy.....	30
4.2.1. GPS	30

4.2.2.	GLONASS	31
4.2.3.	Galileo.....	32
4.2.4.	Beidou / Compass	33
4.2.5.	IRNSS	35
5.	Vlastní práce	36
5.1.	Vzdálenost dvou souřadnic	36
5.1.1.	Ortodroma	39
5.1.2.	Loxodroma.....	40
5.1.3.	Pythagoras.....	41
5.2.	Výpočet vzdálenosti Londýn – New York.....	42
5.2.1.	Výpočet pomocí ortodromy	43
5.2.2.	Výpočet pomocí loxodroma.....	44
5.2.3.	Porovnání výsledků.....	45
5.3.	Výpočet úhlu mezi souřadnicemi.....	45
5.4.	Odchyšky algoritmů	47
5.5.	Modelový příklad	49
6.	Diskuze	51
7.	Závěr	52
5.	Seznam použitých zkratk	54
6.	Citovaná literatura.....	54
7.	Seznam obrázků.....	56
8.	Seznam tabulek	57
9.	Seznam příloh	57

1. Úvod

Posledních několik desetiletí dvacátého století je charakteristických mimo jiné i nástupem nové kategorie informačních technologií, zabývajících se daty a informacemi vztahujícími se k Zemi a jejímu bezprostřednímu okolí. Hovoříme proto o geodatech a geoinformacích a těmto technologiím říkáme geoinformační. Asi nejznámější z těchto technologií jsou geografické informační systémy (GIS), ale stále častěji se setkáváme i s další z nich, s technologií družicových navigačních a polohových systémů. Tyto systémy umožňují v nejmodernějším pojetí určovat polohu a provádět navigaci za jakéhokoliv počasí, kdykoliv a kdekoliv na zemském povrchu, případně i v přilehlém kosmickém prostoru. Z tohoto pohledu jedinou omezující podmínkou je přímá viditelnost na oblohu.

Jestliže chceme porovnávat údaje GPS s údaji v mapě, je nutné, aby tyto údaje byly vyjádřeny ve stejném souřadnicovém systému, ve kterém je zobrazena mapa. Poloha GPS je implicitně udávána v souřadnicovém systému WGS-84. Tento systém není definován geometricky, ale fyzikálně. Jako normální zemské těleso byl podle Pizzettiho zvolen hladinový rotační elipsoid, jehož základní parametry, velikost, tvar, hmotnost, rychlost rotace, byly odvozeny z pozorování, zejména pak z pozorování družic. WGS-84 byl definován souborem pozemních stanic a polohami družic navigačního systému GPS a představuje tak geocentrický absolutní souřadnicový systém. V České Republice používaný systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální (S-JTSK) byl definován na bázi trigonometrické sítě a vykazuje nepravidelně měnící se lokální deformace.

Tato práce se zabývá teoretickými aspekty geoinformatiky a geoinformačních technologií. Jejím cílem je poskytnout základní informace potřebné pro porozumění těmto oblastem.

2. Cíl práce a metodika

Cílem práce je popsat metody satelitního určování polohy, problematiku projekce do kartografických souřadných systémů a pro konkrétní příklad navrhnout a realizovat algoritmus pro určení vzájemné polohy dvou bodů z dat GPS ve vybraném souřadném systému.

Student se seznámí s problematikou a vypracuje literární řešení k tématu práce. Bude vybrán vhodný projekční a souřadný systém a pro něj sestaven a popsán alespoň jeden algoritmus pro určení vzájemné polohy dvou bodů. V praxi bude provedeno měření užitím navrženého postupu. Závěr práce bude obsahovat shrnutí a diskuzi k použitelnosti popsaných metod.

3. Určování polohy

Navigací je označováno umění dostat se efektivně a bezpečně z jednoho místa na druhé. Nejspíš si to neuvědomujeme, ale používáme prostředky primitivní navigace i v každodenním životě, například při pohybu po městě, kdy využíváme právě navigace podle orientačních bodů.

Zpočátku člověk používal pro potřeby určení polohy a následné navigace úhlová měření, a to ať k bodům na zemském povrchu, nebo ke hvězdám. Později, s nástupem radiových vysílačů, se začali objevovat navigační systémy založené na vysílání a příjmu rádiových signálů. Se vznikem umělých družic obíhajících kolem Země, vznikly družicové navigační systémy [1].

Určováním polohy se označují procesy používané ke stanovování polohy bodů v prostoru. Poloha bodu je vyjadřována pomocí souřadnic ve zvoleném souřadnicovém systému. Polohu lze určovat dvěma základními způsoby:

- přímím měřením,
- nepřímím měřením.

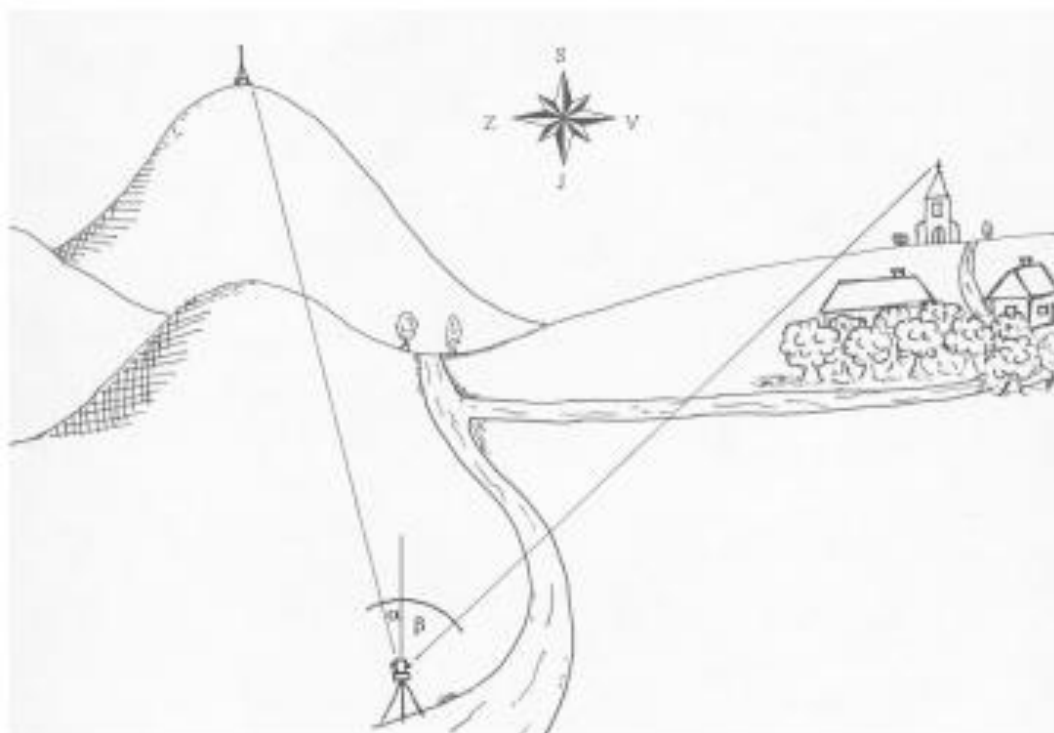
3.1. Určování polohy nepřímím měřením

U nepřímého měření se poloha určuje na základě vyhodnocení měření jiných veličin, než jsou přímo souřadnice. Požívají se tři metody:

- úhloměrná měření,
- dálkoměrná měření,
- kombinace.

Určování polohy **úhloměrným měřením** patří k nejrozšířenějším způsobům. Je založeno na jednoduchém principu: z místa, jehož polohu chceme určit, změříme azimuty k alespoň dvěma známým bodům, které lze lokalizovat na mapě. Těmito body pak na mapě proložíme přímky, jejichž úhly měřené od severu odpovídají naměřeným azimutům (Obrázek 1).

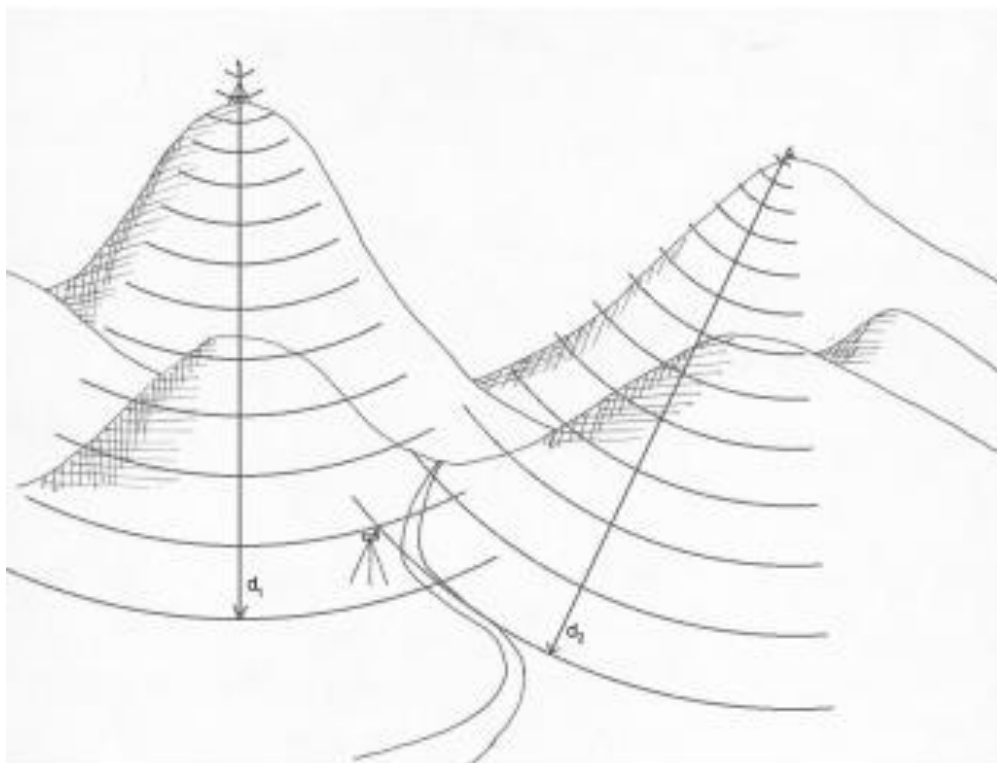
Obrázek 1 Určování polohy nepřímým měřením



Zdroj: [1]

Dálkoměrná měření. Tento způsob je méně častý, ale využívá se při určování polohy neznámého bodu pomocí rádiových signálů. Signál se vysílá z vysílače o známé poloze. Na základě vyhodnocení signálu z daného vysílače přijímač určí svoji vzdálenost od tohoto vysílače. Bod, v případě dvourozměrného prostoru, leží na kružnici se středem v místě vysílače a poloměrem daným určenou vzdáleností. Pokud určíme vzdálenost bodu k alespoň dvěma vysílačům, určíme hledanou polohu jako průsečík dvou kružnic (Obrázek 2). Typickým představitelem určování polohy na základě dálkoměrných měření je systém GPS [1].

Obrázek 2 Dálkoměrná měření



Zdroj: [1]

Kombinace úhломěrných a dálkoměrných měření. Tato metoda je rovněž často využívána. Např. určení polohy s využitím radaru nebo stanice. Vlastní měření může být uspořádáno dvěma způsoby:

- z bodu o známých souřadnicích provedeme odměření azimutu a vzdálenosti k neznámému bodu, nebo
- z bodu o neznámé poloze provedeme zaměření azimutu a vzdálenosti ke známému bodu.

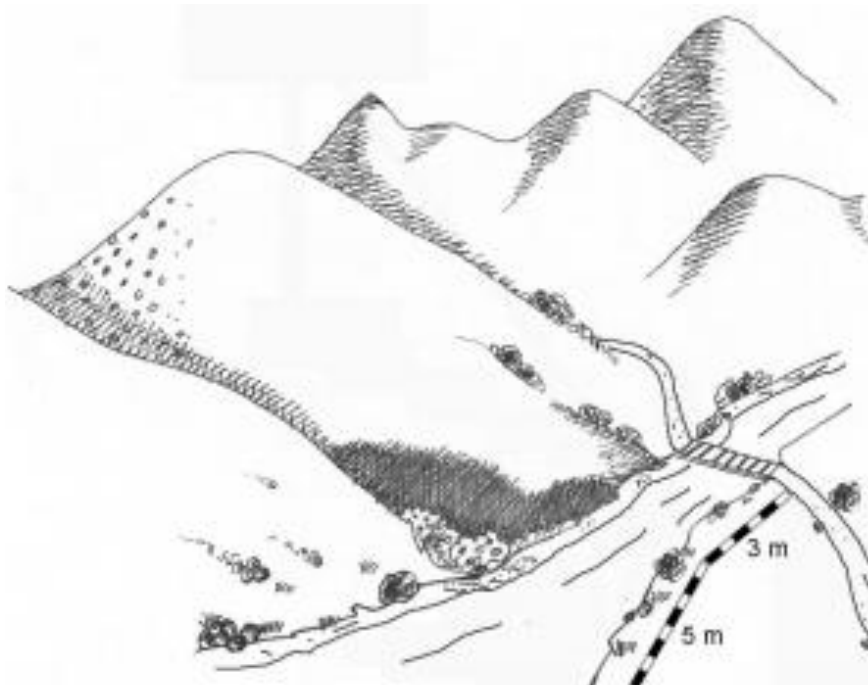
Poté se jednoduchým výpočtem nebo geometrickou konstrukcí určuje poloha neznámého bodu [1].

3.2. Určování polohy přímím měřením

Určování polohy při přímém odměření se poloha určuje odměřením, např. vzdálenosti podél silnice, vodního toku, železnice (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Určení bodu v rovině je velice obtížné, běžné postupy nejsou k dispozici. Prakticky lze

k tomuto účelu využít jen některé moderní přístroje GPS. Pokud se na ně podíváme jako na černou skříňku, pak lze říci, že provádějí přímé měření své polohy.

Obrázek 3 Určování polohy přímým měřením



Zdroj: [1]

3.2.1. Datum

Datum je možné definovat takto [12]:

Datum definuje polohu počátku, měřítko a orientaci os souřadnicového systému.

Definice formulována v technické normalizační komisi č. 122 Českého normalizačního institutu (TNK 122 Geografická informace / Geomatika):

Datum je dáno sadou parametrů, popisujících polohu středu a tvar elipsoidu, měřítko, směr a orientaci souřadnicových os, dále sadou transformačních vztahů a nakonec sadou bodů na Zemi, jejichž souřadnice jsou v daném souřadnicovém systému jednoznačně dány.

Je nutné upozornit na některá úskalí této definice. Parametry elipsoidu nejsou v některých případech vyžadovány a dále poslední část definice se do jisté míry překrývá s pojmem prostorový referenční rámec.

Typy datumů

Rozlišujeme následující typy datumů [12]:

- Geodetické datum (angl. geodetic datum),
- Výškové datum (angl. vertical datum),
- Technické datum (angl. engineering datum, local datum).

Geodetické datum vyjadřuje vztah souřadnicového systému k Zemi. Používá se jako základ pro dvoj- a trojrozměrné systémy. Obvykle vyžaduje i definici elipsoidu.

Výškové datum popisuje vztah tíhově založených výšek k Zemi.

Technické datum nebo též lokální datum je takový, který nespadá ani do jedné z výše uvedených kategorií. Popisuje vztah souřadnicového systému k místní referenci [12].

3.2.2. Souřadnicový systém

Prostorové odkazování prostřednictvím souřadnic má své základy v matematice a analytické geometrii [13]. Poloha je popisována sadou souřadnic vztahující se ke zvolenému souřadnicovému systému. Souřadnicový systém lze definovat například takto [1]:

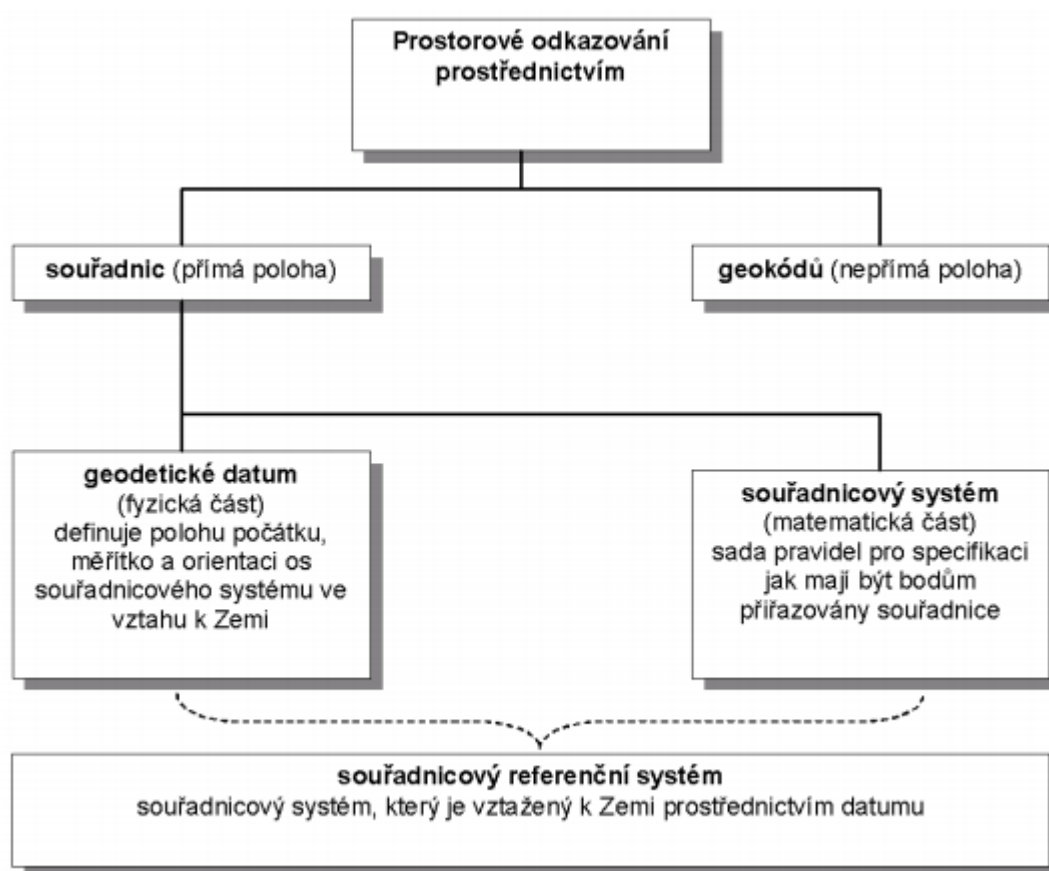
Souřadnicový systém je sada matematických pravidel pro specifikování způsobu, jakým jsou souřadnice přiřazovány k bodům v prostoru.

Zpravidla je definován svým počátkem, souřadnicovými osami a jednotkami, polohou a orientací os.

3.2.3. Souřadnicový referenční systém

Souřadnicový systém musí splňovat určitou podmínku – musí být vztažen k Zemi prostřednictvím *datumu*. Poté ho označujeme jako souřadnicový referenční systém (Obrázek 4).

