

UNIVERZITA PAVLA JOZEFA ŠAFÁRIKA V KOŠICIACH

GLOBÁLNE NAVIGAČNÉ SATELITNÉ SYSTÉMY

Vladimír Sedlák



Prírodovedecká fakulta

Košice 2017

Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach

Prírodovedecká fakulta

GLOBÁLNE NAVIGAČNÉ SATELITNÉ SYSTÉMY

Vladimír Sedlák

Košice 2017

Globálne navigačné satelitné systémy

Vysokoškolský učebný text

Autor:

prof. Ing. Vladimír Sedlák, PhD.

Prírodovedecká fakulta Univerzity Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach

Recenzenti:

prof. Mgr. Jaroslav Hofierka, PhD.

Prírodovedecká fakulta Univerzity Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach

doc. Ing. Peter Blišťan, PhD.

Fakulta baníctva, ekológie, riadenia a geotechnológií Technickej univerzity v Košicích

Všetky práva vyhradené. Toto dielo ani žiadnu jeho časť nemožno reprodukovat',
ukladať do informačných systémov alebo inak rozširovať bez súhlasu majiteľov práv.

Za odbornú a jazykovú stránku vysokoškolského učebného textu zodpovedá autor.

Rukopis neprešiel redakčnou ani jazykovou úpravou.

ISBN 978-80-8152-554-4

OBSAH

Úvod	3
1. Lokalizácia a navigácia	5
1.1 Základné pojmy	5
1.2 Z histórie lokalizácie a navigácie	6
1.2.1 História lokalizácie a navigácie u moreplavcov	7
1.2.2 Nultý poludník - prelom v lokalizácii a navigácii	12
1.3 Rádiová lokalizácia a navigácia	16
1.3.1 História a základné princípy rádiovej lokalizácie a navigácie	16
1.3.2 História kozmickej lokalizácie a navigácie	19
Otázky a úlohy z kap. 1	25
2. Globálne navigačné satelitné systémy	26
2.1 GPS - Globálny polohový systém	27
2.1.1 Z histórie GPS	27
2.1.2 Štruktúra, princíp činnosti, zásady a osobitosti GPS	30
2.1.3 Aplikácie GPS	32
2.1.4 GPS a jeho perspektívy	37
2.1.5 Štruktúra GPS	41
2.1.6 Čas GPS	59
2.1.7 Merané veličiny GPS	62
2.1.8 Základné princípy merania pseudovzdialenosti GPS	63
2.1.9 Meračské metódy GPS	73
2.1.10 Presnosť GPS	80
2.1.11 GPS a slnečné žiarenie	88
2.1.12 WGS 84	90
2.2 GLONASS - Globálny navigačný satelitný systém	92
2.2.1 Z histórie GLONASS	92
2.2.2 Štruktúra, princíp činnosti, zásady a osobitosti GLONASS	92
2.2.3 Činnosť GLONASS	97
2.2.4 Systémový čas GLONASS	98
2.2.5 Súradnicový systém pre GLONASS	98
2.2.6 Základné princípy merania pseudovzdialenosti u GLONASS	98
2.3 GPS versus GLONASS	99
2.4 Galileo	101
2.4.1 Z histórie systému Galileo	101
2.4.2 Štruktúra, princíp činnosti, zásady a osobitosti systému Galileo	103
2.4.3 Aplikácia Galilea a obchodné možnosti	113
2.5 Compass	118
2.5.1 Z histórie systému Compass	118
2.5.2 Štruktúra, princíp činnosti, zásady a osobitosti systému Compass	119

2.5.3 Perspektívy systému Compass	121
Otázky a úlohy z kap. 2	123
3. Rozširujúce navigačné satelitné systémy	127
3.1 QZSS	129
3.2 IRNSS	131
3.3 WASS	132
3.4 EGNOS	133
3.5 MSAS	134
3.6 GAGAN	135
3.7 SDCM	136
3.8 SNAS	137
3.9 WAGE	137
3.10 GPS·C/CWAAS	137
3.11 SBAS AFI	139
3.12 SSACCSA	139
Otázky a úlohy z kap. 3	141
Záver	142
Správne odpovede a riešenia	144
Literatúra	147
Zoznam obrázkov a tabuliek	149
Zoznam skratiek	153

ÚVOD

Globálne navigačné satelitné systémy (GNSS, z angl. *Global Navigation Satellite Systems*, slov. *Globálne navigačné satelitné systémy*)¹ patria k najdominantnejším výtvarným súčasným vedy a techniky v satelitnej² navigácii a lokalizácii. Sú to navigačné satelitné systémy uľahčujúce presnú a rýchlu navigáciu a určenie priestorovej polohy na zemskom povrchu. Uplatnenie satelitných navigačných systémov v systéme geovied (geodézia, geológia, geofyzika, geografia, geoinformatika atď.) je stále viac aktuálnejšie a naliehavšie. Predkladané vysokoškolské skriptá *Globálne navigačné satelitné systémy* sú určené pre študentov s prírodovedným a technickým zameraním na geodetické, geografické a geoinformatické, prípadne na im príbuzné vysokoškolské štúdiá.

V predkladaných vysokoškolských skriptách sú zhrnuté základné teoretické i praktické princípy GNSS, medzi ktoré patria, resp. po dobudovaní európskeho navigačného satelitného systému *Galileo* a čínskeho *Compass* budú patriť:

- americký navigačný satelitný systém NAVSTAR GPS (z angl. NAVigation Signal for Timing And Ranging - Global Positioning System³),
- ruský navigačný satelitný systém GLONASS (z rus. ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система - GLObalnaja NAvigacionnaja Sputnikovaja Sistema, slov. *Globálny navigačný satelitný systém*),
- navigačný satelitný systém Európskej únie (EÚ) *Galileo*⁴,
- čínsky navigačný satelitný systém *Compass*⁵.

V predkladaných vysokoškolských skriptách sú prezentované aj tzv. satelitné podporujúce (rozširujúce, zosilňujúce, resp. spresňujúce) navigačné systémy SBAS (z angl. *Satellite Based Augmentation Systems*, slov. *Systémy rozširujúce (zosilňujúce, resp. spresňujúce) základné satelitné systémy*, resp. *Rozširujúce navigačné satelitné systémy*, ktoré sú podpornými satelitnými systémami pre GNSS.

Z GNSS v súčasnosti už dlhodobo funkčný americký navigačný satelitný systém GPS a ruský navigačný satelitný systém GLONASS a aj od decembra 2016 čiastočne funkčný európsky navigačný satelitný systém *Galileo* majú a budú mať široké uplatnenie v prospech cielenej činnosti človeka dnes už v takmer všetkých oblastiach jeho pracovnej i mimopracovnej aktivity.

Vysokoškolské skriptá *Globálne navigačné satelitné systémy* vzhľadom na súčasný progresívny vývoj v technologických a prístrojových princípoch a prvkoch takýchto navigačných satelitných systémov prezentujú stav v týchto satelitných technológiách od

¹ Viaceré domáce a zahraničné odborné a vedecké bibliografické zdroje používajú vo výraze *Global Navigation Satellite Systems* (*Globálne navigačné satelitné systémy*) plurál (systems/systémy). Niektoré bibliografické zdroje používajú singulár (system/systém). Do GNSS sú zahrnuté štyri globálne satelitné systémy (GPS, GLONASS, Galileo a Compass), čo oprávňuje správnosť používania plurálu v názve GNSS.

² *Satelit*, z angl. *satellite*, slov. *družica*, presnejšie *umelá družica Zeme* (prídavné meno satelitný, -á, -é / družicový, -á, -é). Slovenský jazyk akceptuje výraz „satelit“ za gramaticky správny, t.j. oba výrazy družica a satelit sú v slovenskom jazyku spisovné, a teda gramaticky správne (vyjadrenie Jazykovedného ústavu Ľudovíta Štúra Slovenskej akadémie vied).

³ Pôvodný názov: NAVSTAR GPS (z angl. NAVigation Signal for Timing and Ranging - Global Positioning Sytem), voľný preklad do slovenčiny znamená: *Navigačný signál pre časovanie a meranie (mapovanie, priestorové vymedzenie) - Globálny polohový systém*.

⁴ Pomenovaný podľa Galilea Galileiho. Galileo Galilei (* 15.2.1564 - † 8.1.1642) bol taliansky fyzik, matematik, astronóm a filozof, ktorý hral hlavnú úlohu vo vedeckej revolúcii a ktorý ako prvý na svete sa vedecky zaoberal námornou navigáciou podľa nebeských telies.

⁵ Pôvodne mal mať označenie BNSS (z angl. BeiDou Navigation Satellite System), z názvu ktorého sa neskôr upustilo a prijalo sa pomenovanie *Compass*. *Compass*, resp. tiež *BeiDou-2* je pokračovateľom pôvodného čínskeho regionálneho navigačného satelitného systému *BeiDou-1*.

historického momentu ich vzniku a vývoja po súčasnosť. Rýchly vývoj najmä v prístrojovej báze navigačných satelitných systémov si s odstupom času budú vyžadovať doplnenie o ich aktuálny stav, s čím sa perspektívne uvažuje v prípadných budúcich edíciách týchto prezentovaných vysokoškolských skrípt.

*Vysokoškolské skriptá **Globálne navigačné satelitné systémy** sú prezentáciou parciálnych výstupov riešenia projektu KEGA č. 007UPJŠ-4/2017 riešeného na Univerzite Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach v období rokov 2017 až 2019.*

1. LOKALIZÁCIA A NAVIGÁCIA

1.1 ZÁKLADNÉ POJMY

V procese určovania priestorovej, t.j. 3D (troj-dimenzionálnej) polohy bodu alebo objektu na zemskom povrchu i mimo neho, ako aj v procese správneho určenia smeru pohybu bodu alebo objektu v priestore (na zemskom povrchu i mimo neho) je potrebné presne zadefinovať a rozlíšiť význam oboch výrazov - *lokalizácia* a *navigácia*⁶ (Rapant, 2002; Sedlák et al., 2009; Sedlák, 2012; Sedlák a Lošonczi, 2011; Vojtek, 2014):

- *Lokalizácia* je proces určenia polohy bodu, resp. objektu v priestore.
- *Navigácia* je proces určovania optimálnej dráhy pohybu a smeru bodu, resp. objektu k danému cieľu.

V zjednodušenom vyjadrení môžeme povedať, že lokalizáciou je myslené určovanie jednoznačnej polohy v priestore a navigáciou je označované možnosť (spôsob) dostať sa z jedného miesta na druhé po vytýčenej trase. Kým navigácia v čase a priestore je proces dynamický, lokalizácia je priestorovo statický proces. U navigácii je kompromis medzi presnosťou v určení polohy a požadovanou rýchlosťou navigácie. Presnosť u lokalizácii nie je spravidla podmienená časovým obmedzením v dĺžke merania a výpočtu.

Kým pre lokalizáciu je spravidla hlavným kritériom dosiahnutie jej požadovanej polohovej presnosti, v prípade navigácie existujú dve kritéria:

- polohová presnosť lokalizácie v priebehu navigácie,
- čas potrebný pre určenie aktuálnej polohy.

Nároky na polohovú presnosť navigácie sú dané typom navigačnej úlohy, ktorá je práve riešená a prostredím, v ktorom navigáciu uskutočňujeme. Pri lokalizácii sa snažíme s definovanou presnosťou určiť horizontálnu, t.j. 2D (dvoj-dimenzionálnu) alebo priestorovú, t.j. 3D polohu. Pri navigácii je určenie polohy len jeden kus informácie, ktorá je nevyhnutná pre úspešnú navigáciu. Ďalšími významnými informáciami sú čas, rýchlosť pohybu a smer pohybu. Lokalizáciu môžeme realizovať rôzne presnými metódami. Tu platí nepriama úmera medzi presnosťou určenia polohy a časovou náročnosťou zistenia tejto polohy. Napr. veľmi presná lokalizácia geodetickými metódami s polohovou presnosťou rádovo v prvých milimetroch alebo centimetroch je na úkor času potrebného pre zmeranie potrebných veličín a výpočtu výslednej polohy. Z tohto dôvodu nie sú metódy geodetickej lokalizácie vhodné pre navigáciu, ktorá je v čase dynamická a nevyžaduje mieru presnosti, akú poskytujú metódy geodézie.

Keďže GNSS pracujú na princípe šírenia elektromagnetických (rádiových) vĺn zo satelitov a ich detekcie prístrojmi na zemskom povrchu, resp. v priestore mimo neho, je potrebné si vysvetliť pojmy - *rádiolokalizácia* a *rádionavigácia* (Forssell, 2008; Leick et al., 2015; Mervart, 1994; Rapant, 2002; Sedlák, 2012; Seeber, 2003; Vojtek, 2014):

⁶ Pojmy *lokalizácia* a *navigácia* (najmä v rádiovnej a satelitnej technike) v mnohých vysvetleniach v literatúre domácej i zahraničnej sú stiahnuté do jedného pojmu, t.j. *navigácia*. Aby sme mohli pomocou rádiovnej či satelitnej techniky navigovať napr. dopravný prostriedok, najprv je potrebné určiť jeho lokalizáciu (polohu) a následne ho navigovať (nasmerovať) do určitého cieľa. V niektorých dominantných častiach týchto vysokoškolských skript sú oba pojmy uvádzané odsele, vo všeobecných popisných textoch sú oba pojmy (*lokalizácia* a *navigácia*) skĺbené do jedného pojmu (*navigácia*).

- Rádiolokalizácia je proces určenia polohy bodu alebo objektu v priestore s využitím elektromagnetických (rádiových) vln.
- Rádionavigácia je proces určovania optimálnej dráhy pohybu a smeru bodu alebo objektu k danému cieľu s využitím elektromagnetických (rádiových) vln.

V zjednodušenom vyjadrení rádiolokalizácia a rádionavigácia sú procesy určenia polohy určitého bodu alebo objektu v priestore a určovania optimálnej cesty a smeru určitého bodu alebo objektu k danému cieľu s využitím elektromagnetických (rádiových) vln. Takéto vlny sú využívané pre GNSS (NAVSTAR GPS, GLONASS, Galileo, Compass a všetky SBAS⁷). Technológie GNSS sú technológie nepriameho určenia polohy, t.j. z nameraných hodnôt fyzikálnych veličín z rádiových vln vysielaných satelitmi sa v prijímači GNSS, resp. NAVSTAR GPS príslušným softvérovým spracovaním vyhodnotí určovaná 2D (X, Y) alebo 3D (X, Y, Z) poloha.

1.2 Z HISTÓRIE LOKALIZÁCIE A NAVIGÁCIE

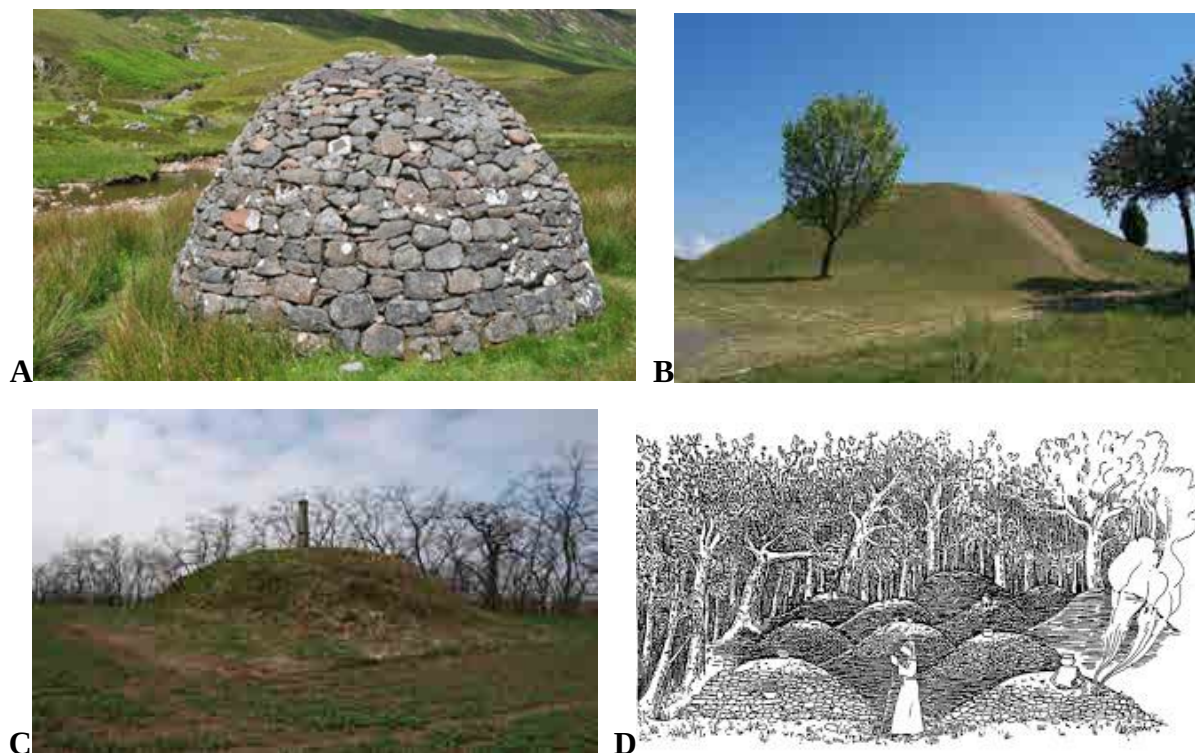
Ľudia od praveku sa v teréne orientovali podľa výrazných prírodných orientačných bodov, ktoré im poskytla krajina so svojou morfológickou rozmanitosťou. Lokalizácia i navigácia a s ňou spojená orientácia v teréne najmä v súvislosti s pohybom človeka a jeho prepravou bola spätá ním a jeho cestovateľskými (prepravnými, dopravnými) aktivitami od vzniku civilizácie na Zemi, t.j. od praveku až po súčasnosť.

V dávnej minulosti sa k orientácii používali objekty, body či znaky v krajine, akými sú (Rapant, 2002; Vojtek, 2014):

- prirodzené vrcholy kopcov a pahorkov, kamene, jaskyne, stromy, krovia, vodné toky, jazerá, moria a oceány a pod.
- umelé kamenné mohyly (obr. 1.1) a násypy, označenia na kmeňoch stromov, prípadne vykopané ryhy a pod.