Obrázek 4 Schéma souřadnicového referenčního systému



Zdroj: [1]

Souřadnicový referenční systém lze při mapování zvolit různým způsobem. V důsledku toho může mít stejné místo na Zemi v různých mapách různé souřadnice. Pokud za této situace používáme pro práci různé datové sady pokrývající sice stejnou oblast, ale pocházející z různých zdrojů a pořízené v různých souřadnicových referenčních systémech, bude nezbytné je homologovat na bázi stejného souřadnicového referenčního systému.

Složený souřadnicový referenční systém (angl. compound coordinate reference system) je zvláštním případem souřadnicového referenčního systému popisující polohu prostřednictvím dvou nezávislých souřadnicových referenčních systémů [12].

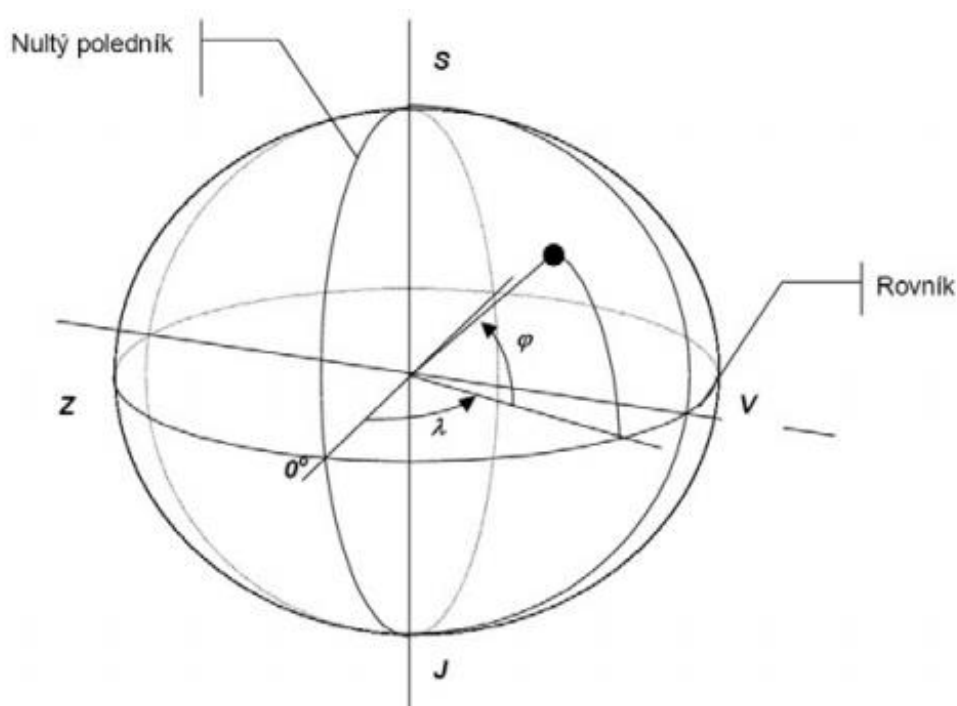
3.3. Souřadnicové systémy pro určování horizontální polohy

Souřadnicové systémy mohou být globální i lokální, kontinuální i diskrétní, jsou zpravidla absolutní a vztažené k zemskému tělesu nebo k rovině.

3.3.1. Geografický souřadnicový systém

Geografický souřadnicový systém (Obrázek 5) udává polohu na zemském povrchu pomocí zeměpisné šířky φ (angl. latitude) a zeměpisné délky λ (angl. longitude).

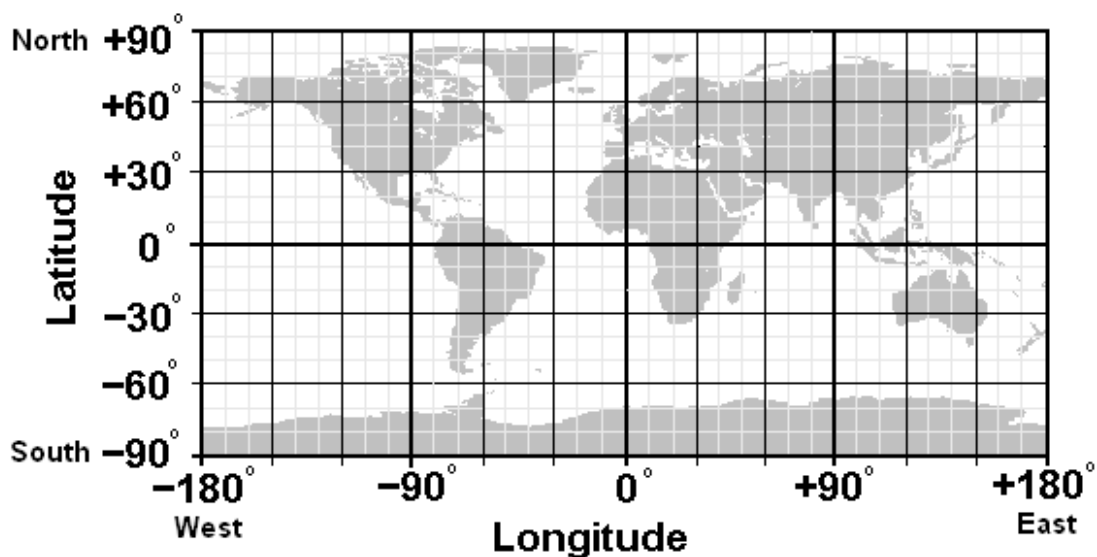
Obrázek 5 Geografický souřadnicový systém



Zdroj: [1]

Vektor vzdálenosti bodu od středu Země r není zadán explicitně, nýbrž jen implicitně – průměrem povrchem Země. Zeměpisná délka se udává ve stupních, nula stupňů odpovídá nultému poledníku. Směrem na východ od nultého poledníku se udává východní délka (v rozsahu $0 - 180^\circ$), směrem na západ pak západní délka (opět v rozsahu $0 - 180^\circ$). Zeměpisná šířka se udává rovněž ve stupních, nula stupňů odpovídá rovníku. Směrem na sever se udává severní šířka, na jih jižní šířka (Obrázek 6). Geografické souřadnice někdy ještě doplňují nadmořskou výškou h , udávanou v metrech [2].

Obrázek 6 Geografický souřadnicový systém

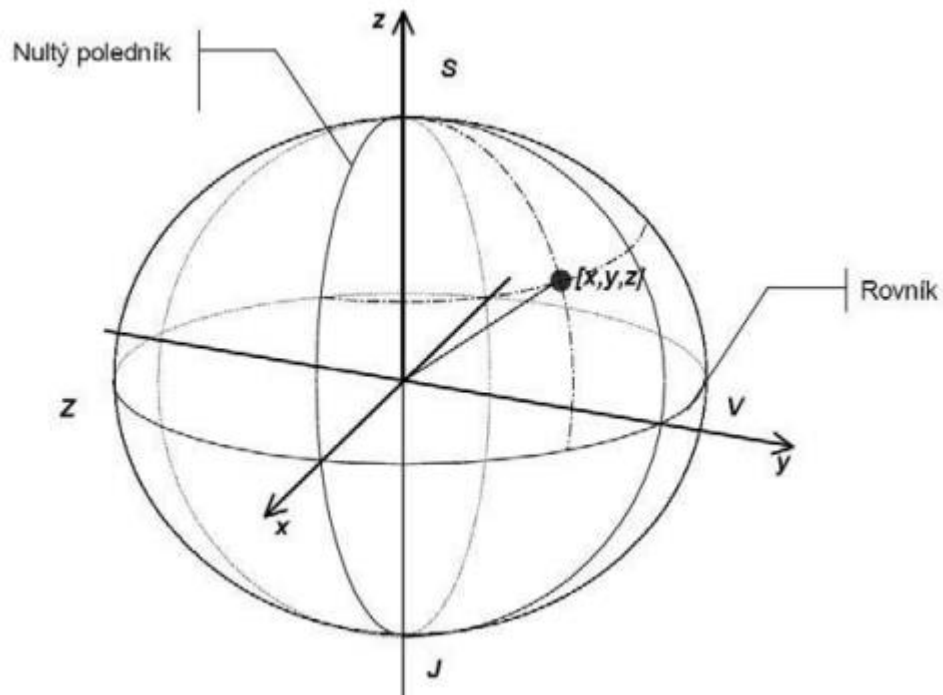


Zdroj: [http://www.satsig.net/lat_long.htm]

3.3.2. Geodetický souřadnicový systém

Geodetický souřadnicový systém (angl. Earth Centered coordinate system; ECEF) je kartézský souřadnicový systém vztažený k Zemi, která má počátek v jejím středu a poloha bodu je udávána trojicí souřadnic x,y,z (**Obrázek 7**). Osy x a y leží v rovině rovníku a osa z je k nim kolmá a ztotožňuje se s osou rotace Země [2].

Obrázek 7 Geocentrický souřadnicový systém



Zdroj: [14]

Podstatnou odlišností obou výše zmiňovaných systémů je, že zatímco v případě geografického souřadnicového systému je poloha definována jen dvěma souřadnicemi a automaticky se předpokládá, že popisovaný bod leží na povrchu Země, tak v případě kartézského souřadnicového systému je poloha bodu popsána třemi souřadnicemi. Výhodou geografického souřadnicového systému je proto jeho jednoduchost, zatímco výhodou kartézského souřadnicového systému je, že s jeho pomocí lze popsat polohu kteréhokoliv bodu, tedy i nad, případně pod povrchem Země [1].

Geografický i geodetický jsou globální, kontinuální a absolutní souřadnicové systémy vztahované k zemskému tělesu.

3.3.3. Souřadnicové systémy kartografických zobrazení

V průběhu historie jich byla definována celá řada. Jsou těsně svázány s konkrétními tzv. kartografickými zobrazeními. Chceme-li určitou část zemského povrchu zobrazit do roviny mapy, musíme provést následující kroky:

1. Zmenšit zobrazovanou oblast tak, aby se vešla na list papíru požadované velikosti.
2. Systematickým způsobem převést zakřivený povrch Země do roviny při zachování prostorových vztahů.

Při převodu zemského povrchu, kterému se říká *kartografické zobrazení*, se v podstatě jedná o složitou a vícestupňovou transformaci geografických souřadnic do odpovídajících souřadnic na mapě. Schematicky lze tuto transformaci zapsat [1]:

$$(\varphi, \lambda) \longrightarrow (x, y) \quad (1)$$

Ve skutečnosti se obvykle jedná o daleko složitější postup, využívající celé řady mezikroků, pracujících s různými plochami, které umožňují postupné zjednodušovat tvar zemského tělesa tak, aby bylo nakonec možné zobrazit ho v rovině. K nejčastěji používaným plochám patří [3]:

- Topografická plocha,
- geoid,
- referenční elipsoid,
- referenční koule,
- zobrazovací plocha,
- referenční rovina.

Topografická plocha. Povrch Země je velice složitý a členitý, než aby s ním bylo možné přímo pracovat. Proto se pro potřeby mapování a kartografie nahrazuje tzv. topografickou plochou (angl. topographic surface), která je spojitá a vyhlazuje mikrostrukturu reliéfu i jeho bezvýznamné, drobné tvary [4].

Geoid. Topografická plocha je stále ještě příliš mnohotvárná. Proto se obvykle nahrazuje jinou, fyzikálně definovatelnou plochou. Touto plochou je geoid, definovaný jako souvislá plocha, která je kolmá k tížnicím Země a prochází zvoleným nulovým výškovým bodem klidné hladiny. V místě oceánů je totožná s hladinou vody, v oblasti kontinentů je její průběh fiktivní. Jelikož je směr tížnic ovlivňován nepravidelným rozmístěním hmoty v zemské kůře, není povrch geoidu hladký, nýbrž mírně zvlněný, a to nejen v oblasti kontinentů, ale i oceánů [4].

Referenční elipsoid. I geoid je stále ještě příliš složitý. Navíc jeho průběh nelze matematicky jednoduše popsat. Pro potřeby zobrazování zemského povrchu na mapě se proto nahrazuje ještě jednodušší plochou — referenčním elipsoidem (angl. referenc ellipsoid). Ten může nahrazovat geoid buďto globálně pro celou Zemi, nebo jen lokálně. V prvním případě hovoříme o obecném zemském elipsoidu, jehož střed je totožný se

středem Země a jehož příkladem může být elipsoid světového geodetického systému WGS-84, který byl vypočten na základě družicových měření prováděných celosvětově a dlouhodobě pomocí družicových navigačních systémů. Povrch tohoto elipsoidu se ke geoidu přimyká natolik těsně, že maximální odchylky dosahují + 60 m. V druhém případě je elipsoid volen tak, aby se ke geoidu přibližoval co nejlépe jen v určité zájmové oblasti. V průběhu staletí zavedli kartografové celou řadu elipsoidů, vhodných pro různé účely a pro zobrazení různých částí povrchu zemského (Tabulka 1) [4].

Tabulka 1 Rozměry vybraných referenčních elipsoidů

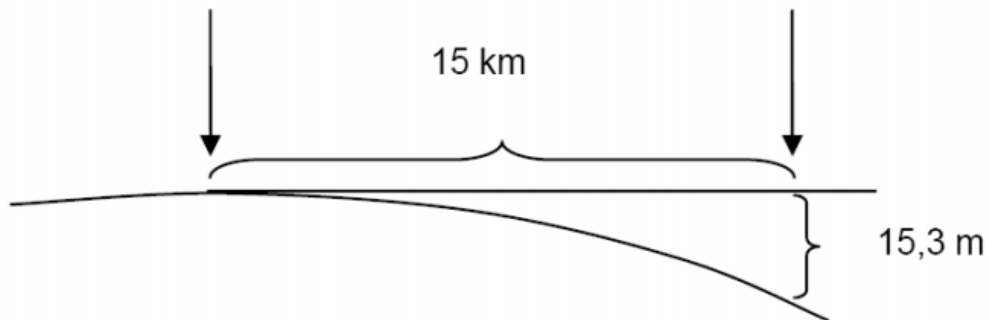
Název elipsoidu	Délka hlavní poloosy [m]	Délka vedlejší poloosy [m]
Elipsoid Besselův (1841)	6377379.16	6356078.96
Elipsoid Clarkův (1880)	6378249.15	6356514.87
Elipsoid Helmertův	6378200.00	6356818.17
International 1909 (elipsoid Hayfordův)	6378388.00	6356911.95
Elipsoid Krassovského (1940)	6378245.00	6356863.02
Mercury 1960	6378166.00	6356794.28
New International 1967	6378157.50	6356722.20
World Geodetic System 1972 (WGS 1972)	6378135.00	6356750.52
World Geodetic System 1984 (WGS 1984)	6378137.00	6356752.31
Referenční koule pro Křovákovo zobrazení	6380703.61	6380703.61

Zdroj: [5]

Referenční koule. Výpočty na elipsoidu jsou poměrně složité. Proto se využívá skutečnosti, že referenční elipsoid má velice malé zploštění a lze ho v případě potřeby nahradit koulí [1].

Referenční rovina (angl. reference plane). Poslední plochou je referenční rovina, která je přímo použitelná jen pro velice malé oblasti. V okruhu cca 10-15 km kolem středu (tečného bodu, v němž se rovina dotýká povrchu koule), tj. v oblasti o rozloze asi 700 km², je možné účely polohopisu považovat referenční plochu zemského povrchu za rovinu. Vodorovné úhly a délky jsou v tomto případě na zakřivené referenční ploše i na její tečné rovině prakticky stejné pro. S čím je však třeba počítat jsou výškové rozdíly způsobené zakřivením. Ve vzdálenosti 15 km, činí odchylka skutečného průběhu povrchu koule (resp. elipsoidu) od horizontální roviny již 15,3 m (Obrázek 8) [4].

Obrázek 8 Odchylka skutečného průběhu povrchu Země od roviny



Zdroj: [1]

Při použití různých kartografických zobrazení se objevuje tzv. kartografická zkreslení. K tomuto jevu dochází, protože vzor i jeho obraz jsou umístěny na plochách s odlišnou křivostí. Rozlišují se především následující [5]:

- *délkové* - kartografické zobrazení způsobuje zkreslení délek,
- *plošné* - kartografické zobrazení způsobuje zkreslení ploch,
- *úhlové* - kartografické zobrazení způsobuje zkreslení úhlů.

Samozřejmě se různá kartografická zobrazení snaží některé z těchto zkreslení eliminovat. Záleží na účelu, kterému mají mapy sloužit. Mluvíme potom mimo jiné o zobrazeních [5]:

- *ekvidistantních* (stejnodélných, délkojevných) - eliminují zkreslení délek určité soustavy čar (tedy zachovávají délky ve směru poledníků nebo rovnoběžek),
- *ekvivalentních* (stejnoplochých, plochojevných) - eliminují zkreslení ploch (tedy zachovávají plochy), zato mají za následek velká úhlová zkreslení,
- *konformních* (stejnoúhlých, úhlojevných) - eliminují zkreslení úhlů, zato mají za následek vznik velkých plošných zkreslení,
- *kompensačních* (vyrovnávacích) - která se podle hodnot plošného a úhlového zkreslení nacházejí někde mezi konformními a ekvivalentními zobrazeními, tj. snaží se obé zkreslení snížit na střední míru.

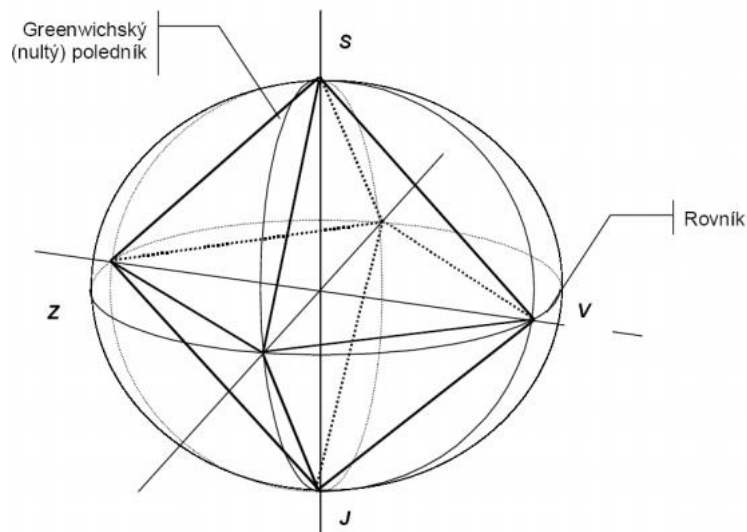
Při práci s mapami je vždy nutné vědět, jaké kartografické zobrazení bylo použito, abychom věděli, jaké operace můžeme provádět, nebo zda je musíme nejprve

transformovat do stejného kartografického zobrazení, a dále které geometrické informace můžeme z map získávat.

3.3.4. Sférický diskrétní souřadnicový systém

Sférický diskrétní souřadnicový systém je globálním diskrétním souřadnicovým systémem vztahující se k zemskému tělesu. Pokrývá celý povrch zeměkoule.