Vzdialenosť sa odmeriavala ako čas (doba trvania) cestovania, napr.: „*Je to ďaleko na tri dni jazdy koňom*“; „*Žije odtiaľ na deň cesty kočom*“; „*Je potrebné tam ísť až do západu Slnka*“; „*Pôjdeš touto cestou až kým tma nesadne*“ a pod. Koncept orientačných bodov pretrval dodnes. Princípy lokalizácie a navigácie sú stále rovnaké, menia sa len prostriedky. Na rozdiel od dávnej i blízkej minulosti v lokalizácii a navigácii používame zložitejšie a sofistikovanejšie metódy označovania a nachádzania orientačných bodov.

⁷ Satelitný augmentačný systém (SBAS, z angl. *Satellite-Based Augmentation Systems*) je systém, ktorý podporuje rozsiahlu alebo regionálnu augmentáciu (zväčšenie, resp. rozšírenie, či skvalitnenie dosahu satelitného signálu) pomocou ďalších satelitných správ. Ináč vysvetlené SBAS sú tzv. dolňujúce navigačné satelitné systémy regionálneho charakteru, ktoré rozširujú, resp. znásobujú, či skvalitňujú a tým aj spresňujú (istým spôsobom podporujú) rádiové signály vysielané zo satelitov daného systému (NAVSTAR GPS, GLONASS, Galileo, Compass). O SBAS pojednáva kap. 3.



Obr. 1.1: Umelé orientačné body (objekty) v teréne: kamenný násyp (A); Trakijská mohyla pri obci Debnevo, Trojansko v Bulharsku (B); mohyla Homole - praveká mohyla, Chotouň, Česká republika (C); mohyly - ilustračná kresba z konca 18. stor. (D).

1.2.1 História lokalizácie a navigácie u moreplavcov

Problém navigácie, a tým aj lokalizácie na mori pre prvých moreplavcov nastal už cca 3 500 rokov p.n.l. Navigácia podľa orientačných bodov na pobreží bola pomerne jednoduchá, moreplavci sa orientovali zväčša podľa známych tvarov pobreží, signalizačných ohní a majákov (obr. 1.2). Plavba na otvorenom mori si vyžadovala iné metódy navigácie, než plavba pri pobreží. Dlhé stáročia prevládala klasická navigácia a lokalizácia na mori pomocou *magnetickej buzoly (kompasu)*. Takáto navigácia pretrvávala až do 17. stor. V druhej polovici 17. stor. nastupuje tzv. *navigácia výpočtom*⁸ (obr. 1.3) a od 18. stor. *astronomická navigácia*⁹ (Rapant, 2002; Vojtek, 2014).

⁸ Navigátor určuje aktuálnu polohu lode starostlivým a podrobným záznamom o jej pohybe. Východiskový bod je obvykle posledná poloha lode (napr. pomocou orientačných bodov na pobreží). Od východiskového bodu sú do mapy priebežne zakresľované smery a prejdene vzdialenosti, tzv. navigačná línia, kde zohrávali dôležitú úlohu rýchlosť pohybu lode a čas.

⁹ *Astronomická navigácia* je z historického hľadiska metóda na orientáciu lodí pomocou hviezd, Slnka a Mesiaca na oblohe, v súčasnosti skôr orientácia kozmických lodí pomocou hviezd, Slnka a Mesiaca. Do 18. stor. to bol nenáročný spôsob orientácie, používali sa pritom aj náročné pomôcky, napr. pre meranie zenitovej vzdialenosti nebeských telies sa používal *sextant* (po prvýkrát skonštruoval John Bird v roku 1759), pre presné meranie času to bol *chronometer* (prvý exemplár chronometra pre námorné plavby vyvinul anglický hodinár John Harrison v roku 1761) a k týmto zariadeniam sa používal *astronomický almanach*. Astronomické almanachy umožňujú stanoviť polohu jednotlivých nebeských telies na oblohe. Pre vybrané telesá na oblohe je možné z almanachu odvodiť jeho deklináciu a následne hviezdnu zemepisnú šírku pre pozorovateľa, ktorý sa nachádza na určitom mieste zemského povrchu a uskutočňuje observáciu nebeského telesa v určitom čase.

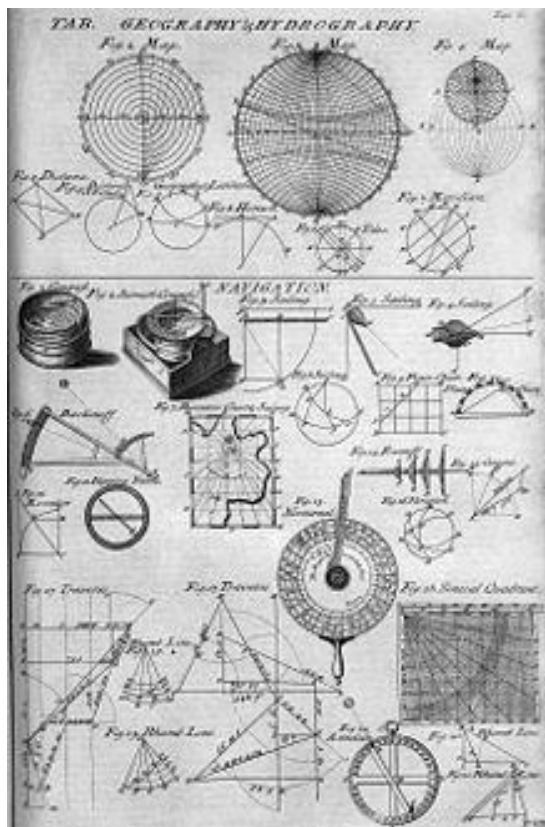


Obr. 1.2: Stredoveké vyobrazenie majáku v Alexandrii na ostrove Faros (A) a jeho novodobá maketa (B); najstarší funkčný maják na svete Torre de Hércules alebo tiež Herculova veža pri Atlantickom oceáne (pri galicijskom prístavnom meste La Coruña, Španielsko) (C); zrekonštruovaný maják zo 17. stor. na pobreží jazera Swilly, Írsko (D).



Obr. 1.3: Navigácia lode výpočtom - kompasový kurz. Náčrt podľa dobových máp z konca 13. stor.

Moreplavci si vytvárali a osvojili viaceré navigačné a lokalizačné nákresy, značky a jednoduché zariadenia najmä k navigácii výpočtom a astronomickej navigácii (obr. 1.4). Vtedajší stredovekí „jednoduchí“ (menej vzdelaní) moreplavci hovorili, že navigácia výpočtom a astronómická navigácia je metóda pre „vzdelaných“.



Obr. 1.4: Historické náčrty námorných navigácií a navigačných zariadení.

Je pozoruhodné, že klasická navigácia na mori pomocou magnetického kompasu a navigácia výpočtom stačili v stredoveku na prevratné historické zaoceánske plavby a objavy tzv. „nových svetov“ (obr. 1.5). Napr. historicky svetoznámemu moreplavcovi *Krištofovi Kolumbusovi*¹⁰ navigácia magnetickou buzolou a výpočtom¹¹ postačila v roku 1492 k objaveniu Ameriky. Ďalší svetoznámy moreplavec *Vasco de Gama*¹² navigáciou magnetickou buzolou a výpočtom úspešne podnikol tri plavby do Indie (v rokoch 1497, 1502 a 1524) a položil základy k neskoršej dominancii Portugalska ako koloniálnej veľmoci a taktiež nemenej významný moreplavec *James Cook*¹³ tromi plavbami okolo sveta navigáciou len za podpory magnetickej buzoly a výpočtom (v rokoch 1768 až 1771) a hlavne vydanými prácami výrazne posunul znalosti o Zemi (obr. 1.6).

¹⁰ *Krištof Kolumbus*, tal. *Christoforo Colombo*, špan. *Cristóbal Colón* (podľa iných zdrojov sa volal *Pedro Scotto*) (* asi 1451, Janov - † 20. mája 1506, Valladolid) bol janovský moreplavec v španielskych službách, ktorý objavil Ameriku pre „Európu dneška“ v roku 1492.

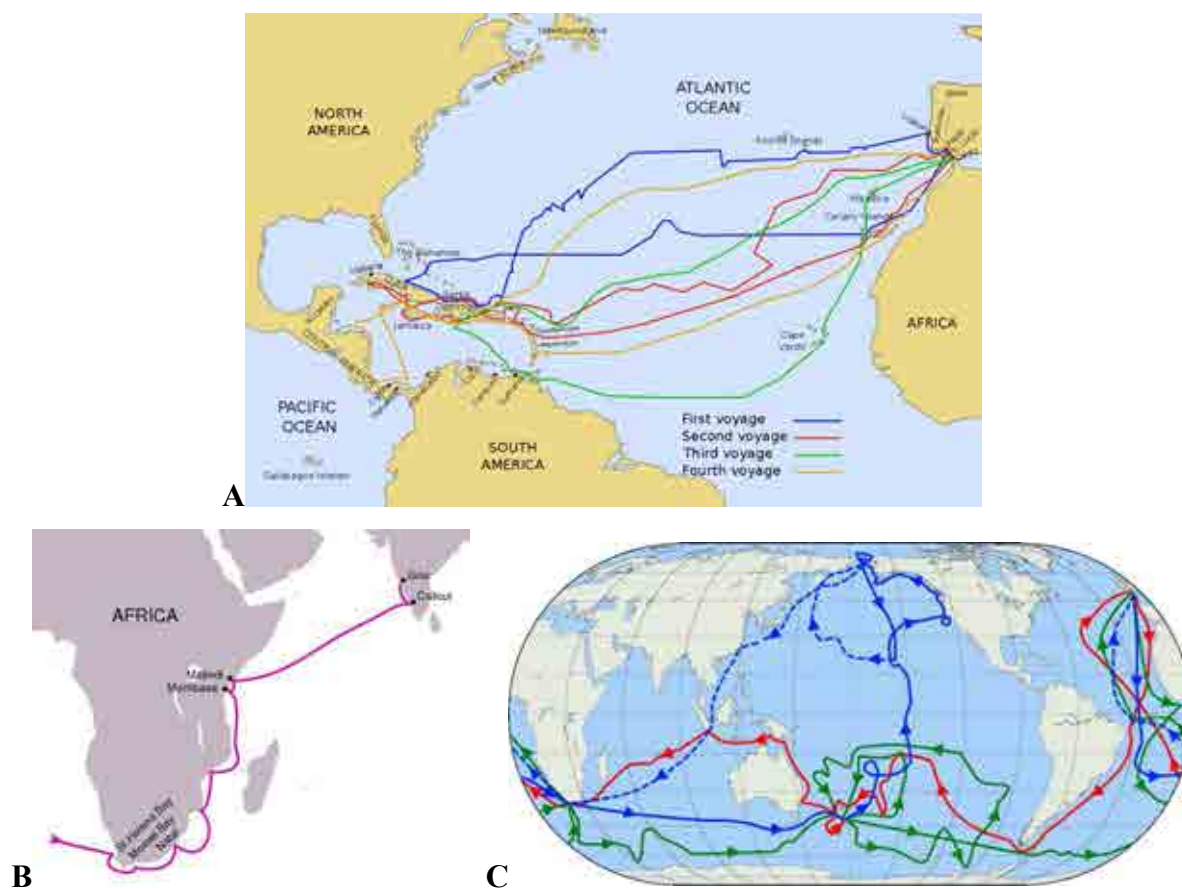
¹¹ Smery objavných plavieb sledovali zemepisné rovnobežky alebo pobrežia kontinentov.

¹² *Vasco da Gama* (* medzi rokmi 1460 a 1469, Sines, Portugalsko - † 24. december 1524, Kóčín (Cochin), India) bol portugalský námorník a objaviteľ, jeden z najvýznamnejších v dobe zámorských objavov.

¹³ *James Cook* (* 27. október 1728, Marton, Spojené kráľovstvo - † 14. február 1779, Havaj) bol mimoriadne významný námorný objaviteľ a výskumník 18. stor.

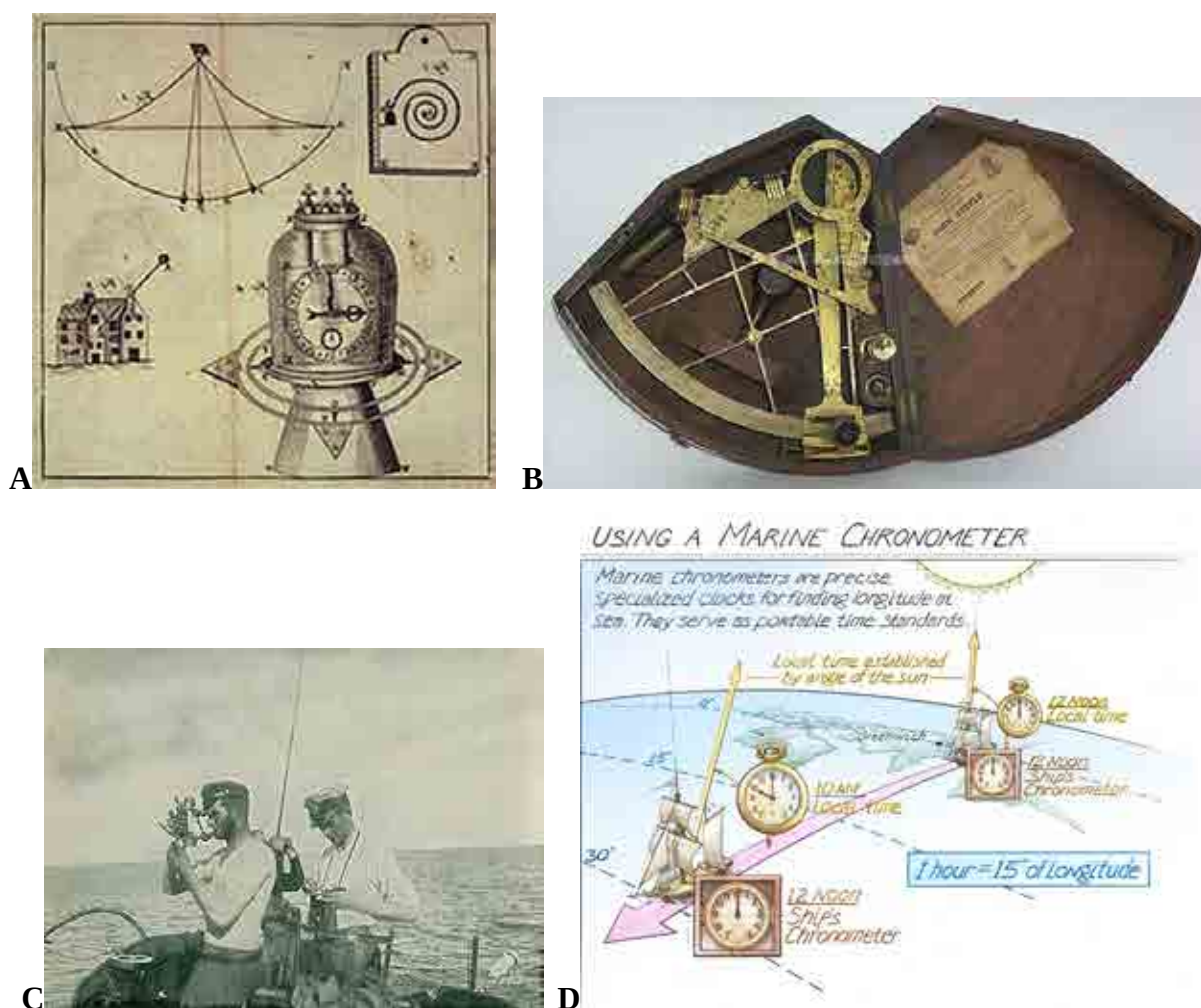


Obr. 1.5: Stredoveké lodné kompasy: originál z konca 17. stor. (A); retromodely podľa originálov zo 16. až 17. stor. (B-D).



Obr. 1.6: Objavné plavby: Krištof Kolumbus (A); Vasco de Gama (B); James Cook (C), prvá plavba je vyznačená červenou, druhá zelenou a tretia modrou farbou).

Určitou pokrokovou pomôckou v astronomickej navigácii a lokalizácii na mori bolo vynájdenie námorného *chronometra* a *sextanta* (obr. 1.7). *Chronometer* sú veľmi presné prenosné hodiny. Prvý exemplár tohto prístroja pre námorné plavby vyvinul anglický hodinár *John Harrison*¹⁴ v roku 1761. Námorný chronometer bol podstatnou zložkou prístrojovej navigačnej výbavy, pretrval 250 rokov v námorníctve a neskôr aj v leteckej navigácii. V druhej polovici 20. stor. ho vytlačilo používanie satelitnej navigácie. *Sextant* je merací prístroj určený na meranie uhla elevácie nebeského objektu nad horizontom alebo uhla medzi zámermi dvoch bodov, resp. objektov. Sextant vyvinul *John Campbell*¹⁵ modifikáciou oktantu v roku 1757. Sextant pre praktické použitie na astronomickú navigáciu na mori po prvýkrát skonštruoval *John Bird*¹⁶ v roku 1759.



Obr. 1.7: Chronometer - historický náčrt zo začiatku 18. stor. (A); sextant z 18. stor. - britský sextant v McCord Múzeu, Montreal, 1756-1772 (B); ukážka používania sextantu na mori - historická fotografia zo začiatku 19. stor. (C); princíp lokalizácie a navigácie lode pomocou chronometra (D).

¹⁴ *John Harrison* (1693 - 1776) bol sebestačný anglický tesár a hodinár, ktorý vynášiel morský chronometer, dlho vyhľadávané zariadenie na riešenie problému výpočtu zemepisnej dĺžky na mori.

¹⁵ Viceadmirál *John Campbell* (1720-1790) sa narodil vo farnosti Kirkbean, v blízkosti Dumfries, Kirkcudbrightshire, Škótsko. Campbell bol britský námorný dôstojník, navigačný expert a koloniálny guvernér.