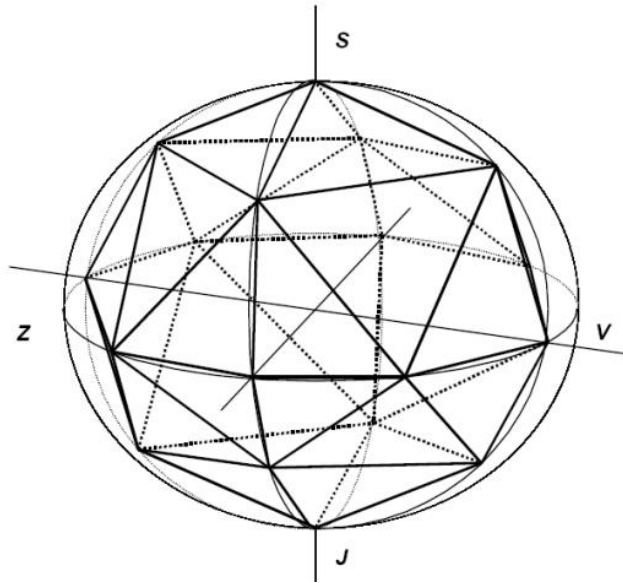
Obrázek 9 Sférický diskrétní souřadnicový systém - základní oktaedr



Zdroj: [1]

Odvozuje se z oktaedru vepsaného do zeměkoule (Obrázek 9), jehož trojúhelníkové strany jsou postupně rozdělovány na menší a menší trojúhelníky s tím, že nové vygenerované vrcholy jsou přimknuty k zemskému povrchu (Obrázek 10 a Obrázek 11).

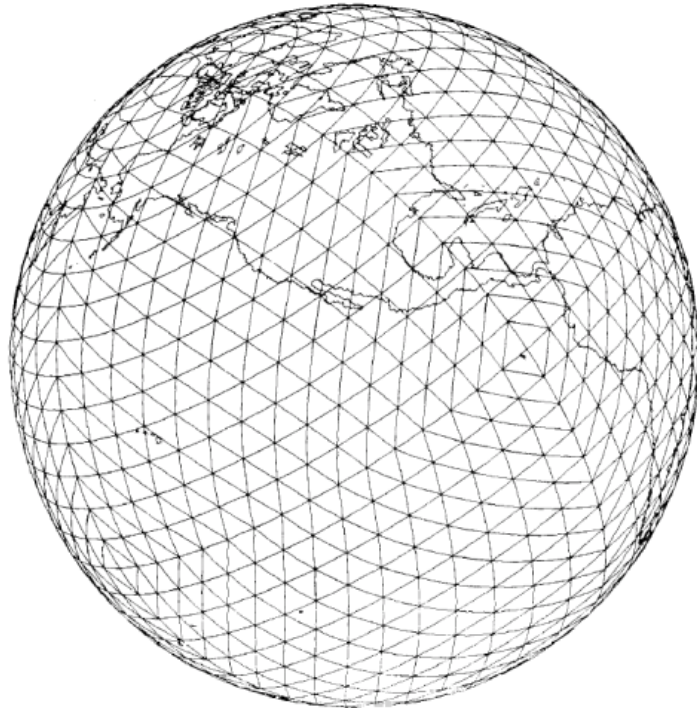
Obrázek 10 Sférický diskrétní souřadnicový systém - ukázka po prvním dělení



Zdroj: [1]

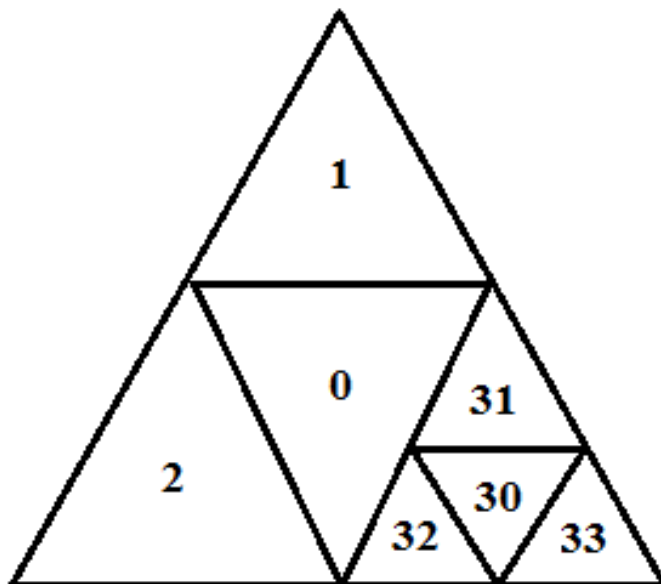
Největší výhodou tohoto prostorového referenčního systému je, že zemský povrch je pokryt sítí plošek o přibližně stejné velikosti i tvaru. Díky tomuto je možné zavést adresování v podobě hierarchického číslování trojúhelníků, jak je patrné z Obrázek 12. Každý trojúhelník je rozdělen na čtyři menší, střední dostává číslo 0, horní 1, levý 2 a pravý 3. Pokud například trojúhelník číslo 3 dále rozdělíme, pak střední trojúhelník bude mít číslo 30, horní 31, levý 32 a pravý 33 [1].

Obrázek 11 Sférický diskretní souřadnicový systém - po čtvrtém dělení



Zdroj: [6]

Obrázek 12 Sférický diskretní souřadnicový systém - dělení a adresace



Zdroj: [14]

3.3.5. Lokální souřadnicové systémy

Jsou to kontinuální absolutní souřadnicové systémy vztahující se k rovině. V podstatě jsou reprezentovány tzv. lokálním souřadnicovým systémem. Ten je definován náhodně zvoleným počátkem a dvěma směry souřadnicových os a které platí jen v omezeném areálu. Základní výhodou je, že můžeme měřit prakticky kdekoliv a nejsme závislí na přípojovací měření, kterým se připojujeme ke globálnímu souřadnicovému systému (např. souřadnicový systém S-JTSK, nebo UTM) a které může být časově náročné a finančně nákladné.

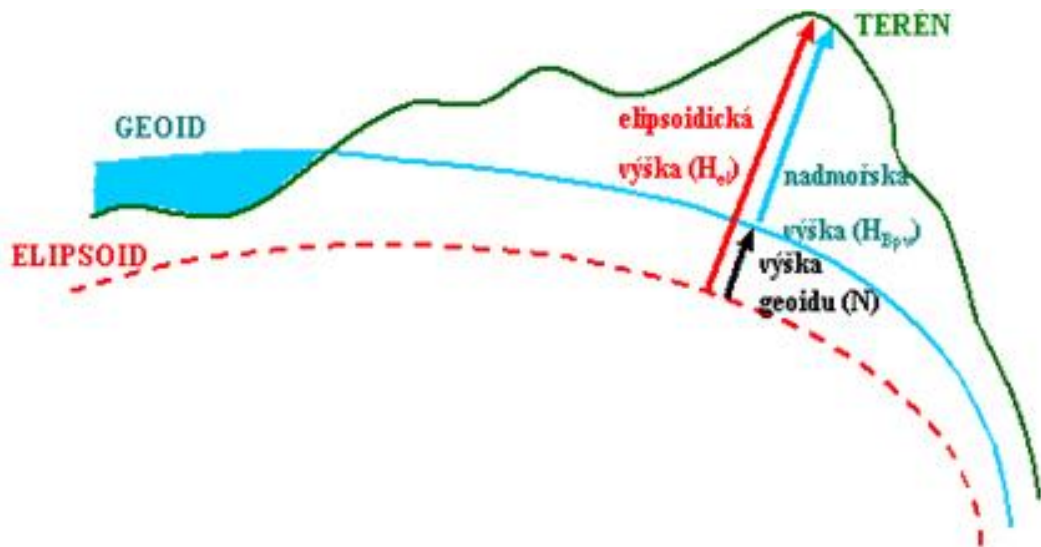
Nevýhodou však je, že je obvykle jen otázkou času, kdy bude nutné navázat tento lokální souřadnicový systém na systém globální. A pak obvykle nezbyvá, než znova zaměřit několik bodů, tentokrát v absolutních souřadnicích a pak provést transformaci lokálního systému do globálního, případně provést celé zaměření znovu [1].

3.4. Používané souřadnicové systémy

Poloha každého objektu je vyjádřena hodnotami souřadnic v definovaném souřadnicovém systému. Určováním vzájemné polohy bodů na Zemi, zkoumáním tvaru a fyzikálních vlastností zemského tělesa se zabývá obor Geodézie.

Geoid je základním modelem zemského tělesa (Obrázek 13). Vychází ze skutečnosti, že ideální zemský povrch lze definovat jako plochu, na kterém má tíhová síla v každém místě stejnou hodnotu. Tuto plochu pokládáme na úroveň klidné střední hladiny moří (tzv. nulová hladinová plocha). Jedná se o myšlenou nulovou ekvipotenciální plochu, kolmou v každém bodě na směr zemské tíže. Nadmořská výška je pak výškou nad geoidem (nadmořská výška hladin jednotlivých moří je různá) [16].

Obrázek 13 Vztah mezi elipsoidickou a nadmořskou výškou



Zdroj: [<http://transformace.webst.fd.cvut.cz/Basics.htm>]

S referenčním elipsoidem je spjat používaný souřadnicový systém. To je mnohdy problém, protože těžiště používaných elipsoidů neleží ve stejném bodě. Při převodu zobrazení na různých referenčních elipsoidech je proto nutné přistoupit k prostorové transformaci souřadnic. Výhodné je zavedení světového elipsoidu, který má těžiště v těžišti Země a jeho použití je univerzální kdekoli na Zemi. Po dlouhém vývoji se ustálilo používání světového geodetického systému WGS-84.

Při zjišťování polohy bodů (či trajektorie pomocí bodů) na mapě je nutné mít na paměti, že jejich přesnost nikdy není absolutní a vlivem přírodních jevů dochází ke drobným změnám jejich vzájemné polohy v čase.

Nepřesnosti nastávají především při [16]:

- měření samotném (jedná se především o nepřesnost měřící soustavy nebo různé fyzikální jevy)
- převodu geodetických dat do roviny (při použití jakékoli kartografické metody lze zachovat pouze některé vlastnosti zobrazení – úhly (konformní zobrazení), délky v určitém směru (ekvidistantní zobrazení) nebo obsahy ploch (ekvivalentní zobrazení)
- transformaci různých kartografických děl (některé lokální mapy jsou natolik složité, že při jejich transformacích platí pouze omezené klíče)

- nepřesnosti vyplývající z použitých metod (jedná se o špatně lokalizovatelné chyby, např. nepřesně ležící elipsoid WGS-84 v těžišti Země).

3.4.1. WGS 84

Souřadnicový systém (referenční elipsoid), na kterém probíhá měření GPS je označován jako WGS-84 (World Geodetic System 1984). WGS-84 byl původně vyvinut armádou USA, nyní je standardizovaným globálním geodetickým geocentrickým systémem armád NATO (North Atlantic Treaty Organisation). Počátek leží v těžišti Země. Osa x je průsečnice referenčního poledníku WGS-84 (nultý poledník definovaný BIH) a roviny rovníku vztaženého ke konvenčnímu terestrickému pólu CTP (Conventional Terrestrial Pole). Osa y vytváří pravoúhlý pravotočivý systém. Osa z má směr ke konvenčnímu terestrickému pólu definovaného BIH na základě souřadnic stanic definující BIH [16].

Systém WGS-84 je pevně spojený se zemí a je definován primárními a sekundárními parametry. Primární parametry definují rozměry referenčního elipsoidu, úhlovou rychlost rotace vůči nebeskému referenčnímu systému a součin gravitační konstanty a hmoty Země, soustředěné v referenčním elipsoidu. Sekundární parametry definují model zemského gravitačního pole pomocí rozvoje geopotenciálu do sférických harmonických funkcí. Model gravitačního pole EMG-96 je možno využít pro výpočet průběhu plochy geoidu WGS-84.

Přesnost geocentrických souřadnic bodů přímo určených v systému WGS-84 na základě technologie GPS je charakterizována středními kvadratickými chybami v zeměpisné šířce (B) a zeměpisné délce (L) $m_B = m_L < 0,4$ m a geodetické výšce (H) $m_H < 0,5$ m. Do této chyby je započítána odchylka určení počátku souřadnicového systému (asi 0,1 m v každé ose), určení rozměru sítě a měřické chyby [16].

Pizzetti ukázal, že známe-li čtyři základní parametry referenčního elipsoidu, můžeme z nich odvodit vše potřebné: tíhový potenciál a složky tíhového pole, jakož i odvozené parametry. Volba čtyř základních parametrů závisí spíše na praktických podmínkách než teoretických (Tabulka 2). Tato volba se párkrát měnila a dnes se používají tyto základní parametry [7]:

1. Parametr definující rozměr referenčního elipsoidu. Dnes to je velká poloosa referenčního elipsoidu a . Jde o poslední geometrický parametr. Již delší dobu se předpokládá, že bude nahrazen jiným prvkem, prvkem fyzikálním, totiž hodnotou tíhového potenciálu W_0 na referenčním elipsoidu. Důvodů je více, především však to, že hodnotu W_0 lze odvozovat přímo z družicových měření a lze ji v přírodě realizovat, což u hodnoty a nejde.
2. Parametr mající vztah ke tvaru referenční plochy. Dnes je to převrácená hodnota zploštění referenčního elipsoidu $1/f$. Tento parametr byl zvolen nedávno. Předtím se používal jiný prvek, např. čtverec první excentricity e^2 , dynamický tvarový faktor J_2 nebo gravitační koeficient druhého stupně.
3. Parametr definující rychlost rotace zemského tělesa ω .
4. Parametr definující hmotnost referenčního tělesa M a gravitační konstantu G , což je geocentrická gravitační konstanta GM .

Tabulka 2 Základní parametry systému WGS-84

Název	Symbol	Hodnota	Rozměr
Velká poloosa	a	6 378 137	m
Převrácená hodnota zploštění	$1/f$	298,257 223 563	
Úhlová rychlost rotace Země	ω	$7,292 115 \times 10^{-5}$	rad/s
Zemská gravitační konstanta	GM	$3,986 004 418 \times 10^{14}$	$m^3 * s^{-2}$

Zdroj: [7]

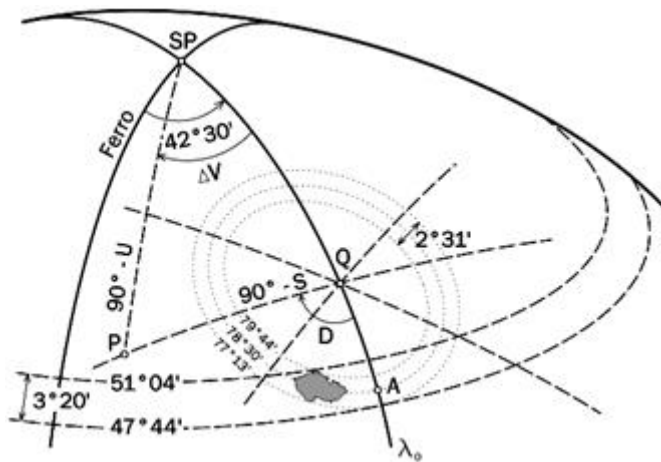
3.4.2. S-JTSK

V České Republice se v současné době používají dvě základní kartografická zobrazení. Systém S-JTSK určený pro civilní sféru a systém S-42 určený pro vojenské použití. Vojenské mapy po vstupu do NATO přecházejí na zobrazení UTM (Universal Transverse Mercator). V civilní oblasti se asi ještě nějakou dobu bude používat S-JTSK, případně novější S-JTSK/95. Následující text, stejně jako popisovaná transformace se věnuje souřadnicovému systému S-JTSK.

Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální (S-JTSK) vznikl mezi lety 1920-1958. Po vzniku republiky v roce 1918 bylo třeba co nejdříve vytvořit samostatný geodetický základ a vymyslet vhodnou kartografickou projekci. Již v roce 1919 byla založena Triangulační kancelář (zřizovatel ministerstvo financí ČSR), jejímž předsedou se stal Ing. Josef Křovák. Josef Křovák navrhl zobrazení (Obrázek 14), které bylo vhodné pro potřeby ČSR a mělo vhodné minimální deformace. Ve svém návrhu transformace zvolil

konformní zobrazení Besselova elipsoidu na zmenšenou kouli a následně konformní kuželové zobrazení v obecné poloze. Pól kužele Q má zeměpisné souřadnice $j_Q = 59^\circ 42' 42,7''$ s.š. a $l_Q = 42^\circ 31' 31,4''$ v.d. od Ferra. Plášť kužele se dotýká referenční koule v horizontální kružnici S_0 , která prochází bodem A ($l_A = 42^\circ 31' 31,4''$, $j_A = 48^\circ 12' 42,7''$) na území Podkarpatské Rusi. Tato kružnice je ve výchozím bodě A kolmá na základní poledník ($l_A = 42^\circ 31' 31,4''$), prochází středem území a její kartografická šířka je $78^\circ 30'$ (viz následující obrázek) [16].

Obrázek 14 Křovákovo zobrazení



Zdroj: [<http://transformace.webst.fd.cvut.cz/Basics.htm>]

Kartografické poledníky se v tomto zobrazení zpodobňují jako svazek paprsků vybíhajících z vrcholu kužele. Kartografické rovnoběžky se zobrazují jako soustředěné kružnice o poloměrech R . Rovinné souřadnice S-JTSK se zapisují (Y, X) S-JTSK, osa X je orientovaná k jihu a osa Y na západ. Tomuto zobrazení se často říká Křovákovo zobrazení po jeho tvůrci. V S-JTSK se tohoto zobrazení používá dodnes.

Práce na trigonometrické síti I. řádu byly ukončeny roku 1927 a všech 268 naměřených bodů bylo vyrovnáno. Při měření bylo rozhodnuto, že se převezmou osnovy měřených směrů z rakouské vojenské triangulace (1862-1898). S touto vojenskou sítí měla nově vznikající S-JTSK společných 107 bodů. Pomocí Helmertovy transformace byla určena kvalita vojenské triangulace, z nichž jen 42 bodů v Čechách posloužilo pro určení rozměru, orientace a polohy S-JTSK na Besselově elipsoidu (v Podkarpatské Rusi se jednalo o 22 bodů). V následujícím období se síť zhušťovala body II. až V. řádu, kdy po každém zhuštění bylo provedeno vyrovnání. Tak bylo nakonec naměřeno přes 47000 bodů, jejichž průměrná vzdálenost je kolem 2 km. Kvůli finančním i časovým důvodům se za

celou dobu budování S-JTSK neprovedlo žádné astronomické měření ani měření nových základů. Právě z těchto důvodů vznikla poloha celé sítě špatně nakloněná a ohnutá. V jednotlivých bodech tak nastaly různé odchylky. Po první světové válce se započalo s budováním astronomicko-geodetické sítě (AGS) na tehdejší dobu přesnými měřicími prostředky. Do roku 1955 bylo astronomicky zaměřeno 53 bodů a 6 základů. Nový systém označený S-42 byl vyrovnán a body S-JTSK byly do něj postupně transformovány. S-42 používá Krakovského elipsoid a Gaussovo zobrazení. Tento systém je přesnější a celkově lépe orientován. Následně byl ještě poopraven na systém S-42/83 [16].

3.5. Transformace souřadnic z WGS-84 do S-JTSK

Jestliže chceme porovnávat údaje z GPS s údaji v mapě, je nutné, aby tyto údaje byly vyjádřeny ve stejném souřadnicovém systému, ve kterém je zobrazena mapa. Poloha GPS je implicitně udávána v souřadnicovém systému WGS-84. Přijímače pak zpravidla nabízejí určitý počet systémů, z nichž si uživatel může zvolit ten, do kterého bude poloha přepočtena [9].

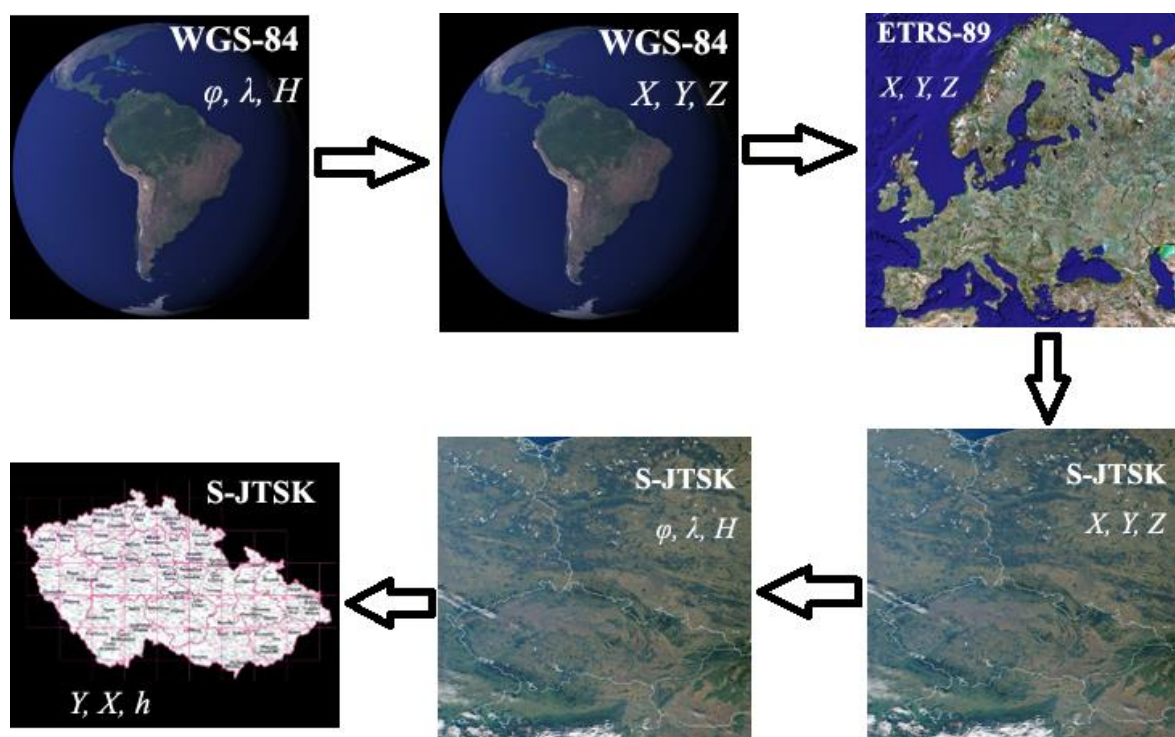
Prostorové souřadnice je nutné převádět do souřadnic rovinných. V rovinných souřadnicích lze snadno matematicky i graficky vyjádřit možnou odchylku od ideální polohy. Při transformaci souřadnic za použití některé z kartografických projekcí však dochází ke ztrátám přesnosti. Proto je nutné zabývat se transformací prostorových souřadnic, které používá GPS, do souřadnic rovinných, které jsou využívány na území ČR. Vyhodnocení GPS se provádí na referenčním elipsoidu značeném WGS-84 (World Geodetic System 1984). Naproti tomu terestrický systém, ve kterém je většina českých map je tzv. souřadnicový systém *Jednotné trigonometrické sítě katastrální* (S-JTSK). S-JTSK je založen na jiném elipsoidu a vyznačuje se lokálními odchylkami, které komplikují transformaci [16].

Systém WGS-84 je definován souborem pozemních stanic a polohami družic navigačního systému GPS a představuje tak geodetický absolutní souřadnicový systém. Systém S-JTSK byl definován na bázi trigonometrické sítě a vykazuje nepravidelně měnící se lokální deformace. Z toho důvodu neplatí mezi oběma systémy přesný transformační klíč [8].

Poloha bodu v souřadném systému WGS-84 je dána zeměpisnými geodetickými souřadnicemi (φ , λ , H), které je potřeba konvertovat do J-TSK, které jsou v pravoúhlých souřadnicích x , y , z . Pravoúhlá souřadná soustava je definována počátkem ležícím v těžišti Země. Osa z leží v ose rotace Země a osa x prochází základním greenwichským poledníkem. Osa y je volena tak, aby systém byl pravotočivý.

Postup transformace je znázorněn na Obrázek 15. Nejprve je nutná transformace mezi geodetickými a pravoúhlými souřadnicemi na elipsoidu WGS-84. Dále transformace pravoúhlých souřadnic mezi systémy WGS-84 a ETRS-89 v aktuální epoše. Následuje krok, kdy se tyto souřadnice transformují do systému ETRS-89. V předposledním kroku se transformuje mezi pravoúhlými a geodetickými souřadnicemi v systému S-JTSK. Nakonec se přepočítává do geodetických souřadnic na Besselově elipsoidu do rovinných souřadnic S-JTSK.

Obrázek 15 Transformace souřadnic ze systému WGS-84 do systému S-JTSK



Zdroj: [<http://transformace.webst.fd.cvut.cz/>]

4. Navigační systémy

4.1. Princip družicové navigace

Rádiové navigační systémy tvoří maják a palubní zařízení. U družicových navigačních systémů je majákem družice.

Tento systém je tzv. globální, tj. systém, který umožňuje určit polohu kdekoli na Zemi. Hlavní předností je, že poloha se určuje v souřadném systému, který je společný pro celou zeměkouli. To umožňuje globálně koordinovat polohy všech objektů vybavených navigačním systémem.

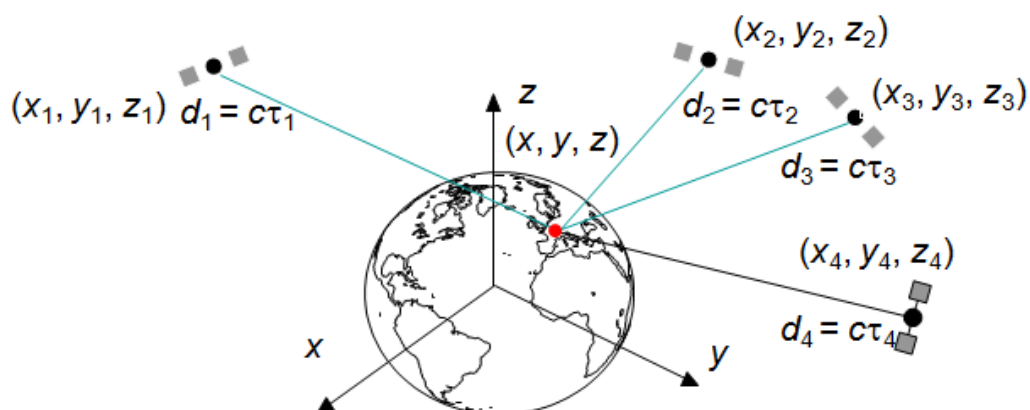
Při určování polohy zpracováním signálů družic se používají metody:

- 1) Metoda úhломěrná
- 2) Metoda dopplerovská
- 3) Metoda dálkoměrná
- 4) Metoda interferometrická

Moderní satelitní navigace zjišťují polohu pomocí metody dálkoměrné. Systém určuje polohu uživatele z jeho vzdáleností d_i od jednotlivých navigačních družic (Obrázek 16). Vzdálenost je převedena na měření dob τ_{mi} , které jsou potřebné k tomu, aby signály vyslané z družic dosáhly přijímač. Známe-li souřadnice družic, můžeme polohu určit jako řešení soustavy tří rovnic pro tři neznámé

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = [c (\tau_{mi} - \tau_0)]^2 \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

Obrázek 16 Dálkoměrné systémy



Zdroj: [Autor]

4.1.1. Čas

Určování polohy se provádí primárně pomocí času. Proto družice na oběžné dráze musí obsahovat velmi přesné atomové hodiny. Používají se na bázi cesia a rubidia. Bohužel družice obíhají Zemi ve vzdálenosti kolem 23 000 km a při rychlosti kolem 3,9 km/s se musí počítat ještě s teorií relativity. Když Američané 22. února 1978 vyslali na oběžné dráhy první navigační satelity, atomové hodiny na jejich palubách nebyly vybaveny korekcemi. Výsledek byl, že během jednoho dne narostla chyba na více než jedenáct kilometrů.

Čas satelitních hodin je dán frekvencí kmitání atomů. Gravitace ve výši přes 20 000 km představuje jen asi čtvrtinu pozemské tíže. Na palubě satelitu GPS se čas jeví zkrácený o 53 miliardtin procenta.

Chyba 1 mikrosekundy v synchronizaci se při rychlosti světla 299 792 458 m/s rovná chybě téměř 300 metrů. Při kódovém měření je nutné synchronizovat na 100 a méně nanosekund (chyba 3 metry).

4.1.2. Výkon signálu

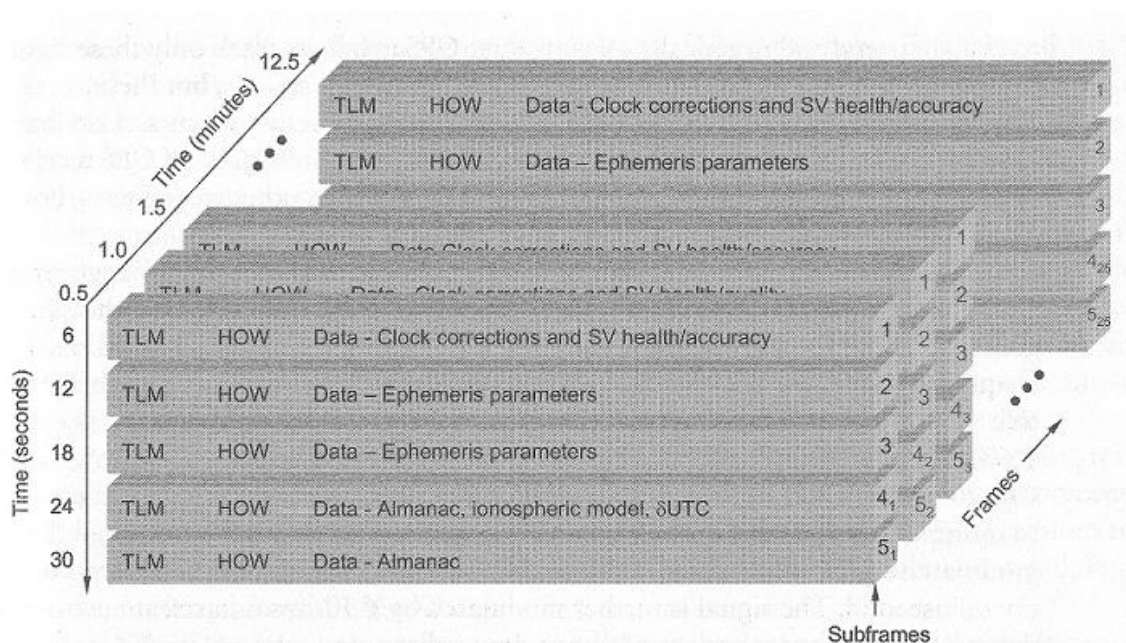
Satelit vysílá kódovaný časový signál, ten umožní přijímači vypočítat polohu. Satelit vysílá velmi slabý signál, který má výkon pouze 27 W, což je jen těsně nad hladinou základního šumu přijímače, a proto přijímač musí přijímat signál několik period. Síla signálu na Zemi se rovná přibližně $1,41 \times 10^{-16}$ W. To má za následek, že signál mizí v tunelech, nebo za vysokými budovami.

4.1.3. PRN Code

Výpočet polohy přijímačem je realizován na základě signálů vysílaných družicemi. Tento signál se nazývá PRN code, je složen z částí kódů a vysílán každých 6 vteřin (Obrázek 17). V první řadě je nutné znát souřadnice vysílající družice. Ty se počítají na základě parametrů její dráhy, které družice ve formě dat vysílá tzv. navigační zprávu. Obsahuje následující informace:

- Čas vysílání počátku zprávy
- Keplerovské efemeridy
- Údaje umožňující korigovat přesně čas vysílání družice
- Almanach
- Koeficienty ionosférického modelu
- Stav družice

Obrázek 17 Data vysílaná z družice



Zdroj: [10]

Navigační zpráva je rozdělena do 25 rámců. Každý rámeček trvá 30 sekund, má 1500 bitů a 5 podrámčů. Podrámce se skládají ze slov, každé slovo má 30 bitů, z nichž 24 je využito pro přenos zprávy a 6 bitů slouží k zabezpečení přenosu pomocí Hammingova kódu, který umožňuje opravu jedné chyby a indikaci nejvýše tří chyb.

Začátek každé navigační zprávy se skládá z TLM a HOW jsou složeny z 30 bitů. TLM znamená telemetry word. Prvních osm bitů je synchronizační slovo 10001011, pomocí kterého se určuje začátek. Dalších 14 bitů je vyhrazeno pro diagnostickou zprávu řídicího segmentu. Bity 23 a 24 jsou rezervované. Druhé slovo označováno HOW (handover word), kde prvních 17 bitů se nazývá z-count a pohybuje se mezi 0 až 100 799. Bit 18 a 19 indikuje nenulovou hodnotu. Následující tři bity jsou číslo podrámce (tj. číslo od 1 do 5). [10]

Ve druhém podrámci je uvedeno pořadové číslo podrámce v týdnu. Zbývající slova prvního podrámce nesou informace potřebné k získání času. Slova ve druhém a třetím podrámci jsou určena pro přenos keplerovských efemerid s harmonickými perturbacemi vysílající družice.

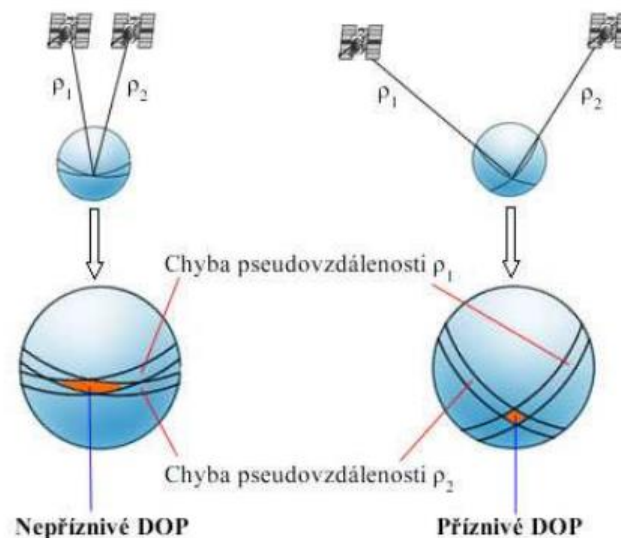
Ve čtvrtém a pátém podrámcí je přenášen almanach. Ten nese informace o poloze ostatních satelitů. Zatímco podrámcí 1, 2, 3 es při přenosu rámců opakují, podrámcí 4 a 5 mají vždy jiný obsah a mohou se opakovat až při přenosu další zprávy (po 12,5 minuty). Celková navigační zpráva za 12,5 minuty vyšle 37 500 bitů.

4.1.4. Přesnost určení polohy

Při určování polohy na Zemi má zásadní vliv konstelace družic neboli rozestavění (Obrázek 18). Při nevhodném rozestavění může být DOP, vyjadřující poměr chyb mezi polohou na Zemi a pozicí satelitu. Optimální velikost je menší než 4, pokud hodnota DOP překročí hodnotu 7 je schopnost určit přesnou polohu nemožná.

Záleží na úhlu či velikosti křížení. Při ostrém úhlu vzniká velká nejistota určení průsečíku. Optimální křížení je pod úhlem 90° . K určení přesné polohy je potřeba minimálně čtyři viditelné satelity.

Obrázek 18 Vliv geometrie družic na přesnost měření



Zdroj: [17]

4.2. Systémy

4.2.1. GPS

Program družicové navigace byl vyvinut v Ministerstvu obrany Spojených Států Amerických na počátku šedesátých let. Oficiální název je NAVSTAR GPS (NAVigation Signal Timing And Ranging Global Positioning System). GPS je prvním funkčním navigačním systémem. A dnes nejpoužívanějším.

GPS se dělí na tři hlavní segmenty. Jsou to:

- kosmický segment (Space Segment),
- řídicí segment (Control Segment),
- uživatelský segment (User Segment).

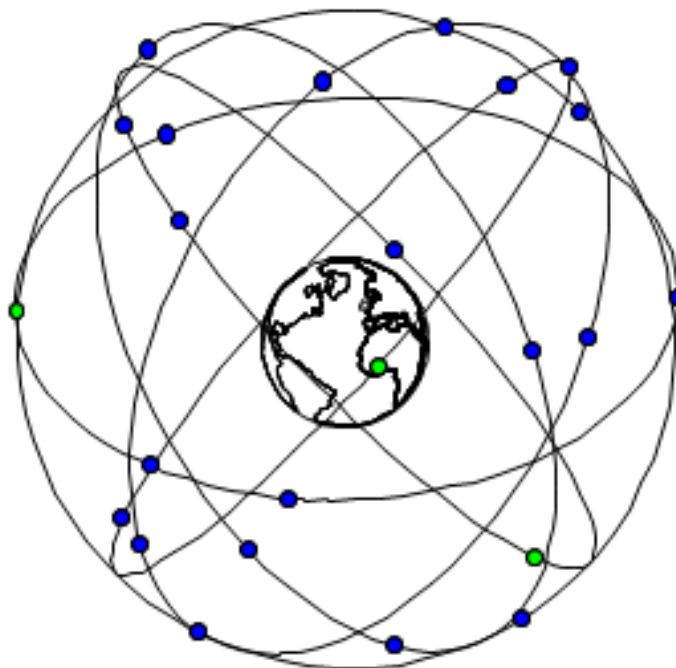
Kosmický segment je tvořen družicemi. V šesti oběžných rovinách bylo na počátku rovnoměrně rozloženo 24 družic (Obrázek 19), z nichž 3 jsou záložní. Na konci roku 2007 už zde vysílalo 31 operačních satelitů. Některé satelity jsou blízko jiným, ale ty pouze nahrazují staré. Roviny mají sklon k rovníku (inklinaci) 55° . Družice obíhají ve výšce 20 180 km, rychlost družic je 3,8 km/s. Každá družice oběhne svou dráhu za 11 hodin 58 minut a dráhy jsou navrženy tak, že alespoň šest družic je vždy viditelných téměř kdekoli na Zemi.

V *řídicím segmentu* jsou sledovány dráhy letu monitorovacími stanicemi. Data jsou poslány do hlavní řídicí stanice, která se nachází na Letecké základně Schriever v Colorado Springs. Odtud se pravidelně posílá každé družici aktualizace navigačních dat. Tyto aktualizace synchronizují družicové atomové hodiny s přesností do jedné mikrosekundy.