¹⁶ *John Bird* (1709-1776), výrobca matematických nástrojov, sa narodil v Bishop Auckland. Pracoval v Londýne pre Jonathana Sissona a do roku 1745 mal vlastné podnikanie na pláži. Bird bol poverený, aby vytvoril mosadzný kvadrant 8 stôp pre Kráľovskú observatóriu v Greenwichi, kde sa dodnes zachováva. Čoskoro potom boli vyrobené duplikáty pre Francúzsko, Španielsko a Rusko.

V stredovekom námorníctve významnou a dlho používanou pomôckou doplňujúcou navigáciu bolo jednoduché meranie rýchlosti pohybu lode. V 16. stor. meranie rýchlosti metódou tzv. *chip log* bolo založené na primitívnom meraní rýchlosti pohybu lode pomocou značenia na lane (obr. 1.8). Odtiaľ pochádza pre námorníctvo zaužívaný výraz *námorný uzol*¹⁷. Stále však prevládala zručnosť v odhade rýchlosti nad nejakým solídnym a presným meraním.



Obr. 1.8: Lano na meranie rýchlosti s naviazanou doskou (log).

1.2.2 Nultý poludník – prelom v lokalizácii a navigácii

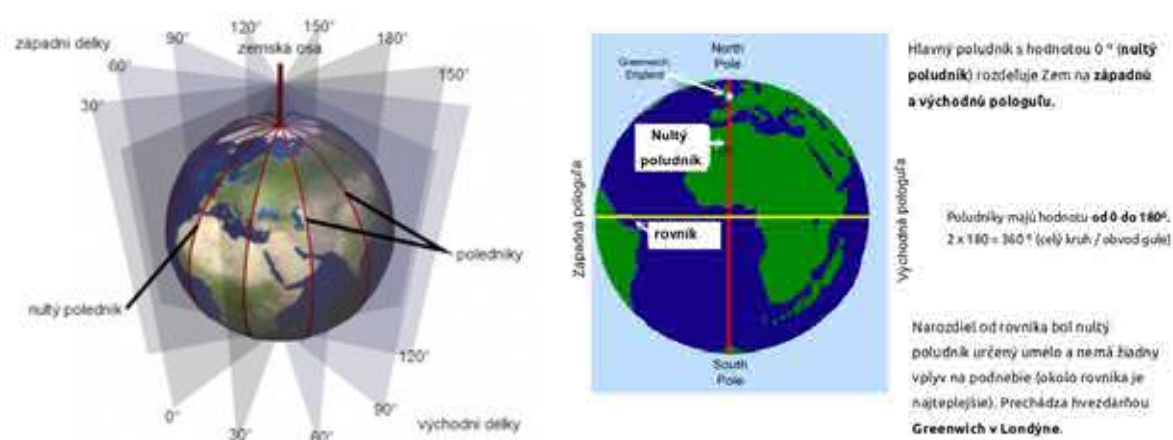
Významným medzníkom v možnostiach lokalizácie a navigácie tzv. výpočtom na mori, a nielen na mori, bol rok 1884, kedy bol celosvetovo dohodnutý jednotný nultý poludník (meridián) - *Greenwichský poludník*. Royal Observatory v Greenwichi (Kráľovské observatórium, Greenwich) je anglické národné observatórium, umiestené v londýnskom Greenwichi (zemepisná dĺžka λ : $0^{\circ}0'0''$; zemepisná šírka φ : $+51^{\circ}28,6'$; nadmorská výška H : 47 m) (obr. 1.9).

Pôvodne bolo Kráľovské observatórium založené roku 1675 v Greenwichi pri Londýne a podľa medzinárodnej dohody z roku 1884 ním prechádzal nultý poludník (obr. 1.10). Pre zlé pozorovacie podmienky observatórium roku 1957 preložili do zámku Herstmonceux pri Hailshame v Sussexe (λ : $+0^{\circ}20,3'$; φ : $+50^{\circ}52,3'$; H : 32 m), ale poloha nultého poludníka ostala nezmenená a zrušené observatórium sa premenilo na múzeum (Old Royal Greenwich Observatory). V roku 1990 sa observatórium presunulo do Cambridge, kde bolo v roku 1998 zavreté. V súčasnosti je observatórium v Greenwichi obľúbenou turistickou destináciou a atrakciou.

¹⁷ Námorný uzol alebo len uzol (značka *kt* alebo *kn* z angl. *knot*) je jednotka rýchlosti používaná v námorníctve, letectve a meteorológii. Jeden námorný uzol je definovaný ako rýchlosť jednej námornej míle za hodinu ($1 \text{ kt} = 1 \text{ NM.h}^{-1}$; prevod: $1 \text{ kt} = 1,852 \text{ km.h}^{-1}$, $1 \text{ kt} \approx 0,514 \text{ m.s}^{-1}$).



Obr. 1.9: Greenwichské observatórium v Londýne: súčasnosť (A); dobová kresba z roku 1710 (B); vyznačenie nultého poludníka (C).



Obr. 1.10: Znázornenie poludníkov a nultého (Greenwichského) poludníka.

Z histórie nultého poludníka

Nultých poludníkov bolo v minulosti niekoľko. V rokoch 1634 až 1884 bol napr. svetovým nultým poludníkom „*Ferrský poludník*“, ktorý viedol cez západný mys ostrova Ferro (El Hierro) v skupine Kanárskych ostrovov v Atlantiku (obr. 1.11). S ostrovom El Hierro úzko súvisia geografia, geodézia a aj niektoré ďalšie geo-vedy, napr. geoinformatika. V dávnych dobách boli Kanárske ostrovy považované za západný koniec obývatel'ného sveta. Grécky geograf *Klaudios Ptolemaios*¹⁸ začal ako prvý počítať zemepisné dĺžky od poludníka prechádzajúceho týmto ostrovom.



Obr. 1.11: Ostrov Ferro (El Hierro) v skupine Kanárskych ostrovov v Atlantiku, ktorým prechádzal nultý poludník (1634-1884).

Francúzsky kráľ *Eudovít XIII.*¹⁹ v roku 1634 ostrov Ferro (El Hierro) nastavil ako nultý poludník. Údaj „od ostrova Ferro“ sa nachádza napr. na starších rakúskych mapách. Takzvaný Ferrský poludník sa používal až do roku 1884, kedy bol za nultý poludník vyhlásený poludník prechádzajúci Greenwichom v Londýne. Až v roku 1884 na konferencii vo Washingtone sa Greenwichský poludník stal svetovo akceptovaným základom moderných máp a dohodou bol potvrdený v roku 1911. Nesúhlasne sa k tejto dohode stavalo napr. aj Francúzsko, ktoré si osvojilo univerzálny čas až v roku 1978.

¹⁸ *Klaudios Ptolemaios* (v gréčtine: Κλαύδιος Πτολεμαῖος; * asi 85 – † asi 165) bol grécky geograf, astronóm a astrológ, ktorý pravdepodobne žil a pracoval v egyptskej Alexandrii.

¹⁹ *Eudovít XIII.* (1601-1643) bol francúzsky a navarrský kráľ od roku 1610 do roku 1643.

Nultý poludník v Mekke?

Moslimskí učenici sú presvedčení, že nultý poludník by mal prechádzať Mekkou, ich svätým miestom. Podľa nich je práve Mekka stredom sveta a Greenwichský poludník je im len nanútený západným svetom. V Mekke sa postavili najväčšie hodiny na svete²⁰ (obr. 1.12), čo mnohí moslimovia považujú za dostatočný dôvod na to, aby sa nultý poludník presťahoval z Londýna do arabského sveta. I keď sa asi nedočkajú zrealizovania svojej predstavy, prvenstvo v najväčších hodinách na svete im patrí.



Obr. 1.12: Najväčšie hodiny na svete na veži hotelu Abraj Al-Bait Towers v Mekke (Saudská Arábia).

²⁰ Hodiny sa nachádzajú na každej zo štyroch strán jednej zo siedmich veží hotelu Abraj Al-Bait Towers, pričom ich rozmery sú 43 krát 43 metrov. Vrchná strana hodín sa nachádza vo výške 530 metrov, čím sú zároveň aj najvyššie postavenými hodinami na svete. Okraje hodín, ktoré je vidieť z každej časti mesta, zdobí viac ako 90 miliónov kusov farebného mozaikového skla.

1.3 RÁDIOVÁ LOKALIZÁCIA A NAVIGÁCIA

1.3.1 História a základné princípy rádiovej lokalizácie a navigácie

Rádiová lokalizácia a navigácia (rádiolokalizácia a rádionavigácia) je založená na detekcii rádiových vln. Meranými fyzikálnymi veličinami je absolútna doba šírenia rádiovkej vlny vyslanej zo zdroja k detektoru, alebo rozdiel doby šírenia minimálne troch rôznych rádiových vln, ktoré pochádzajú z aspoň troch zdrojov týchto vln spárovaných do dvoch dvojíc. Taktiež sa využíva meranie smeru príchodu rádiových vln zo známych vysielateľov, prípadne sa využíva meranie založené na *Dopplerovom jave* (tzv. *Dopplerovské meranie*)²¹. V prípade, že vysielateľ rádiových vln je totožný s prijímačom, potom sa jedná o aktívny systém, ktorý pracuje s vlastným zdrojom rádiových vln.

Prvým krokom v rádiovej lokalizácii a navigácii bol objav rádiových vln v roku 1887, s ktorými experimentoval *Heinrich Hertz*²². V roku 1904 nemecké námorné lode začínajú ako prvé na svete používať rádiové vlny ako doplnkový systém k vtedajším lokalizačným a navigačným systémom. Systém bol založený na detekcii odrazených rádiových vln a slúžil na detekciu kolíznych kurzov plavidiel. Dosah systému boli 3 km.

V roku 1930 bol v Nemecku vybudovaný prvý rádiolokačný systém s názvom Lorenz. Systém slúžil pre lokalizáciu a navigáciu lietadiel, predovšetkým na ich pristávanie v noci alebo za zlého počasia. Systém Lorenz bol neskôr zdokonalený tak, aby mal ďaleký dosah a mohol pomáhať navigovať diaľkové bombardéry. V priebehu druhej svetovej vojny sa rozvíjali radarové RDRS (z angl. *Radio Detection and Ranging Systems*, slov. *Systém na detekciu a meranie rádiových vln*) (obr. 1.13). Radarová technológia sa rozšírila ako prostriedok detekcie nielen lietadiel, ale používala sa i pre detekciu polohy a navigáciu lodí a ponoriek.

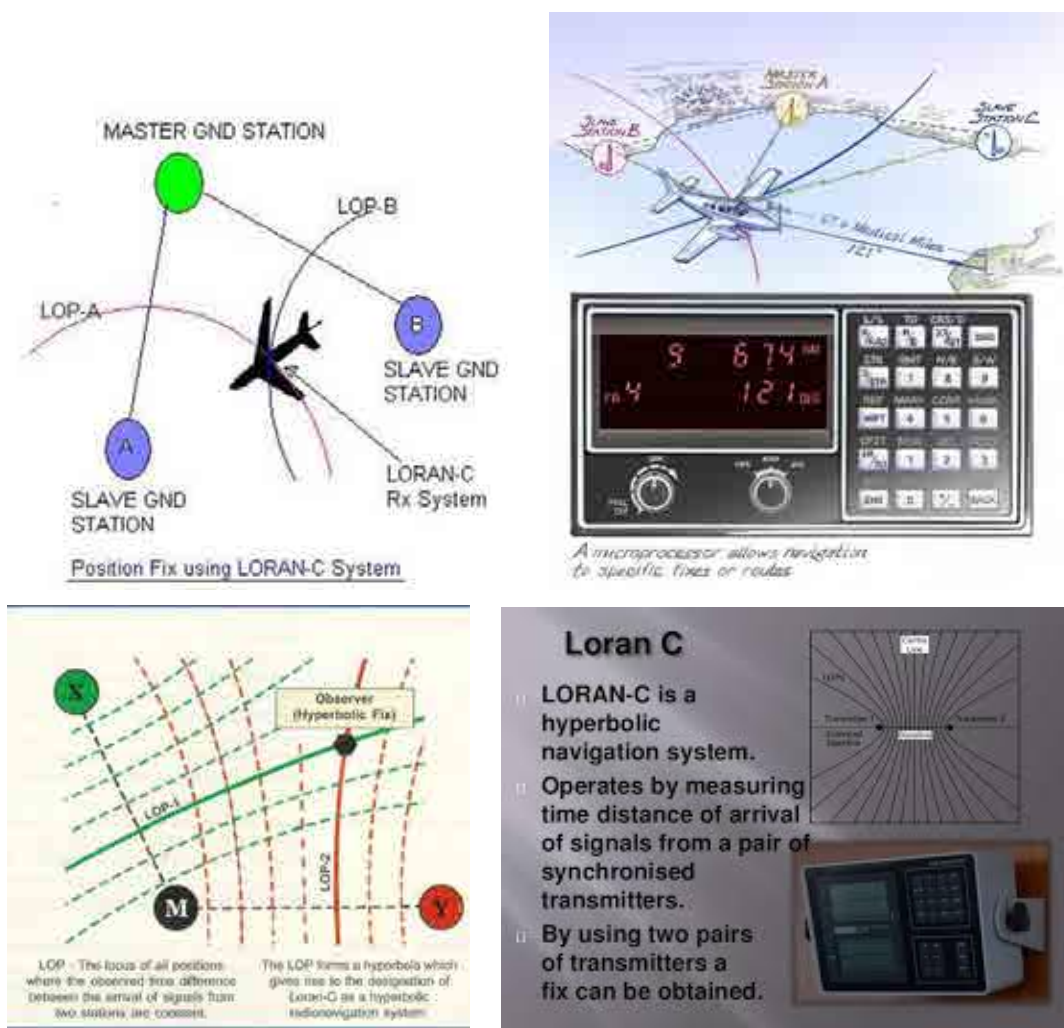


Obr. 1.13: Ukážka radarov.

²¹ *Dopplerov jav* je zmena vlnovej dĺžky (a teda frekvencie) elektromagnetických alebo akustických vln vyvolaná relatívnym pohybom zdroja a pozorovateľa. Názov získal podľa rakúskeho fyzika *Christiana Johanna Dopplera*, ktorý jav opísal v roku 1842 v Prahe. *Christian Johann Doppler* (* 29. november 1803, Salzburg, Rakúsko – † 17. marec 1853, Benátky, Taliansko) bol rakúsky fyzik.

²² *Heinrich Rudolf Hertz* (* 22. február 1857 – † 1. január 1894) bol nemecký fyzik a mechanik, podľa ktorého je pomenovaná fyzikálna jednotka frekvencie *hertz*, ktorá však nie je základnou jednotkou sústavy SI. Bol prvým, kto experimentálne dokázal existenciu elektromagnetického žiarenia vytvorením prístroja vysielajúcim rádiové vlny na frekvencii *UHF* (z angl. *Ultra High Frequency*; slov. *ultra krátke vlny*).

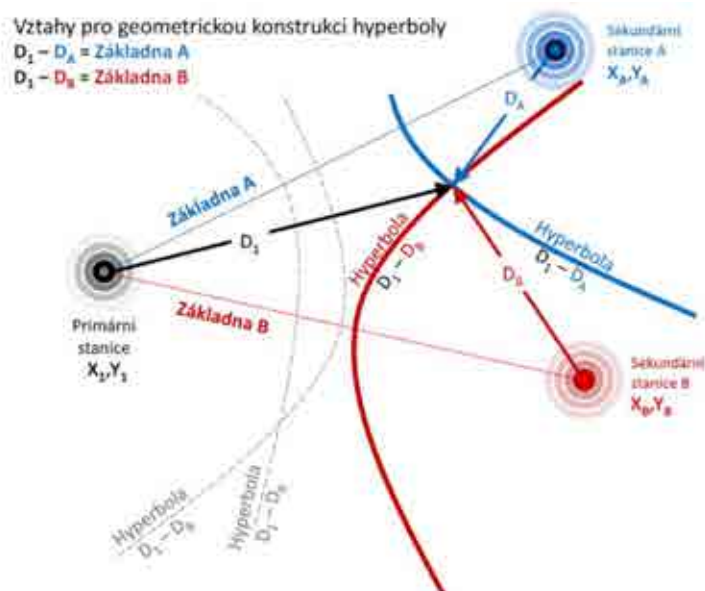
V priebehu druhej svetovej vojny v rokoch 1940 až 1943 začali USA (z angl. *United States of America*, slov. *Spojené štáty americké*) budovať svoj pozemný rádionavigačný systém s názvom *LORAN* (z angl. *Long Range Navigation*, slov. *Navigácia na dlhé vzdialenosti*). Princíp merania, ktorý sa používal v systéme *LORAN*, resp. v jeho dokonalejšej verzii *LORAN-C*, je multilaterácia (ďal'komerná metóda rádiového nepriameho merania polohy) (obr. 1.14, angl.). *LORAN* je pozemný rádiový navigačný systém určený predovšetkým pre leteckú a námornú navigáciu.



Obr. 1.14: Princíp činnosti a navigácie LORAN-C pre letectvo.