Uživatelský segment tvoří přijímače uživatelů. GPS přijímač se skládá z antény, procesoru přijímače a vysoce stabilních hodin. U GPS přijímače se často uvádí počet kanálů, které značí počet družic od kterých je přijímač najednou schopen přijímat signál.

GPS vysílá na dvou frekvencích L1 ($1227,6 \text{ MHz} \pm 12 \text{ MHz}$) a L2 ($1575,42 \text{ MHz} \pm 12 \text{ MHz}$). Na rok 2015 je plánována nová frekvence L5 s kmitočtem 1176,45 MHz. V roce 2004 stál přijímač přes 2000 \$, dnes stojí méně než 5 \$.

Obrázek 19 Konstelace družic GPS



Zdroj: [Autor]

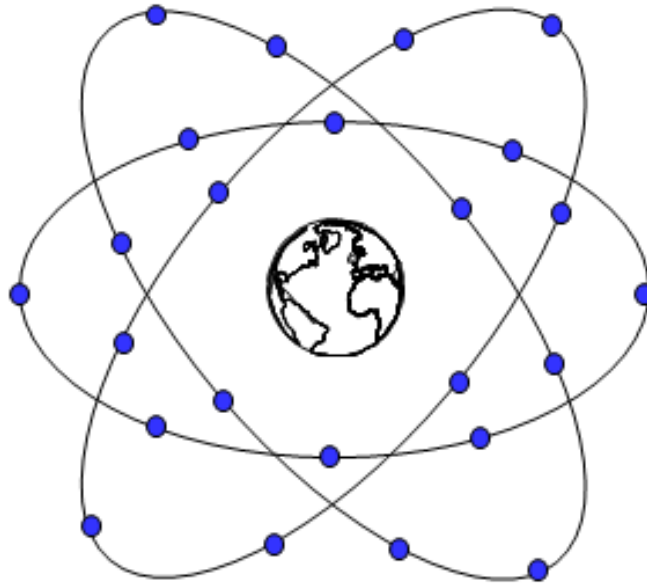
4.2.2. GLONASS

Druhým navigačním systémem, který vysílá je ruský GLONASS. Je provozován ruskou vládou skrze Úřad ruských vojenských vesmírných sil. Plán pro vývoj systému byl schválen v roce 1976. Plná provozuschopnost systému byla plánována na rok 1991, nicméně konstelace byla dokončena až v roce 1995. Díky špatné ekonomické situaci v Rusku však bylo v dubnu 2002 v provozu pouze osm družic. Na konci roku 2009 bylo v provozu 19 družic.

Plně funkční systém předpokládá 24 družic (Obrázek 20), který je plánován na rok 2011. V provozu bude 21 družic a 3 budou záložní. Družice obíhají ve výšce 19 100 km při rychlosti 3,9 km/s. Oběžná doba je 11 hodin 15 minut s inklinací 64,8°.

GLONASS je specifický tím, že každá družice vysílá s kmitočtovým dělením v pásmu $L1 = 1602 \text{ MHz} + 0,5625n \text{ MHz}$, kde n je číslo frekvenčního kanálu družice ($n=0,1,2\dots$).

Obrázek 20 Konstelace družic GLONASS



Zdroj: [Autor]

4.2.3. Galileo

Plánovaný navigační systém Galileo by měl být obdobou americkému systému NAVSTAR GPS a ruskému GLONASS. Evropský systém se nejvíce odlišuje tím, že není vojenský a je primárně navržen jako projekt řízený a spravovaný civilní správou. V současné době systém není kompletní, i když původně plánované spuštění mělo být od roku 2010. Podle nových plánů je nejbližší rok spuštění 2014. Plně funkční systém bude zahrnovat služby:

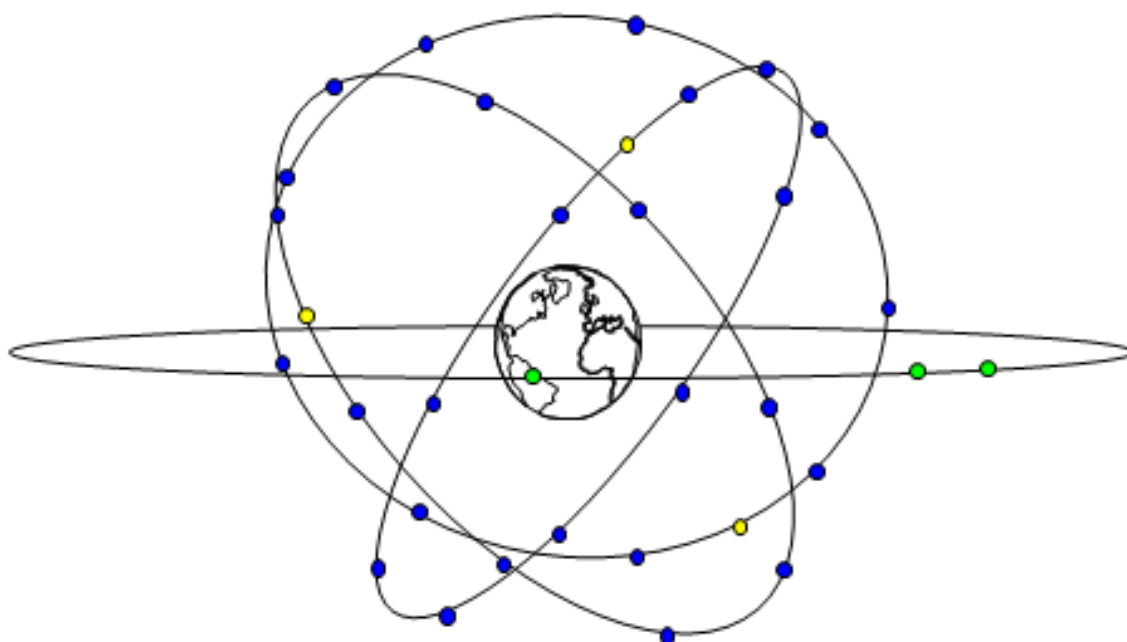
- **Open Service** – veřejná služba, bez poplatků, běžně dostupná, jednoduché měření polohy a času
- **Commercial Service** – komerční služba, vysoká přesnost, zašifrovaná, garantovaná
- **Safety of Life** – služba pro kritické aplikace, signál zahrnující integrovanou funkci, která během několika vteřin varuje uživatele v případě chybné funkce
- **Public Regulated Service** – neveřejný signál, dva šifrované signály určené pro státem vybrané uživatele
- **Search and Rescue** – služba nouzové lokace

Plný systém bude sestávat z 30 satelitů (Obrázek 21), skládající se ze 27 operačních a 3 záložních. Obíhají ve třech rovinách na středním orbitu ve výšce 23 222 km. Každá rovina bude svírat s rovinou rovníku 56°. Oběžná doba je 14 hodin 21 minut. Galileo umožní určit polohu s přesností lepší než jeden metr.

Družice vysílají na frekvencích E5 (1164 MHz – 1215 MHz), E6 (1260 MHz – 1300), E2 (1559 MHz – 1563 MHz), L1 (1575,42 MHz) a E1 (1587 MHz – 1591 MHz).

Dne 12. prosince 2010 Evropská unie se rozhodla umístit centrum světové navigační sítě Galileo do Prahy. Odtud se bude řídit systém. Systém Galileo je také zatím nejdražším projektem Evropské unie.

Obrázek 21 Konstelace družic Galileo



Zdroj: [Autor]

4.2.4. Beidou / Compass

Třetím navigačním systémem je Beidou. Je to projekt Čínské lidové republiky, jehož cílem je vyvinout nezávislý družicový navigační systém. Později byl systém přejmenován na Compass. Od září 2003 začala Čína spolupracovat na evropském projektu Galileo.

Oproti systémům GPS, Glonass, Galileo, které využívají družice pohybující se vzhledem k zemskému povrchu, Compass používá i geostacionární družice. To znamená, že družice zůstává pořád na svém místě, tudíž signálem je pokryta pouze oblast, nad kterou je družice umístěna. Compass je tedy použitelný v oblasti vymezené těmito souřadnicemi: 70° až 140° východní délky a 5° až 55° severní šířky.

Do vesmíru bylo vypuštěno 5 geostacionárních družic. Družice vysílají ve výšce 35 786 km. Procedura při zjišťování polohy je následující:

1. Zařízení uživatele vyšle signál.
2. Družice přijmou signál.
3. Družice vyšlou informaci pozemní stanici. Informace se skládá z přesného času, kdy družice přijaly signál od uživatele.
4. Pozemní stanice spočítá zeměpisnou šířku a délku uživatele.
5. Pozemní stanice vyšle pozici družici.
6. Družice pošle informaci o pozici uživateli.

Z tohoto je zřejmé, že musí být použit aktivní neboli duální uživatelský přístroj. V roce 2008 byla Čínská lidová republika nespokojena s rolí v projektu Galileo, proto se rozhodla postavit globální navigační systém.

Nový systém bude tvořen 35 družicemi, včetně pěti geostacionárních, které budou svým signálem pokrývat celou zeměkouli. Budou poskytovány dva druhy služeb: bezplatná služba pro běžné uživatele a služba pro vojenské účely.

V roce 2012 už byli na středním orbitu tři satelity. Jsou ve výšce 21 500 km a oběžná doba je 12 hodin 55 minut. Bezplatná služba bude určovat polohu s přesností přibližně 10 metrů. Družice vysílají v pásmech E5b (1207,14 MHz), E6 (1268,52 MHz i 1278,75 MHz) a E2 (1561,098 MHz).

4.2.5. IRNSS

Posledním velikým projektem v oblasti navigačních systémů je IRNSS. V květnu 2006 Indická vláda schválila projekt Indického regionálního navigačního satelitního systému. Očekávané spuštění je plánováno na rok 2014.

IRNSS zahrnují tři geostacionární družice a čtyři satelity v geostacionární výšce, ale s nakloněnými rovinami. Družice vysílají ve výšce 35 786 km a v pásmu L5 (1176,45 MHz) a S (2492,08 MHz).

5. Vlastní práce

V první řadě bylo rozhodováno o tom, v jakém projekčním a souřadném systému může být algoritmus sestaven. V České Republice jsou to hlavně dva souřadnicové systémy a to S-JTSK a WGS-84. Oba tyto systémy se liší nejen použitým elipsoidem, ale také orientací elipsoidů v prostoru a použitým měřítkem.

V poslední době se pořád mluví o GPS/Galileo, protože ceny těchto přijímačů nejsou velké. Výsledné souřadnice jsou ve WGS-84. Navíc online mapy jako Google Maps, Mapy.cz od Seznamu, nebo Atlas mapy jsou všechny ve WGS-84, kdežto S-KTSK se v ČR používá hlavně pro potřeby katastru nemovitostí. Proto bylo rozhodnuto o tomto souřadnicovém systému.

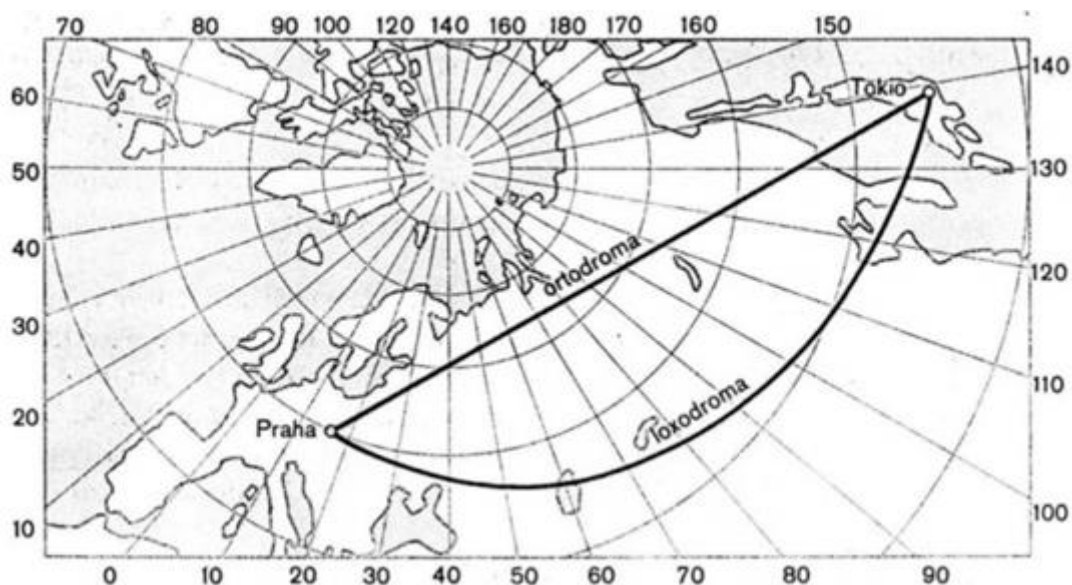
5.1. Vzdálenost dvou souřadnic

Výpočet vzdálenosti dvou bodů v rovině lze spočítat pomocí Pythagorovy věty, ale vzdálenost dvou souřadnic na Zeměkouli to lze pouze do vzdálenosti 10 km. Poté už dochází k nepřesnosti vlivem zakřivení Země. Proto na kouli se vzdálenosti počítají pomocí:

- Ortodromy,
- loxodromy,

Na Obrázek 22 je znázorněn průběh loxodromických a ortodromických spojnic. Rovnoběžka A zaujímá vůči všem poledníkům tentýž úhel 90° . Obecná malá kružnice na zeměkouli značená B. Střed zakreslené kružnice C je mimo střed zeměkoule. Poledník D jako zvláštní případ „velké kružnice“. Rovník značen E. Obecný případ „velké kružnice“, kterým procházejí body Y, Z. Kratší oblouk G této „velké kružnice“ je nejkratší čili ortodromickou spojnici bodů Y-Z, zaujímající vůči všem poledníkům stejný úhel. Průběh I prodloužené loxodromické spojnice bodů Y-Z na zeměkouli [11].

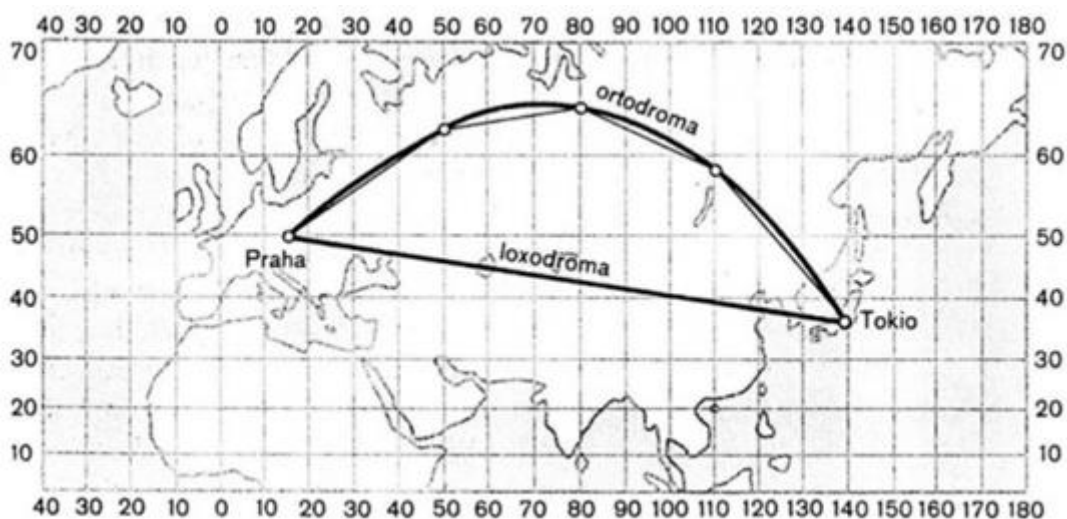
Obrázek 23 Znázornění rozdílu mezi Ortodromou a Loxodromou



Zdroj:

[<http://www.fd.cvut.cz/department/k611/PEDAGOG/files/webskriptum/kartografie/kartografie.html>]

Obrázek 24 Znázornění rozdílu na válcové mapě



Zdroj:

[<http://www.fd.cvut.cz/department/k611/PEDAGOG/files/webskriptum/kartografie/kartografie.html>]

Již před třemi sty lety se na základě některých fyzikálních úkazů (například při pokusech s kyvadlem na různých místech Země) a později i na základě měření zjistilo, že Země je v důsledku odstředivé síly, vznikající při jejím otáčení, na pólech poněkud

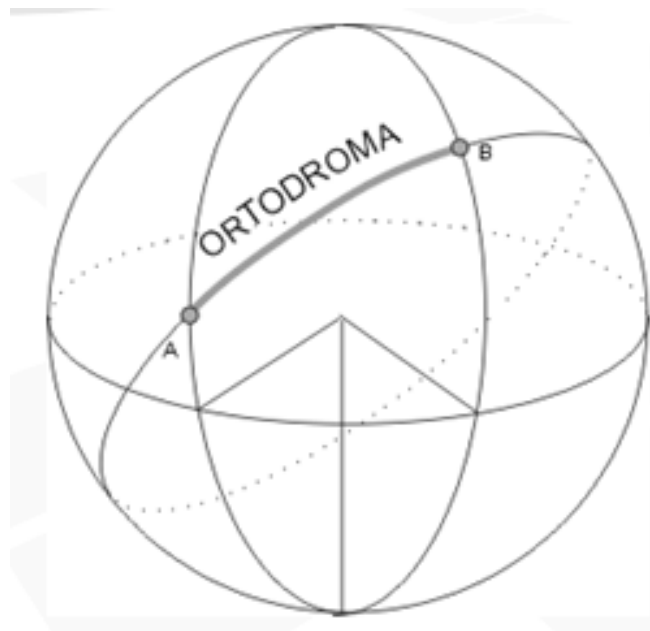
zploštělá, čili že její rovníkový průměr je delší než její osa. Tak se dospělo k pracovní domněnce, že skutečným tvarem Země není koule, nýbrž *rotační elipsoid*. Rotační elipsoid vzniká, otáčíme-li elipsou kolem její osy.

Poloměr Země v rovníkové rovině je 6378 km, kdežto poloměr v rovině, procházející oběma póly, je dlouhý 6356 km, idealizovaný průměr je pak 6372,795 km. Tato deformace zemské koule by se projevila na glóbu o průměru 1 m tak, že by jeho svislá osa byla asi o 3 mm kratší než rovníkový průměr.

5.1.1. Ortodroma

Ortodroma je nejkratší spojnice dvou bodů na povrchu zemské koule. Je vždy kratším obloukem takzvané „velké kružnice“, procházející oběma body na povrchu zemské koule (Obrázek 25), jež chceme nejkratším způsobem spojit. Všechny poledníky a rovník jsou tedy ortodromami (poněvadž jsou jako takzvané „velké kružnice“ na zemské kouli nejkratšími spojnici míst, ležících na těchto kružnicích), a současně jsou i loxodromami (poněvadž zaujímají vůči všem poledníkům stále tentýž úhel).

Obrázek 25 Ortodroma



Zdroj: [<http://wazniak.mimuw.edu.pl>]

Nejkratší spojnice dvou bodů na zeměkouli čili ortodroma zaujímá vůči všem poledníkům stále stejný úhel jen tehdy, jsou-li oba body v témže poledníku nebo na rovníku. V prvním případě je to úhel nulový, v druhém případě je to úhel 90°. Ve všech ostatních případech svírá ortodromická spojnice (nejkratší možná spojnice) dvou míst na zeměkouli s každým poledníkem vždy jiný úhel [11].