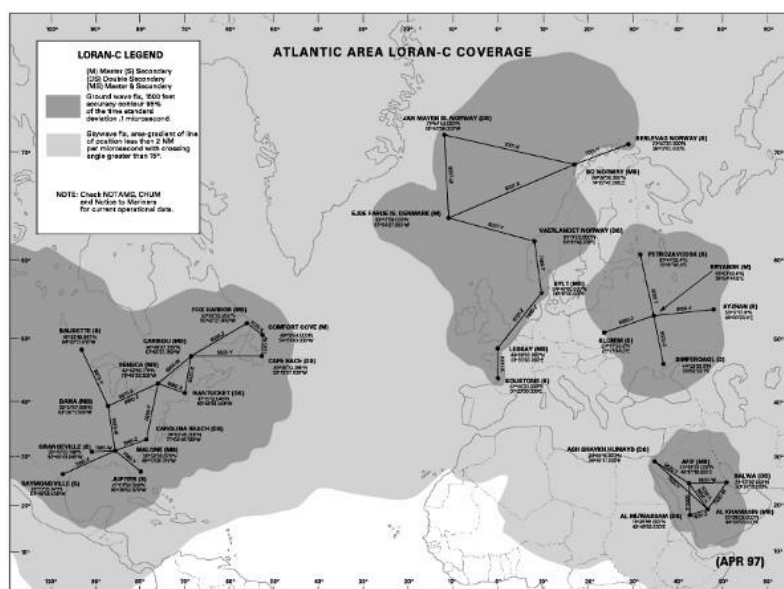
Systém *LORAN* umožňuje určiť polohu a rýchlosť dopravného prostriedku pomocou prijímania nízko-frekvenčných signálov zo synchronizovaných pozemných vysielačov, a preto patrí medzi systémy hyperbolickej navigácie. Hyperbolická navigácia je v podstate multilaterácia, v ktorej určenie polohy prijímača rádiových vln je na základe merania rozdielov časového oneskorenia príjmu signálov z minimálne troch synchronizovaných vysielačov o známej polohe (obr. 1.15, čes.). Princíp hyperbolickej navigácie je taktiež nazývaný časomerne hyperbolickou metódou, ktorá je označovaná skratkou *TDOA* (z angl. *Time Difference Of Arrival*, slov. *časový rozdiel príchodu*). Ak je známa nemenná vzdialenosť medzi dvoma vysielačmi, je možné použiť nameraný rozdiel oneskorenia v

príjme signálov v staniciach v páre ku konštrukcii hyperboly. Ta spája všetky miesta, v ktorých je teoreticky možné namerať medzi párom vysielateľov hodnotu rozdielu oneskorenia príjmu rádiových signálov.



Obr. 1.15: Princíp hyperbolickej navigácie (časomerne hyperbolická metóda).

LORAN dovoľoval užívateľovi určovať svoju polohu a rýchlosť pohybu v dosahu až 1 200 mi²³ (1 930 km) od staníc reťazca. *LORAN-C* umožňoval určenie polohy s chybou 185 až 463 m (obr. 1.16, angl.).



Obr. 1.16: Pokrytie atlantickej a pacifickej oblasti signálmi systému LORAN-C.

²³ mi = míl'a

Systém *LORAN* postupne prešiel vývojom a modernizáciou a bol využívaný USA, Kanadou, Japonskom a mnohými štátmi Európy. Systém úzko spolupracoval s ruským systémom *Čajka* (rus. *Чайка*). V súčasnosti prebieha nad budúcnosťou tohto systému diskusia v súvislosti s masovým rozšírením satelitných navigačných systémov (napr. *NAVSTAR GPS*, resp. *GNSS*). *LORAN-C*, variant systému *LORAN*, bol dlhú dobu považovaný v komunite užívateľov *NAVSTAR GPS* za vhodný doplnkový systém k systému *NAVSTAR GPS*, ktorý bol vybudovaný o viac než 40 rokov neskôr. Prevádzka systému *LORAN-C* bola ukončená 8. februára 2010 o 20:00 UTC²⁴.

1.3.2 História kozmickej lokalizácie a navigácie

Počiatky kozmickej lokalizácie a navigácie môžeme datovať vypustením prvého satelitu (umelej družice Zeme) v roku 1957. ZSSR²⁵ vypustil do vesmíru na svoju obežnú dráhu satelit pod názvom *Sputnik-1* (obr. 1.17). *Sputnik-1* (rus. *Спутник-1*, tiež *Satelit-1*, prezývaný aj *ПЧ-1*, t.j. *Простейший Спутник-1* alebo *Elementárny satelit-1*) na obežnú dráhu do vesmíru vyniesla 4. októbra 1957 nosná raketa *R-7* konštruktéra *Sergeja Korol'ova*²⁶, ktorá štartovala o 19:28 UTC z kozmodrómu *Bajkonur*²⁷ v Kazachstane (obr. 1.18).



Obr. 1.17: Sputnik-1.

²⁴ *Koordinovaný svetový čas* (z angl. *Coordinated Universal Time*) (*UTC*) je časový štandard založený na Medzinárodnom atómovom čase s priestupnou sekundou, ktorá sa aplikuje nepravidelne, aby sa dosiahla synchronizácia so spomaľujúcou sa rotáciou Zeme. Niekedy sa nazýva aj ako *Zulu time*, označovaný písmenom *Z* za časovým údajom. *UTC* je základ systému občianskeho času, jednotlivé časové pásma sa definujú svojimi odchýlkami od *UTC*. *UTC* je ako základ systému merania času nástupcom *GMT* (z angl. *Greenwich Mean Time*, slov. *Greenwichský stredný čas*) a v neformálnom vyjadrovaní sa s ním niekedy zamieňa. Na rozdiel od *GMT*, ktorý udáva čas platný v časovom pásme základného poludníka a ktorý sa zakladá na rotácii Zeme, sa *UTC* zakladá na atómových hodinách, tzn. od rotácie Zeme nezávisí.

²⁵ Sovietsky zväz, dlhý tvar Zväz sovietskych socialistických republík (skratka ZSSR; rus. Союз Советских Социалистических Республик) bol federatívny socialistický zväzový štát vo východnej Európe a severnej časti Ázie existujúci v rozmedzí rokov 1922 až 1991. Rozlohou 22,4 milióna km² bol rozlohou najväčším štátom sveta. Jeho hlavným mestom bola Moskva. Po rozpade ZSSR vznikla Ruská federácia (RF) a ďalšie samostatné republiky.

²⁶ *Sergej Pavlovič Korol'ov* (* 12. január 1907, Žitomir – † 14. január 1966, Moskva) bol sovietsky raketový konštruktér, v rokoch 1946 až 1966 počas vesmírnych pretekov medzi USA a ZSSR bol vedúcim sovietskeho raketového programu. Na rozdiel od svojho náprotivku v USA, Wernhera von Brauna, bola jeho kľúčová úloha v sovietskom vesmírnom programe utajovaná až do jeho smrti. Počas práce na programe bol známy len ako „hlavný konštruktér“.

²⁷ Kozmodróm *Bajkonur* (rus. Космодром Байконур) je hlavný ruský kozmodróm, používaný od začiatku kozmickej éry. *Bajkonur* (pôvodný názov *Taškent-90*, potom *Tura-Tam*, neskôr *Leninskije*, ešte neskôr až do 20. decembra 1995 *Leninsk*) je uzavreté mesto nachádzajúce sa pri kozmodróme *Bajkonur*, na brehu rieky *Syrdarja* v Kazachstane. Obýva ho najmä obsluha kozmodrómu a ich rodiny. Počet obyvateľov v roku 2008 bol 59 452. Mesto je prenajaté a spravované Ruskom do roku 2050. Tvar prenajatého územia je elipsa s kozmodrómom v strede; z východu na západ meria 90 km a zo severu na juh 85 km.



Obr. 1.18: Lokalizácia Bajkonuru v dnešnom Kazachstane (v strede a vľavo dole); mapa dnešnej Ruskej federácie (vľavo hore); štartovací komplex pre rakety Sojuz (vpravo hore); v uliciach mesta Bajkonur (vpravo dole).

Satelit *Sputnik-1* bol aktívny do 8. januára 1958. Priemer mal 58 cm a hmotnosť 83 kg. Známe boli parametre obežnej dráhy satelitu (perigeum²⁸: 215 km; apogeum²⁹: 939 km; sklon: 65,1°; excentricita: 0,05201; doba obehu: 96,2 minút; rýchlosť: 7,8 km.s⁻¹). Na satelite bol umiestnený vysielač, ktorý v pásmach 20,005 a 40,002 MHz vysielať pípavý signál. *Sputnik-1* sa stal symbolom začiatku kozmickej éry.

Prvé seriózne vedecké výskumy v satelitnej lokalizácii a navigácii na základe počiatkoch ruských satelitov boli realizované na Johns Hopkins University v Applied Physics Laboratory v meste Baltimor v štáte Maryland v USA.

Prvé experimenty s rádiovými signálmi satelitov *Sputnik* mali dať odpoveď na otázky:

1. *Či je možné Dopplerovským meraním signálov satelitov Sputnik, ktoré bolo realizované z niekoľkých pozemných staníc, určiť presnou polohu satelitu?*
2. *Je možné inverzne (späťne) určiť polohu pozemnej stanice na základe niekoľkých Dopplerovských meraní, keď sú známe parametre obežných dráh a signálov satelitov?*

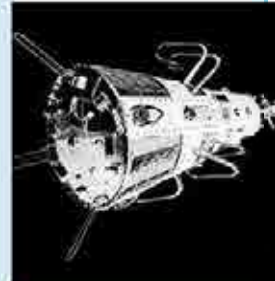
Odpoveď na druhú otázku poskytovala prvú myšlienku pre základ lokalizácie a navigácie na Zemi zo signálov zo satelitov, t.j. satelitnej lokalizácie a navigácie.

Tab. 1.1 popisne aj vizuálne prezentuje dôležité míľniky v začiatkoch prieskumu vesmíru a kozmonutiky bývalého Sovietskeho zväzu (ZSSR) v 20. stor. najmä v prepojení na satelitné techniky.