Výpočet ortodromy je následující:

$$\sigma = \arccos[(\sin \varphi_1 * \varphi_2 + \cos \varphi_1 * \cos \varphi_2 * \cos(\lambda_2 - \lambda_1))] \quad (3)$$

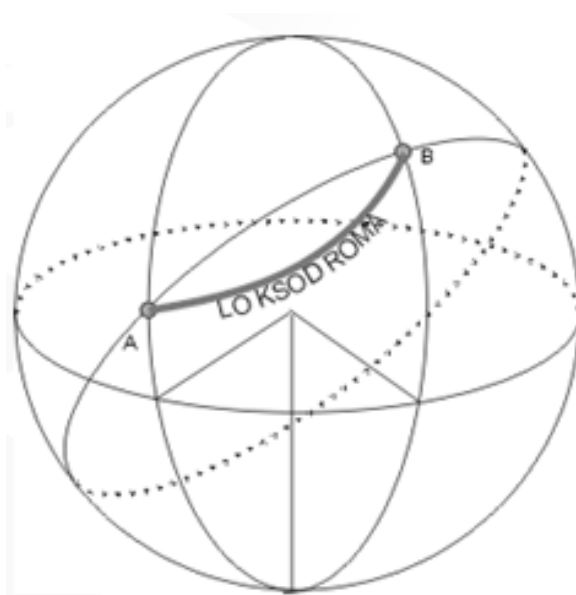
$$l = \sigma * r \quad (4)$$

Jedná se o geodetickou křivku na kulové ploše, která vyjadřuje tzv. ortodromickou vzdálenost (nejkratší vzdálenost dvou bodů na ploše). V regulárním bodě i v bodech singulárních (póly - poledníky) je ortodrom nekonečně. [20]

5.1.2. Loxodroma

Loxodroma je křivka na povrchu zeměkoule, jež protíná všechny poledníky pod stále stejným úhlem. Je-li tento úhel devadesát stupňů, má loxodroma podobu uzavřené kružnice. To znamená, že všechny rovnoběžky včetně rovníku jsou loxodromami, neboť svírají samy se sebou stále stejný, nulový úhel. Je-li úhel mezi loxodromou a poledníky větší než 0° a menší než 90°, má loxodroma podobu spirály, obtáčející nekonečným počtem závitů povrch zeměkoule a končící na jedné straně v jižním zeměpisném pólu, na druhé straně v severním zeměpisném pólu (Obrázek 26).

Obrázek 26 Loxodroma



Zdroj: [<http://wazniak.mimuw.edu.pl>]

Výpočet ortodromy je následující:

$$\Delta\varphi' = \ln \left[\frac{\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_2}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_1}{2}\right)} \right] \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda} \quad (6)$$

$$l = \sqrt{(\Delta\varphi^2 + \sigma * \Delta\lambda^2) * r} \quad (7)$$

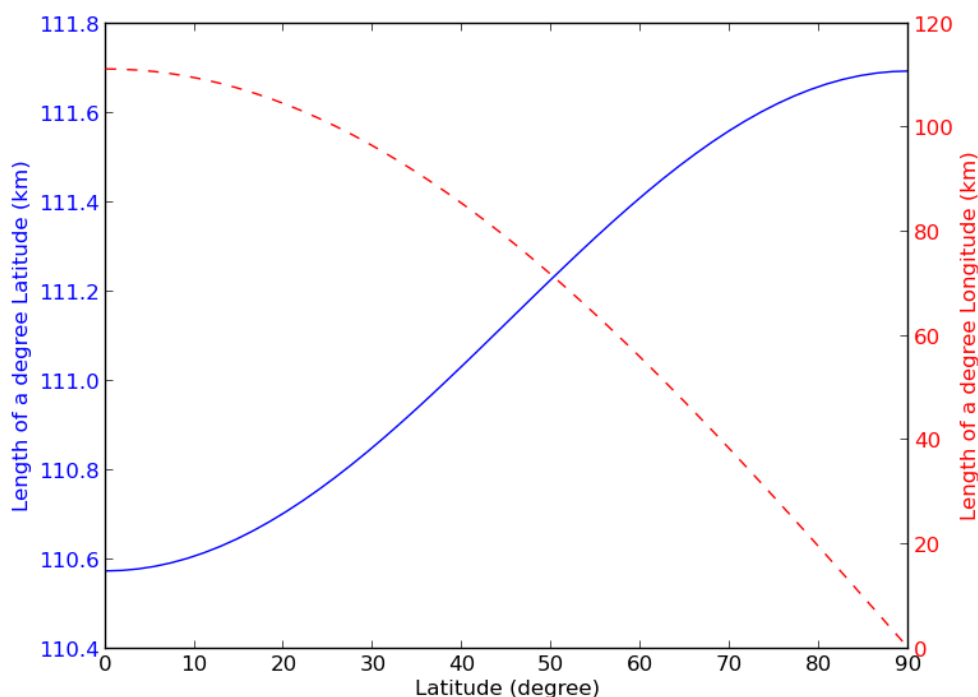
5.1.3. Pythagoras

Posledním způsobem jak vypočítat vzdálenost na zeměkouli je za použití Pythagorovy věty. Tato metoda není nejpřesnější na velké vzdálenosti, protože se zde rozdíl souřadnic násobí koeficientem, který převádí 1° zeměpisné šířky na kilometry. Výsledná rovnice vypadá takto:

$$l = \sqrt{\left[(\Delta\varphi^2 * k)^2 + (\Delta\lambda^2 * k) * \left(\cos \varphi_1 * \frac{\pi}{180} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

Koeficient se liší pro každou zeměpisnou šířku (Obrázek 27). Např. pro výpočet koeficientu na rovníku se vypočítává z obvodu Země podělené 360. Výsledná hodnota na rovníku se rovná 111 694 m. V našich podmínkách (50° zeměpisné šířky) se koeficient sníží na 111 229 m. Pro zjištění koeficientu lze použít například kalkulačtor na [18].

Obrázek 27 Určení koeficientu pro Pythagorovu metodu



Zdroj: [<http://www.csgnetwork.com/degreeenllavcalc.html>]

5.2. Výpočet vzdálenosti Londýn – New York

Pro výpočet vzdálenosti byla vybrána trasa mezi Londýnem a New Yorkem. Města New York nacházející se přibližně 40° 42' severní šířky a 74° 0' západní délky a Londýn ležící na 51° 30' 42'' severní šířky a 0° 2' 56'' západní délky.

Pro porovnání algoritmů byla použita Vincentova formule. Výpočet této formule je v Příloze 1. Tato formule používá elipsoid s přesností do 0,5 mm. Kalkulace je založena na sférickém modelu Země. Podobné sférické modely používají výpočty pomocí ortodromy a loxodromy, ale zjednodušené [19].

Pro tento příklad byly zvoleny tyto GPS souřadnice:

1. Londýn:

$$\varphi_1 = 51.454007$$

$$\lambda_1 = -0.131836$$

2. New York

$$\varphi_2 = 40.680638$$

$$\lambda_2 = -74.025879$$

5.2.1. Výpočet pomocí ortodromy

Vzdálenost vypočítaná pomocí ortodromy:

$$l = \left(\arccos \left(\left(\sin \left(\varphi_1 * \frac{\pi}{180} \right) * \sin \left(\varphi_2 * \frac{\pi}{180} \right) \right) + \cos \left(\varphi_1 * \frac{\pi}{180} \right) * \cos \left(\varphi_2 * \frac{\pi}{180} \right) * \cos \left(\left(\lambda_1 * \frac{\pi}{180} \right) - \left(\lambda_2 * \frac{\pi}{180} \right) \right) \right) * (6372,795) \right) \quad (9)$$

Pro výpočet souřadnic středu (φ_m , λ_m) se použijí tyto rovnice:

$$B_x = \cos \left(\varphi_2 * \frac{\pi}{180} \right) * \cos \Delta\lambda \quad (10)$$

$$B_y = \cos \left(\varphi_2 * \frac{\pi}{180} \right) * \sin \Delta\lambda \quad (11)$$

$$\varphi_m [\text{rad}] = \arctan2 \left(\sqrt{\left(\cos \left(\varphi_1 * \frac{\pi}{180} \right) \right)^2 + B_y}; \sin \left(\varphi_1 * \frac{\pi}{180} \right) + \sin \left(\varphi_2 * \frac{\pi}{180} \right) \right) \quad (12)$$

$$\lambda_m [\text{rad}] = \left(\lambda_1 * \frac{\pi}{180} \right) + \arctan2 \left(B_x + \cos \left(\varphi_1 * \frac{\pi}{180} \right); B_y \right) \quad (13)$$

Poté už je potřeba pouze toho převést do stupňů:

$$\varphi_m = \left(\varphi_m * \frac{180}{\pi} \right) \quad (14)$$

$$\lambda_m = \left(\lambda_m * \frac{180}{\pi} \right) \quad (15)$$

Výsledná vzdálenost New Yorkem a Londýnem vychází 5 576 km. Středové souřadnice vycházejí na $\varphi_m = 52.33039062$, $\lambda_m = -41.28887509$. Na obrázku 28 je znázorněno kudy vede trasa mezi Londýnem a New Yorkem.

Obrázek 28 Vyznačená trasa Londýn, New York pomocí ortodromy ve WGS-84



Zdroj: [maps.google.com]

5.2.2. Výpočet pomocí loxodroma

Rovnice pomocí které se dá vypočítat vzdálenost pomocí loxodromy:

$$l = \sqrt{(a)^2 + (b * (c)^2) * 6372,795} \quad (16)$$

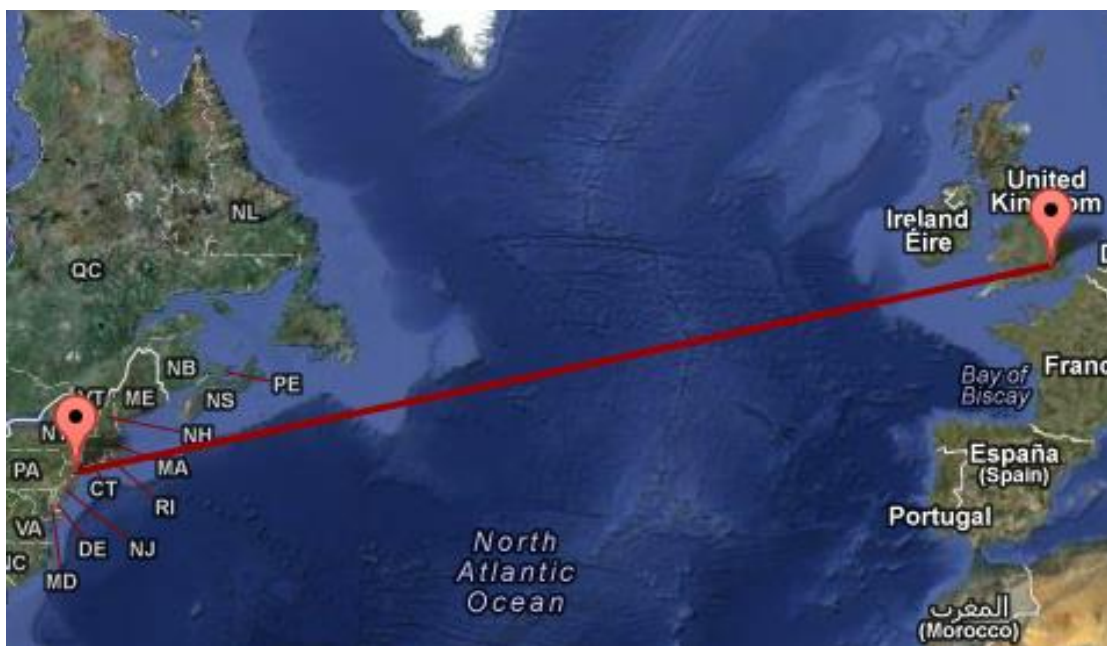
$$a = \left(\varphi_2 * \frac{\pi}{180} \right) - \left(\varphi_1 * \frac{\pi}{180} \right) \quad (17)$$

$$b = \left(\frac{\left(\varphi_2 * \frac{\pi}{180} \right) - \left(\varphi_1 * \frac{\pi}{180} \right)}{\ln \left(\frac{\tan \left(\frac{\frac{\pi}{4} + \varphi_2 * \frac{\pi}{180}}{2} \right)}{\tan \left(\frac{\frac{\pi}{4} + \varphi_1 * \frac{\pi}{180}}{2} \right)} \right)} \right)^2 \quad (18)$$

$$c = \left(\lambda_2 * \frac{\pi}{180} \right) - \left(\lambda_1 * \frac{\pi}{180} \right) \quad (19)$$

Pomocí tohoto algoritmu se výsledná hodnota rovná přibližně 5 800 km. Na Obrázek 29 je znázorněná loxodroma mezi městy.

Obrázek 29 Vyznačená trasa Londýn, New York pomocí loxodromy ve WGS-84



Zdroj: [maps.google.com]

5.2.3. Porovnání výsledků

Výsledné vzdálenosti pomocí byly porovnány s Vincentovou formulí, která je nejpřesnější, ale také nejsložitější. Jak je uvedeno v Tabulka 3, algoritmus počítaný pomocí loxodromy se liší o více jak 210 km. Ale u metody počítané pomocí ortodromy se odchýlil pouze o 13 km z 5 590 km. Pythagorova metoda je v tomto případě nevhodná, protože zde dochází k velké nepřesnosti vlivem zakřivení zeměkoule.

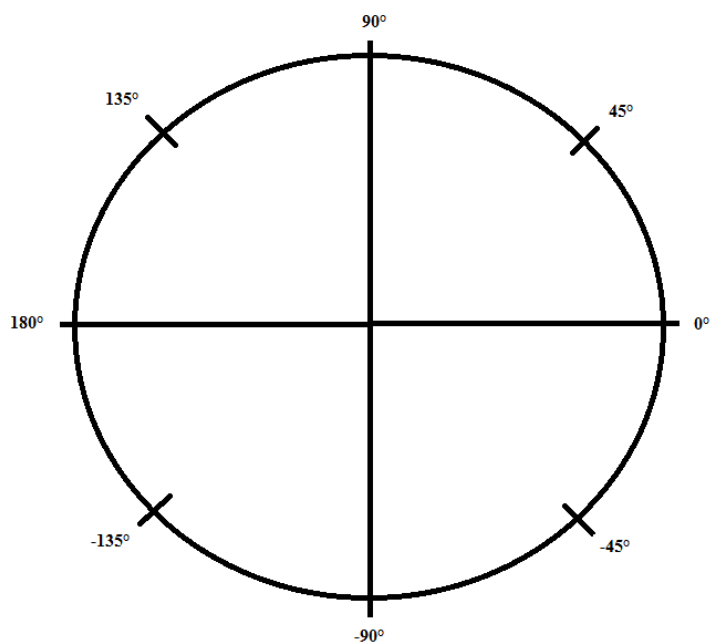
Tabulka 3 Porovnání algoritmů

Algoritmus	Vzdálenost	Rozdíl
Vincentova formule	5 590,386 km	
Ortodroma	5 576,942 km	13,444 km
Loxodroma	5 800,916 km	210,530 km

5.3. Výpočet úhlu mezi souřadnicemi

Dalším parametrem, který je potřeba vypočítat je úhel mezi souřadnicemi. Výsledné úhly vychází v kladných a záporných hodnotách 0 – 180° jak je znázorněno na Obrázek 30.

Obrázek 30 Číselné znázornění úhlů



Zdroj: [Autor]

Úhel mezi dvěma souřadnicemi se vypočítává podle vzorce:

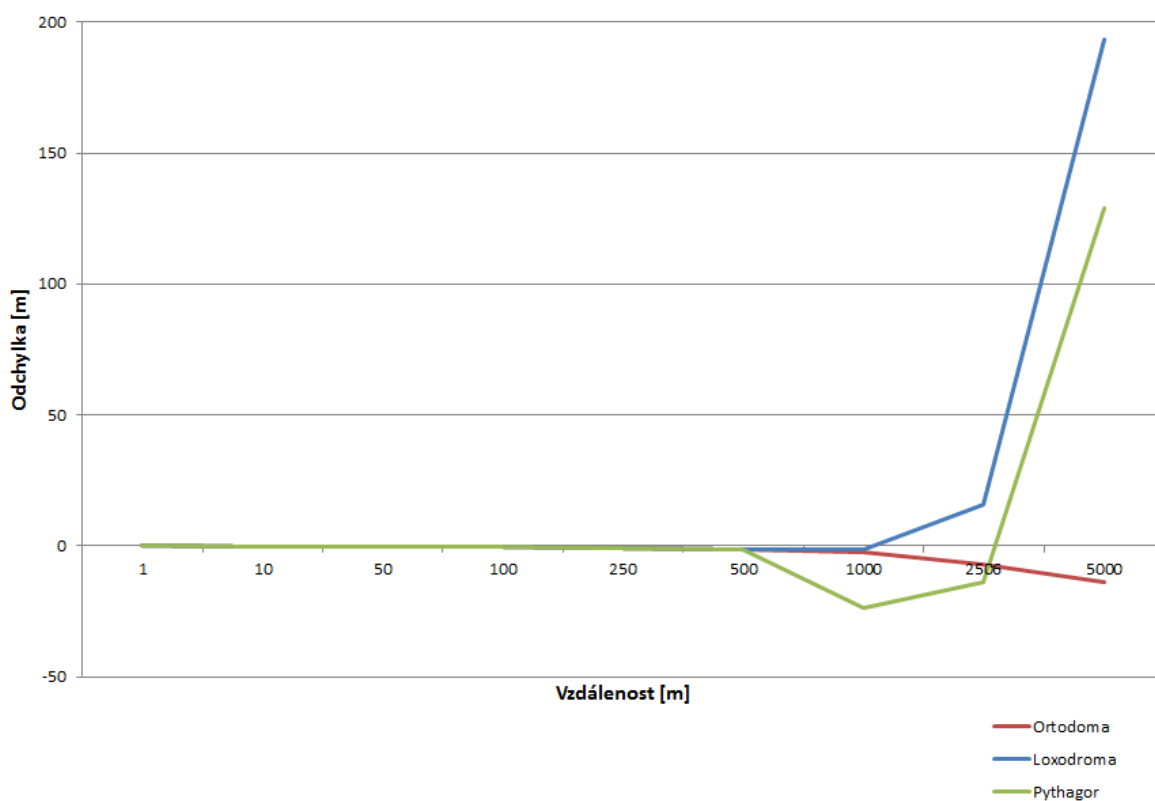
$$\text{úhel } [^\circ] = \arctan2 (\lambda_2 - \lambda_1 ; \varphi_2 - \varphi_1) * \frac{180}{\pi} \quad (20)$$

Pro potřeby příkladu byly zvoleny tři body (Obrázek 31) se souřadnicemi uvedené v Tabulka 4. Vzdálenost mezi body A, B je přibližně 260 m a mezi B, C přibližně 560 m. Svíraný úhel přímky mezi body A, B je roven 38° a mezi B, C je 152°.

Tabulka 4 Souřadnice bodů

	φ	λ
A	50.131308	14.374623
B	50.133124	14.376919
C	50.135916	14.371469

Obrázek 32 Grafické porovnání odchylek



Jak je uvedeno v Tabulka 5 a v Tabulka 7 odchylka od skutečnosti byla nejprve vypočtena pomocí Vincentovy formule a poté vypočtena jednotlivými algoritmy.

Tabulka 5 Vypočtená vzdálenost 1 – 250 km

	1km	10km	50km	100km	250km
Vincent	1,00863	10,16540	50,00438	99,99432	250,01020
Ortodroma	1,00581	9,98856	49,86477	99,71534	249,31239
Loxodroma	1,00581	9,98856	49,86495	99,71678	249,33492
Pythagor	1,00647	9,99585	49,91621	99,71253	249,11201

Tabulka 6 Odchylky 1 – 250 km

	1km	10km	50km	100km	250km
Ortodroma	-0,00282	-0,17684	-0,13961	-0,27898	-0,69781
Loxodroma	-0,00282	-0,17684	-0,13943	-0,27754	-0,67528
Pythagor	-0,00216	-0,16955	-0,08817	-0,28179	-0,89819

V Tabulka 6 jsou vypočteny odchylky do 250 km. Zde je uvedeno, že opravdu do 100 km, se i u Pythagorovy metody odchylka pohybuje do 282 m. Ve vzdálenosti 250 km se odchylka u Pythagora přibližuje 1 km.

Tabulka 7 Vypočtená vzdálenost 500 - 5000 km

	500km	1000km	2500km	5000km
Vincent	500,081541	1000,019218	2506,103988	5000,054197
Ortodroma	498,6786901	997,5096832	2499,178803	4986,247183
Loxodroma	498,8604958	998,7474885	2521,944673	5193,428738
Pythagor	498,8375647	976,447508	2492,03485	5128,840405

Tabulka 8 Odchylky 500 – 5000 km

	500km	1000km	2500km	5000km
Ortodroma	-1,402850851	-2,509534792	-6,925184725	-13,80701401
Loxodroma	-1,221045175	-1,271729477	15,84068493	193,374541
Pythagor	-1,243976327	-23,57170995	-14,06913829	128,7862084

V Tabulka 7 se dostáváme ke vzdálenostem od 500 km až do 5000 km. Zde se už začíná velmi projevovat chyba Pythagorovy metody a loxodromy. Na druhou stranu u ortodromy na 5000 km odchylka 13 km už je dobrý výsledek.

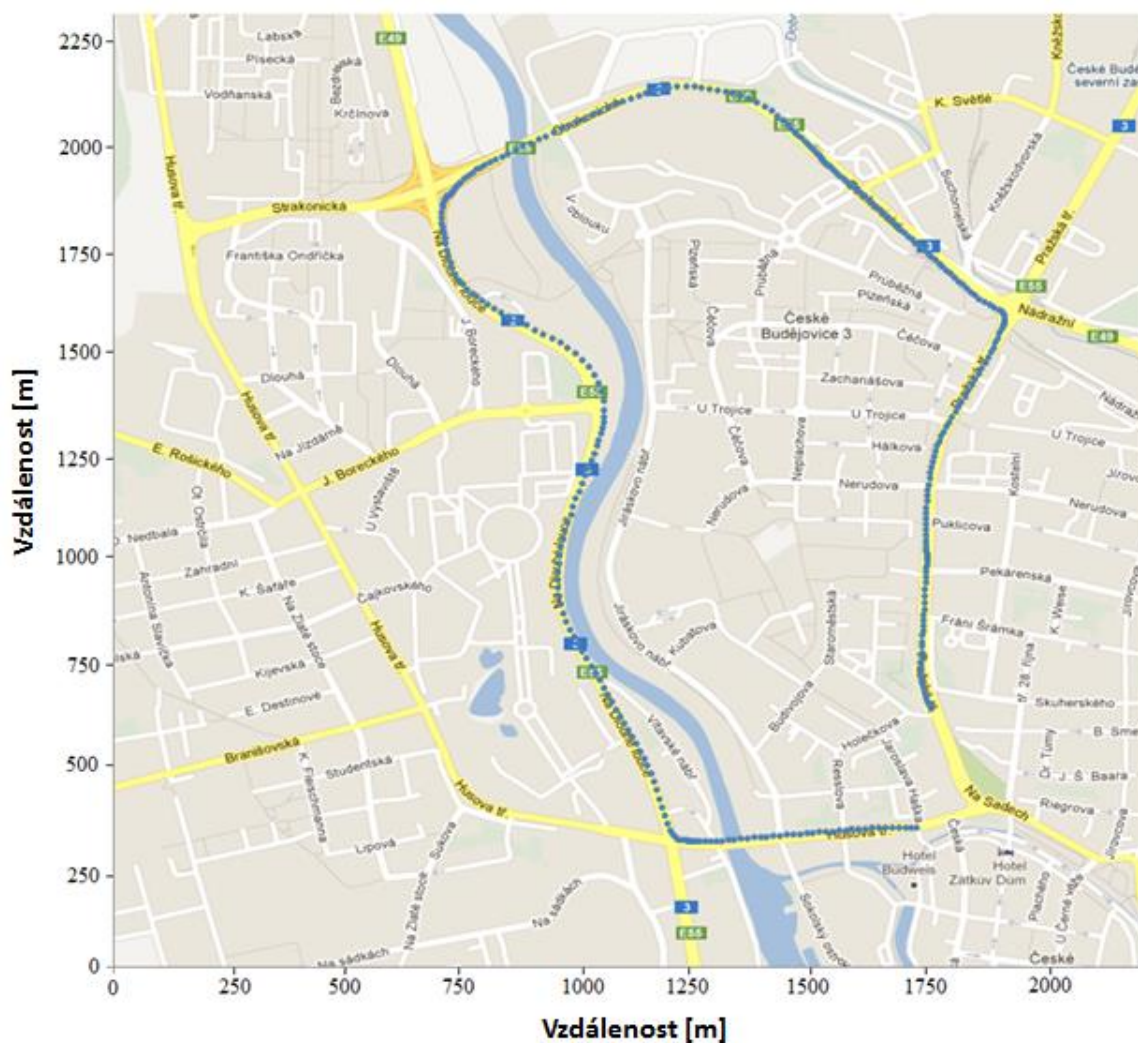
5.5. Modelový příklad

Pro porovnání algoritmů v reálném prostředí bylo rozhodnuto o přibližně 5 km úseku v Českých Budějovicích. Trasa byla projeta v sobotu po 15. hodině. V tuto dobu je malý provoz.

V Příloze 2 jsou uvedeny časy, souřadnice a nadmořská výška vypočtená GPS přijímačem. Tyto souřadnice byly upraveny, například stejné souřadnice byly odstraněny a čas byl vynulován a počítán od 0:00. Každou sekundu byla zapsána jedna souřadnice. Měřený úsek je znázorněn na Obrázek 33 sestaven z GPS souřadnic. V příloze 3 jsou znázorněny dva grafy, jeden znázorňující nadmořskou výšku a druhý zobrazující rychlost vypočtenou podle:

$$v = \frac{s}{t} * 3,6 \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \quad (21)$$

Obrázek 33 Měřený úsek v Českých Budějovicích



Zdroj: [maps.google.com]

Měřený úsek je dlouhý 4770 ± 2 m. Po vypočtení vzdáleností pomocí různých algoritmů vycházejí vzdálenosti:

- Ortodroma 4 799,098 m
- Loxodroma 4 799,095 m
- Pythagoras 4 800,079 m

Nepřesnost kolem 30 m byla způsobená, protože nebyly brány v potaz nepřesnosti GPS vlivem konfigurace družic nad místem, atmosféry, vícecestnému šíření signálu, šumu signálu a chyby hodin.

6. Diskuze

Jak je uvedeno v kapitole 5.4 všechny tři algoritmy se dají použít do 500 km. Asi do vzdálenosti 1000 km se dají používat obě metody ortodroma i loxodroma. Poté se dá použít jen metoda počítaná pomocí ortodromy, která i na 5000 km má odchylku přibližně 13km.

U modelového případu v kapitole 5.5 se všechny metody ukázaly být velmi přesné a odchylka na skoro 5 km úseku byla mezi těmito algoritmy 1 m a největší nepřesnost vykázal přijímač GPS.

Na druhou stranu ani jedna z popsaných metod nebere v úvahu rozdíly nadmořských výšek. Na zjišťování vzdálenosti mezi například údolím a vrcholkem kopce se proto tyto metody stávají nevyhovující. Zde by bylo pomohlo použití převodu do českého souřadnicového systému *Jednotné trigonometrické sítě katastrální* (S-JTSK).

Poslední částí je porovnání asymptotické složitosti a operační náročnosti algoritmů, kde absolutně nejsložitější je převod do systému S-JTSK. Zde se pro reálné použití v provozu jako nejvhodnější jeví metoda počítaná pomocí Pythagora.

7. Závěr

Geoinformatika a geoinformační technologie byly zprvu využívány především v oblasti geověd. Nicméně je zřejmé, že dnes si geoinformatika vydobyla zcela samostatnou pozici jakožto vědní disciplína zabývající se zpracováním prostorových dat. Vývoj v oblasti využívání geodat v současné době nejvíce ovlivňují informační technologie umožňující sbírat, zpracovávat a zprostředkovávat informace způsoby, které dříve nebyly možné a také možnost určování polohy prakticky kdykoliv a kdekoliv.

Vlastní povrch Země je velice složitý a členitý, než aby se s ním dalo přímo pracovat. Proto se pro potřeby mapování a kartografie nahrazuje referenčním elipsoidem, který lze matematicky popsat. Ten může být používán buďto globálně pro celou Zemi, nebo jen lokálně. V prvním případě hovoříme o obecném zemském elipsoidu, jehož střed je totožný se středem Země a jehož příkladem může být elipsoid světového geodetického systému WGS-84, který byl vypočten na základě družicových měření prováděných celosvětově a dlouhodobě pomocí družicových navigačních systémů. Povrch tohoto elipsoidu se ke geoidu přimyká natolik těsně, že maximální odchylky dosahují ± 60 m. V některých případech je referenční elipsoid poměrně složitý a proto se využívá skutečnosti, že referenční elipsoid má velice malé zploštění a lze ho v případě potřeby nahradit koulí.

V České Republice se jako kartografické zobrazení používá systém jednotné trigonometrické sítě katastrální (S-JTSK), který vznikl mezi lety 1920-1958. Tento kartografický systém využívá Besselův elipsoid a liší se se také orientací elipsoidu v prostoru a použitým měřítkem. Systém S-JTSK byl definován na bázi trigonometrické sítě a vykazuje nepravidelně měnící se lokální deformace. Z tohoto důvodu neplatí mezi oběma systémy přesný transformační klíč a proto transformace je do tohoto systému je poměrně složitá.

Pro výpočet vzdálenosti dvou bodů v systému WGS-84, který implicitně používají GPS přijímače a proto není nutné je složitě transformovat, se dají vypočítat čtyřmi způsoby. Vincentova formule s přesností do 0,5 mm je nejpřesnější metodou, ale také nejsložitější. Další dvě metody vypočítané pomocí ortodromy a loxodromy se přibližně do 1000 km skoro neliší a odchylka vzhledem k Vincentově formule na tuto vzdálenost překračuje jeden kilometr, respektive dva a půl u loxodromy. Na delší vzdálenosti, až

k 5000 km se metoda vypočítaná pomocí loxodromy stává nevyhovující, protože na mapě se loxodroma zobrazuje jako přímka a pro tuto vlastnost se v dřívějších dobách hojně využívala v mořeplavbě, protože umožňovala, aby lodi pluly ke svému cíli beze změny kursu. Plavba sice byla delší, ale při tehdejších nedokonalých prostředcích to bylo snazší, než měnit stále kurs, jak je to nutné dnes, kdy lodi (i letadla) jezdí po nejkratších trasách, podle ortodromy.

Poslední metodou byl výpočet pomocí Pythagorovy věty vynásobený koeficientem, který se liší pro každou zeměpisnou šířku. V našich podmínkách (50° zeměpisné šířky) je koeficient 111,229 km. Zároveň tato metoda je porovnání asymptotické složitosti a operační náročnosti algoritmu nejjednodušší.

V reálném použití na úseku dlouhém skoro 5 km ukázalo, že se metoda vypočítaná pomocí Pythagorovy věty má oproti ostatním metodám odchylku pouze jedem metr a největší nepřesnost zde vykazovala nepřesnost způsobená GPS přijímačem.

5. Seznam použitých zkratk

DOP – Dilution of Precision
ECEF – Earth Centered coordinate system
EU – Evropská unie
GIS – Geografické informační systémy
GPRS – General Packet Radio Service
GPS – Global Positioning System
HOW – Hand-Over Word
NAVSTAR – První polohový systém
TLM – Telemetry Word
WGS-84 – World Geodetic System 1984
S-JTSK – Souřadnicový systém jednotné trigonometrické sítě katastrální

6. Citovaná literatura

- [1] Rapant, Petr. Geoinformatika a geoinformační technologie. Ostrava: VŠB-TU, 2006. 513 s. ISBN 80-248-1264-9.
- [2] Maguine, D. J. - Goodchild, M.F. Geographical Information Systems. Vol. I.: Principles. Vol. II: Applications. Longman Scientific&Technology. London, 1991.
- [3] Voženílek, V. Aplikovaná kartografie I. Tematické mapy. Vysokoškolská skripta, UP Olomouc, 2001, 188 s.
- [4] Čapek, R. – Mikšovský, M. – Mucha, L. Geografická kartografie. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 1992, 373 s.
- [5] Hojovec, V. – Daniš, M. – Hájek, M. – Veverka, B. Kartografie. Geodetický a kartografický podnik, Praha, 1987, 660 s.
- [6] Laurini, R. – Thompson, D. Fundamentals of Spatial Information Systems. The APIC series. Number 37. Academic Press, London, 1994, 680 s.
- [7] Jurkina M. I. - Pick Miloš. Numerické výpočty ve světovém geodetickém referenčním systému 1984, Vojenský geografický obzor, 2006, ISSN 1214-3707.
- [8] Kostelecký, J. K převodu výsledků měření aparaturami GPS do souřadnicového systému S-JTSK. Geodetický a kartografický obzor, ročník 39/81, 1993, č. 7, s. 133-139.

- [9] Hrdina, Z. Transformace souřadnic ze systému WGS-84 do systému S-JTSK, ČVUT, Praha 1997.
- [10] Diggelen, D. – Frank, V. A-GPS: Assisted GPS, GNSS, and SBAS. London : Artech House, 2009. ISBN 978-1-59693-374-3.
- [11] Knap J. - Kumpošt J. Navigace pro sportovní letce. Naše vojsko, 175 stran, Praha 1960, ISSN D-09-01117.
- [12] Geografická informace – Vyjádření prostorových referencí souřadnicemi. ČSN ISO 19 111. Česká normalizační norma. Český normalizační institut, Praha, 2003.
- [13] Voser, S. A. The Internet Collection of Map Projections and Reference Systems for Europe. In: Spatial Reference Systems for Europe. Proceedings and Recommendations. Joint Research Centre, Spatial Applications Institute. Marne – La Vallée, 1999, 73 s.
- [14] Rapant, Petr. Geografické informační systémy. Habilitační práce. VŠB – TU, Ostrava, 1998.
- [15] Koreň, M. a kol. Methane detection system. Institute of Optoelectronics, Military University of Technology, Varšava, 2004. [cit. 2013-01-05]. Dostupné z: <http://imik.wip.pe.edu.pl/lasers/strona1.htm>.
- [16] Barnet, J. Přesná transformace souřadnic ze systému WGS-84 do systému S-JTSK. Praha, ČVUT, [cit. 2013-01-12]. Dostupné z: <http://transformace.webst.fd.cvut.cz/>.
- [17] Šváb, O. Satelitní určování polohy: Současný stav. ČZU, 2009, 36 s. Přednáška ČZU.
- [18] Length of a Degree of Latitude and Longitude. [cit. 2013-02-01]. Dostupné z: <http://msi.nga.mil/MSISiteContent/StaticFiles/Calculators/degree.html>.
- [19] Vincenty formula for distance between two Latitude/Longitude points. [cit. 2013-02-01]. Dostupné z: <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong-vincenty.html>.
- [20] Čapek, Richard a kol. Kartografie. Geografická kartografie. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 1992, [cit. 2013-01-21]. Dostupné z: <http://www.fd.cvut.cz/departament/k611/PEDAGOG/files/webskriptum/kartografie/kartografie.html>.

7. Seznam obrázků

Obrázek 1 Určování polohy nepřímým měřením	4
Obrázek 2 Dálkoměrná měření	5
Obrázek 3 Určování polohy přímým měřením	6
Obrázek 4 Schéma souřadnicového referenčního systému.....	8
Obrázek 5 Geografický souřadnicový systém	9
Obrázek 6 Geografický souřadnicový systém	10
Obrázek 7 Geocentrický souřadnicový systém.....	11
Obrázek 8 Odchylka skutečného průběhu povrchu Země od roviny.....	14
Obrázek 9 Sférický diskrétní souřadnicový systém - základní oktaedr.....	15
Obrázek 10 Sférický diskrétní souřadnicový systém - ukázka po prvním dělení.....	16
Obrázek 11 Sférický diskrétní souřadnicový systém - po čtvrtém dělení	17
Obrázek 12 Sférický diskrétní souřadnicový systém - dělení a adresace	17
Obrázek 13 Vztah mezi elipsoidickou a nadmořskou výškou	19
Obrázek 14 Křovákovo zobrazení	22
Obrázek 15 Transformace souřadnic ze systému WGS-84 do systému S-JTSK	24
Obrázek 16 Dálkoměrné systémy	26
Obrázek 17 Data vysílaná z družice	28
Obrázek 18 Vliv geometrie družic na přesnost měření.....	29
Obrázek 19 Konstelace družic GPS.....	31
Obrázek 20 Konstelace družic GLONASS.....	32
Obrázek 21 Konstelace družic Galileo	33
Obrázek 22 Průběh loxdromických a ortodromických spojnic	37
Obrázek 23 Znázornění rozdílu mezi Ortodromou a Loxodromou	38
Obrázek 24 Znázornění rozdílu na válcové mapě	38
Obrázek 25 Ortodroma	39
Obrázek 26 Loxodroma	41
Obrázek 27 Určení koeficientu pro Pythagorovu metodu	42
Obrázek 28 Vyznačená trasa Londýn, New York pomocí ortodromy ve WGS-84	44
Obrázek 29 Vyznačená trasa Londýn, New York pomocí loxodromy ve WGS-84.....	45
Obrázek 30 Číselné znázornění úhlů	46
Obrázek 31 Znázornění bodů na mapě	47
Obrázek 32 Grafické porovnání odchylek	48

Obrázek 33 Měřený úsek v Českých Budějovicích	50
---	----

8. Seznam tabulek

Tabulka 1 Rozměry vybraných referenčních elipsoidů	13
Tabulka 2 Základní parametry systému WGS-84.....	21
Tabulka 3 Porovnání algoritmů	45
Tabulka 4 Souřadnice bodů	46
Tabulka 5 Vypočtená vzdálenost 1 – 250 km.....	48
Tabulka 6 Odchytky 1 – 250 km	48
Tabulka 7 Vypočtená vzdálenost 500 - 5000 km	49
Tabulka 8 Odchytky 500 – 5000 km	49

9. Seznam příloh

Příloha 1 – Vincentova formule

Příloha 2 – GPS souřadnice

Příloha 3 – Rychlost a nadmořská výška u modelového příkladu

Příloha 1 - Vincentova formule

a, b = major & minor semiaxes of the ellipsoid

f = flattening $(a-b)/a$

φ_1, φ_2 = geodetic

latitude

L = difference in
longitude

$U_1 = \text{atan}((1-f).\tan\varphi_1)$ (U is 'reduced latitude')

$U_2 =$

$\text{atan}((1-f).\tan\varphi_2)$

$\lambda = L$ (first approximation)

iterate until change in λ is negligible (e.g. $10^{-12} \approx 0.006\text{mm}$) {

$$\sin\sigma = \sqrt{(\cos U_2 \cdot \sin\lambda)^2 + (\cos U_1 \cdot \sin U_2 - \sin U_1 \cdot \cos U_2 \cdot \cos\lambda)^2}$$

$$\cos\sigma = \sin U_1 \cdot \sin U_2 + \cos U_1 \cdot \cos U_2 \cdot \cos\lambda$$

$$\sigma = \text{atan2}(\sin\sigma, \cos\sigma)$$

$$\sin\alpha = \cos U_1 \cdot \cos U_2 \cdot \sin\lambda / \sin\sigma$$

$$\cos^2\alpha = 1 - \sin^2\alpha \text{ (trig identity; §6)}$$

$$\cos 2\sigma = \frac{\cos\sigma}{2 \cdot \sin U_1 \cdot \sin U_2 / \cos^2\alpha} -$$

$$C = f/16 \cdot \cos^2\alpha \cdot [4 + f \cdot (4 - 3 \cdot \cos^2\alpha)]$$

$$\lambda' = L +$$

$$(1-C) \cdot f \cdot \sin\alpha \cdot \{\sigma + C \cdot \sin\sigma \cdot [\cos 2\sigma + C \cdot \cos\sigma \cdot (-1 + 2 \cdot \cos^2 2\sigma)]\}$$

}

$$u^2 = \cos^2\alpha \cdot (a^2 - b^2) / b^2$$

$$A = 1 + u^2 / 16384 \cdot \{4096 + u^2 \cdot [-768 + u^2 \cdot (320 - 175 \cdot u^2)]\}$$

$$B = u^2 / 1024 \cdot \{256 + u^2 \cdot [-128 + u^2 \cdot (74 - 47 \cdot u^2)]\}$$

$$\Delta\sigma = B \cdot \sin\sigma \cdot \{\cos 2\sigma + B/4 \cdot [\cos\sigma \cdot (-1 + 2 \cdot \cos^2 2\sigma) - B/6 \cdot \cos 2\sigma \cdot (-3 + 4 \cdot \sin^2\sigma) \cdot (-3 + 4 \cdot \cos^2 2\sigma)]\}$$

$$s = b \cdot A \cdot (\sigma - \Delta\sigma)$$

$$\alpha_1 = \text{atan2}(\cos U_2 \cdot \sin\lambda, \cos U_1 \cdot \sin U_2 - \sin U_1 \cdot \cos U_2 \cdot \cos\lambda)$$

$$\alpha_2 = \text{atan2}(\cos U_1 \cdot \sin\lambda, -\sin U_1 \cdot \cos U_2 + \cos U_1 \cdot \sin U_2 \cdot \cos\lambda)$$

Zdroj: [<http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong-vincenty.html>]

Příloha 2 – GPS souřadnice

0:00	48,978045	14,471311	437,2	0:43	48,977826	14,464229	440,4
0:01	48,978027	14,471178	437,1	0:44	48,977887	14,464149	440,2
0:02	48,978037	14,471009	437,4	0:45	48,977996	14,464066	439,7
0:03	48,978045	14,470810	438,2	0:46	48,978126	14,463999	438,6
0:04	48,978049	14,470614	439,6	0:47	48,978294	14,463927	437,4
0:05	48,978047	14,470409	440,5	0:48	48,978474	14,463856	436,2
0:06	48,978039	14,470205	440,9	0:49	48,978672	14,463774	435,3
0:07	48,978032	14,469995	440,8	0:50	48,978868	14,463688	434,4
0:08	48,978018	14,469797	440,4	0:51	48,979056	14,463601	433,5
0:09	48,978009	14,469612	440,0	0:52	48,979232	14,463508	432,6
0:10	48,978001	14,469424	439,8	0:53	48,979394	14,463412	432,1
0:11	48,977987	14,469233	439,5	0:54	48,979555	14,463311	431,6
0:12	48,977972	14,469043	438,9	0:55	48,979716	14,463201	431,4
0:13	48,977958	14,468850	438,3	0:56	48,979878	14,463097	431,4
0:14	48,977948	14,468658	438,0	0:57	48,980031	14,462980	431,7
0:15	48,977938	14,468464	437,6	0:58	48,980181	14,462858	431,8
0:16	48,977929	14,468273	437,2	0:59	48,980331	14,462737	432,3
0:17	48,977917	14,468090	436,9	1:00	48,980483	14,462614	433,0
0:18	48,977903	14,467901	436,5	1:01	48,980637	14,462492	433,6
0:19	48,977892	14,467706	436,1	1:02	48,980793	14,462369	434,1
0:20	48,977884	14,467506	435,6	1:03	48,980951	14,462246	434,6
0:21	48,977872	14,467314	435,2	1:04	48,981110	14,462125	435,0
0:22	48,977859	14,467111	435,1	1:05	48,981269	14,462001	435,5
0:23	48,977846	14,466918	435,2	1:06	48,981428	14,461876	436,1
0:24	48,977834	14,466732	435,2	1:07	48,981587	14,461752	436,6
0:25	48,977823	14,466545	435,1	1:08	48,981747	14,461627	437,2
0:26	48,977810	14,466351	435,1	1:09	48,981908	14,461503	437,7
0:27	48,977797	14,466147	435,2	1:10	48,982069	14,461379	438,1
0:28	48,977781	14,465949	435,4	1:11	48,982227	14,461257	438,5
0:29	48,977767	14,465773	435,5	1:12	48,982389	14,461132	438,4
0:30	48,977754	14,465600	435,5	1:13	48,982563	14,461030	437,6
0:31	48,977744	14,465431	435,4	1:14	48,982747	14,460934	436,5
0:32	48,977738	14,465254	435,2	1:15	48,982931	14,460860	436,0
0:33	48,977737	14,465093	435,1	1:16	48,983118	14,460811	435,5
0:34	48,977740	14,464962	435,2	1:17	48,983292	14,460783	434,6
0:35	48,977743	14,464849	435,2	1:18	48,983468	14,460777	433,4
0:36	48,977748	14,464745	435,0	1:19	48,983651	14,460776	431,8
0:37	48,977749	14,464688	435,1	1:20	48,983835	14,460797	430,4
0:38	48,977750	14,464672	435,1	1:21	48,984020	14,460824	429,2
0:39	48,977758	14,464605	435,9	1:22	48,984201	14,460864	428,3
0:40	48,977762	14,464543	437,9	1:23	48,984378	14,460916	427,6
0:41	48,977772	14,464442	439,6	1:24	48,984554	14,460989	426,6
0:42	48,977788	14,464323	440,3	1:25	48,984729	14,461069	425,4

1:26	48,984903	14,461151	424,5	2:12	48,990968	14,457450	432,3
1:27	48,985077	14,461229	423,7	2:13	48,991088	14,457418	432,8
1:28	48,985249	14,461308	422,9	2:14	48,991200	14,457390	433,1
1:29	48,985420	14,461393	422,2	2:15	48,991311	14,457368	433,2
1:30	48,985591	14,461481	421,4	2:16	48,991423	14,457352	432,6
1:31	48,985762	14,461571	420,9	2:17	48,991545	14,457349	431,9
1:32	48,985931	14,461661	420,7	2:18	48,991642	14,457381	430,6
1:33	48,986093	14,461750	420,7	2:19	48,991714	14,457406	428,9
1:34	48,986252	14,461831	420,3	2:20	48,991776	14,457432	427,9
1:35	48,986409	14,461909	419,7	2:21	48,991836	14,457459	427,5
1:36	48,986555	14,461982	419,1	2:22	48,991871	14,457491	427,4
1:37	48,986683	14,462045	419,0	2:23	48,991881	14,457504	427,2
1:38	48,986802	14,462095	419,0	2:24	48,991881	14,457504	427,3
1:39	48,986928	14,462125	418,8	2:25	48,991932	14,457617	427,4
1:40	48,987054	14,462140	418,8	2:26	48,991952	14,457635	427,4
1:41	48,987205	14,462144	419,0	2:27	48,991979	14,457657	427,3
1:42	48,987404	14,462128	419,2	2:28	48,992017	14,457689	426,6
1:43	48,987599	14,462046	419,9	2:29	48,992067	14,457741	425,6
1:44	48,987791	14,461955	420,7	2:30	48,992128	14,457811	425,3
1:45	48,987972	14,461844	421,8	2:31	48,992194	14,457901	424,8
1:46	48,988138	14,461679	423,1	2:32	48,992267	14,458008	424,2
1:47	48,988297	14,461487	424,5	2:33	48,992340	14,458136	423,7
1:48	48,988440	14,461292	426,0	2:34	48,992407	14,458264	423,3
1:49	48,988562	14,461070	427,2	2:35	48,992471	14,458397	422,8
1:50	48,988670	14,460836	427,8	2:36	48,992526	14,458515	422,7
1:51	48,988762	14,460597	428,0	2:37	48,992581	14,458641	422,7
1:52	48,988858	14,460353	428,0	2:38	48,992636	14,458790	423,0
1:53	48,988956	14,460095	427,9	2:39	48,992691	14,458955	423,8
1:54	48,989056	14,459838	427,9	2:40	48,992750	14,459124	425,0
1:55	48,989152	14,459583	428,0	2:41	48,992820	14,459315	426,1
1:56	48,989242	14,459340	428,3	2:42	48,992899	14,459534	427,1
1:57	48,989329	14,459111	428,6	2:43	48,992979	14,459756	428,4
1:58	48,989414	14,458903	428,6	2:44	48,993056	14,459972	429,5
1:59	48,989504	14,458711	428,4	2:45	48,993132	14,460198	430,7
2:00	48,989590	14,458547	428,2	2:46	48,993209	14,460426	431,6
2:01	48,989678	14,458394	428,1	2:47	48,993287	14,460650	432,1
2:02	48,989758	14,458265	428,0	2:48	48,993363	14,460879	432,8
2:03	48,989854	14,458111	428,0	2:49	48,993438	14,461104	433,3
2:04	48,989956	14,457971	428,3	2:50	48,993514	14,461335	433,8
2:05	48,990057	14,457854	428,7	2:51	48,993592	14,461572	433,6
2:06	48,990175	14,457747	429,1	2:52	48,993668	14,461796	434,0
2:07	48,990306	14,457684	429,5	2:53	48,993746	14,462015	434,8
2:08	48,990442	14,457623	429,9	2:54	48,993825	14,462244	434,9
2:09	48,990577	14,457568	430,4	2:55	48,993901	14,462464	435,5
2:10	48,990709	14,457524	431,0	2:56	48,993972	14,462694	435,7
2:11	48,990843	14,457482	431,6	2:57	48,994040	14,462925	435,2

2:58	48,994103	14,463151	434,4	3:44	48,992157	14,469365	426,1
2:59	48,994160	14,463367	433,6	3:45	48,992089	14,469472	425,9
3:00	48,994206	14,463590	432,9	3:46	48,992021	14,469579	425,8
3:01	48,994243	14,463818	432,3	3:47	48,991953	14,469686	425,6
3:02	48,994270	14,464052	431,9	3:48	48,991882	14,469796	425,5
3:03	48,994290	14,464290	431,6	3:49	48,991809	14,469910	425,4
3:04	48,994296	14,464537	431,5	3:50	48,991735	14,470023	425,3
3:05	48,994290	14,464773	431,7	3:51	48,991665	14,470126	425,3
3:06	48,994274	14,465010	431,9	3:52	48,991593	14,470229	425,1
3:07	48,994249	14,465241	432,1	3:53	48,991520	14,470335	424,7
3:08	48,994216	14,465474	432,0	3:54	48,991452	14,470425	424,7
3:09	48,994182	14,465693	431,6	3:55	48,991379	14,470524	424,7
3:10	48,994142	14,465912	431,1	3:56	48,991308	14,470627	424,8
3:11	48,994096	14,466144	430,7	3:57	48,991229	14,470744	424,7
3:12	48,994034	14,466395	430,3	3:58	48,991154	14,470857	424,5
3:13	48,993935	14,466633	430,2	3:59	48,991080	14,470969	424,5
3:14	48,993845	14,466843	430,0	4:00	48,991010	14,471074	424,6
3:15	48,993753	14,467041	429,7	4:01	48,990941	14,471181	424,7
3:16	48,993656	14,467217	429,4	4:02	48,990863	14,471296	425,0
3:17	48,993555	14,467382	429,2	4:03	48,990777	14,471422	424,9
3:18	48,993455	14,467520	429,1	4:04	48,990697	14,471546	424,5
3:19	48,993375	14,467626	428,9	4:05	48,990624	14,471659	424,4
3:20	48,993300	14,467724	428,8	4:06	48,990556	14,471766	424,5
3:21	48,993230	14,467832	428,5	4:07	48,990484	14,471873	424,5
3:22	48,993157	14,467940	428,2	4:08	48,990411	14,471981	424,9
3:23	48,993090	14,468037	427,9	4:09	48,990337	14,472088	425,4
3:24	48,993025	14,468127	427,6	4:10	48,990264	14,472203	426,2
3:25	48,992961	14,468214	427,2	4:11	48,990190	14,472317	426,8
3:26	48,992900	14,468294	426,8	4:12	48,990112	14,472431	427,2
3:27	48,992851	14,468355	426,4	4:13	48,990032	14,472551	427,6
3:28	48,992810	14,468410	426,1	4:14	48,989945	14,472678	427,9
3:29	48,992773	14,468453	426,0	4:15	48,989867	14,472793	428,1
3:30	48,992742	14,468489	425,9	4:16	48,989795	14,472902	428,3
3:31	48,992716	14,468517	425,9	4:17	48,989716	14,473031	428,5
3:32	48,992693	14,468542	426,1	4:18	48,989644	14,473162	428,6
3:33	48,992656	14,468583	426,1	4:19	48,989574	14,473302	428,7
3:34	48,992635	14,468616	426,1	4:20	48,989510	14,473450	428,3
3:35	48,992607	14,468658	426,1	4:21	48,989455	14,473602	427,7
3:36	48,992577	14,468706	426,1	4:22	48,989407	14,473733	427,4
3:37	48,992543	14,468762	426,1	4:23	48,989361	14,473834	426,9
3:38	48,992508	14,468817	426,2	4:24	48,989317	14,473880	426,7
3:39	48,992465	14,468886	426,4	4:25	48,989265	14,473904	426,7
3:40	48,992410	14,468968	426,4	4:26	48,989200	14,473919	426,6
3:41	48,992348	14,469064	426,5	4:27	48,989157	14,473919	426,4
3:42	48,992286	14,469162	426,4	4:28	48,989123	14,473904	426,4
3:43	48,992223	14,469260	426,3	4:29	48,989098	14,473895	426,7

4:30	48,989077	14,473881	426,9	5:16	48,984042	14,471621	430,6
4:31	48,989045	14,473858	428,2	5:17	48,983998	14,471622	431,2
4:32	48,988973	14,473816	429,4	5:18	48,983977	14,471626	431,3
4:33	48,988880	14,473761	430,5	5:19	48,983944	14,471637	431,3
4:34	48,988785	14,473702	431,4	5:20	48,983917	14,471632	431,9
4:35	48,988687	14,473633	432,1	5:21	48,983883	14,471631	432,4
4:36	48,988574	14,473568	432,2	5:22	48,983814	14,471620	438,2
4:37	48,988464	14,473500	432,3	5:23	48,983748	14,471611	442,4
4:38	48,988352	14,473425	432,6	5:24	48,983655	14,471605	444,7
4:39	48,988236	14,473338	433,4	5:25	48,983541	14,471598	446,4
4:40	48,988117	14,473240	433,9	5:26	48,983410	14,471591	447,1
4:41	48,987993	14,473143	434,1	5:27	48,983267	14,471577	446,7
4:42	48,987871	14,473044	433,9	5:28	48,983124	14,471566	445,5
4:43	48,987750	14,472941	433,5	5:29	48,982979	14,471559	443,7
4:44	48,987627	14,472838	433,2	5:30	48,982831	14,471547	441,2
4:45	48,987505	14,472739	433,1	5:31	48,982700	14,471536	438,5
4:46	48,987388	14,472646	432,9	5:32	48,982585	14,471526	435,9
4:47	48,987272	14,472557	432,9	5:33	48,982467	14,471514	433,5
4:48	48,987156	14,472463	433,3	5:34	48,982365	14,471502	431,2
4:49	48,987043	14,472371	433,8	5:35	48,982247	14,471491	429,2
4:50	48,986933	14,472279	433,9	5:36	48,982125	14,471480	427,3
4:51	48,986826	14,472191	434,1	5:37	48,982010	14,471474	425,7
4:52	48,986725	14,472115	434,0	5:38	48,981889	14,471469	424,1
4:53	48,986625	14,472046	433,8	5:39	48,981781	14,471459	423,0
4:54	48,986522	14,471986	433,7	5:40	48,981663	14,471451	422,2
4:55	48,986413	14,471930	433,3	5:41	48,981545	14,471451	421,8
4:56	48,986299	14,471880	433,2	5:42	48,981432	14,471457	421,6
4:57	48,986182	14,471838	433,5	5:43	48,981323	14,471470	421,5
4:58	48,986060	14,471796	434,2	5:44	48,981220	14,471487	421,4
4:59	48,985943	14,471762	434,9	5:45	48,981119	14,471506	420,8
5:00	48,985821	14,471728	435,8	5:46	48,981017	14,471550	420,4
5:01	48,985697	14,471699	436,8	5:47	48,980907	14,471599	419,7
5:02	48,985569	14,471674	437,7	5:48	48,980817	14,471657	419,0
5:03	48,985440	14,471653	438,5	5:49	48,980732	14,471715	418,2
5:04	48,985313	14,471635	438,4	5:50	48,980659	14,471764	417,8
5:05	48,985190	14,471623	437,4				
5:06	48,985068	14,471617	436,1				
5:07	48,984947	14,471615	435,3				
5:08	48,984817	14,471612	434,3				
5:09	48,984692	14,471608	433,1				
5:10	48,984574	14,471603	432,1				
5:11	48,984455	14,471601	431,5				
5:12	48,984349	14,471600	430,9				
5:13	48,984244	14,471602	430,2				
5:14	48,984160	14,471603	429,7				
5:15	48,984092	14,471612	429,7				

Příloha 3 – Rychlost a nadmořská výška u modelového příkladu