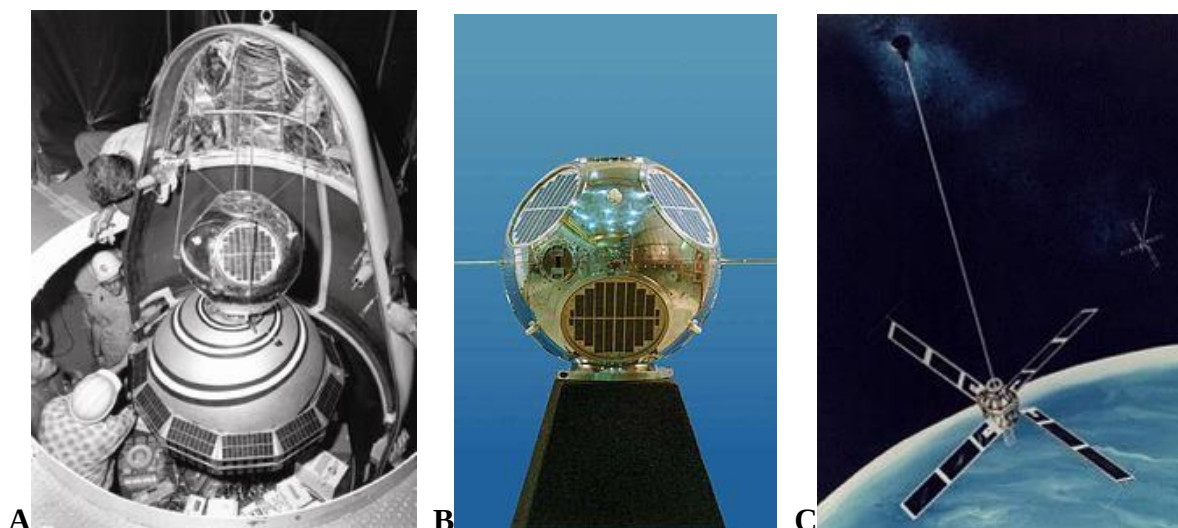
²⁸ *Perigeum*, tiež *perihélium* (iné názvy: *príslnie*, *perihel*) je bod na dráhe kozmického telesa okolo Slnka (v prípade satelitu je to Zem), v ktorom je teleso najbližšie k Slnku (Zemi).

²⁹ *Apogeum*, tiež *afélium* (iné názvy: *apohélium*, *odslnie*, *afel*) je najvzdialenejšie miesto od Slnka (v prípade satelitu je to Zem), ktorým prechádza teleso pohybujúce sa okolo Slnka (Zeme) po elipse (orbite).

Tab. 1.1: Dôležité míľniky v začiatkoch kozmonautiky bývalého Sovietskeho zväzu (ZSSR).

Dôležité míľniky v sovietskej astronautike	
1. Skupina pre štúdium prúdového pohonu Počas tridsiatych rokov 20. stor. uskutočnil Sovietsky zväz veľké a dobre organizované úsilie o štúdium rakiet a raketových motorov.	
2. Raketa R-7 Snáď najdôležitejšia raketa v histórii prieskumu vesmíru bola R-7. Pôvodne navrhnutý ako ICBM, rýchlo sa stal „koňom“ sovietskeho vesmírneho programu. Moderná raketa Soyuz je priamym potomkom R-7, ktorý sa používa ešte viac ako 50 rokov pre 1 600 kozmických misií.	
3. Sputnik-1 Prvý tzv. umelý zemský satelit zachytil svetovú predstavivosť. Sputnik-1 bol jednoduchý užitočný náklad, ktorý narazil na dokončenie, aby porazil americký ohlásený zámer spustiť satelit. Zároveň dramaticky demonštrovalo, že Rusko by mohlo spustiť raketu na balistickú trajektóriu na akýkoľvek bod planéty.	
4. Sputnik-2 Druhý tzv. umelý zemský satelit je známy z histórie počiatkoch kozmickej éry, pretože ako prvý satelit po svojej misii vo vesmíre úspešne pristál na Zemi so živým psom Laika. Obsahoval tiež prvé vedecké nástroje na meranie vesmírneho žiarenia. Sovietski vedci videli prvé dôkazy o radiačnom páse Zeme, ale neuvedomili si jeho význam a neuverejnili ich výsledky.	
5. Sputnik-3 Sputnik-3 bol plánovaný ako prvý satelit blížiaci sa tvarom dnešným satelitom. Mal kód s názvom Object-D. Bolo to „masívne obežné fyzikálne laboratórium“, ktoré obsahovalo 12 experimentov na meranie podmienok vo vesmíre.	

USA v rádiovkej, už satelitnej lokalizácii a navigácii v roku 1964 uvedli do prevádzky systém *TRANSIT*³⁰ (obr. 1.19). Bol historický prvý funkčný satelitný polohový a navigačný systém určený pre americkú námornú navigáciu (*US Navy*³¹), prevádzkovaný v rokoch 1964 až 1996 vojenským námorníctvom USA (*US Navy*, alebo *USN*), s ktorého pomocou bolo možné určiť polohu s presnosťou prvých stoviek metrov a presný čas kdekoľvek na Zemi.



Obr. 1.19: TRANSIT 2A so satelitom GRAB 1 na vrchole počas prípravy na štartovanie (A); model satelitu GRAB v Národnom kryptologickom múzeu, USA (B); operačný satelit TRANSITu (C).

Systém *TRANSIT*, niekedy taktiež *NAVSAT* (z angl. *NAVigation Satellite System*, slov. *Navigačný satelitný systém Navy*, alebo ináč tiež známy pod skratkou *NNSS* (z angl. *Navy Navigation Satellite System*), využíval Dopplerovské merania. Systém pozostával zo šiestich navigačných satelitov, ktoré vysielali navigačné signály na dvoch frekvenciách. Signály vysielané v dvoj-minutových intervaloch obsahovali *efemeridy*³² satelitov a vojenská dáta. Satelity boli viditeľné každých 35 až 120 min. Ponorka potrebovala sledovať satelit po dobu aspoň dvoch minút k tomu, aby mohla určiť svoju polohu. Presnosť určenia polohy sa z počiatočných 800 m zlepšila až na 5 m. Pokiaľ boli používané metódy spresňovania meraní, bolo možné dosiahnuť polohovú presnosť až 1 m. V roku 1967 bol *TRANSIT* sprístupnený aj pre potreby civilnej námornej dopravy. Prevádzka systému *TRANSIT* bola ukončená v roku 1996, rok po uvedení do systému *NAVSTAR GPS* do plnej prevádzky.

Nedostatky systému *TRANSIT*:

- Nedostatočná konštelácia kozmického segmentu.
- Použitie metódy Dopplerovských meraní pre určenie polohy prijímača.

³⁰ Systém *TRANSIT*, známy aj ako *NAVSAT* alebo *NNSS* (z angl. *Navy Navigation Satellite System*, slov. *Navigačný satelitný systém Navy*), bol prvý satelitný navigačný systém, ktorý sa mal prevádzkovo využívať. Tento systém bol primárne používaný americkým námorníctvom na poskytovanie presných informácií o polohe jeho balistických rakiet z ponoriek *Polaris* a používal sa aj ako navigačný systém pre námorné lode, ako aj pre hydrografické a geodetické prieskumy. Systém *TRANSIT* poskytoval nepretržitú navigačnú satelitnú službu od roku 1964 spočiatku pre ponorky *Polaris* a neskôr pre civilné použitie.

³¹ *United States Navy* (v slov. preklade z angl. „*Vojenské námorníctvo Spojených štátov*“ alebo „*Vojenské loďstvo Spojených štátov*“; skratka *USN*) je pobočka námornej vojenskej služby ozbrojených síl USA a je jednou zo siedmich uniformovaných služieb USA.

³² *Efemeridy* sú údaje o zdánlivej polohe pohyblivých astronomických objektov (Slnko, Mesiac, planéty, satelity) na oblohe (vesmíre) v určitom čase alebo časoch.

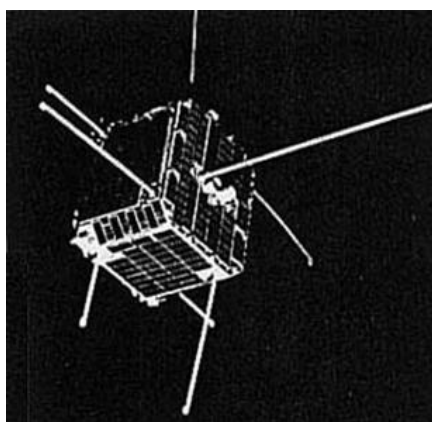
- Z dôvodu nízkeho počtu satelitov nebol ich signál dostupný neustále v priebehu celého dňa.
- Medzi príjmom navigačných signálov boli časové oneskorenia 35 až 120 min. v závislosti na aktuálnej polohe plavidla.
- Poloha bola určovaná len v 2D.
- Pri výpočte polohy bolo nutné robiť korekcie na vlastný pohyb plavidla, pretože vlastný pohyb plavidla spôsoboval taktiež zdanlivú zmenu frekvencie signálov.
- Z vyššie uvedených dôvodov systém *TRANSIT* nebol vhodný pre letectvo.

Sovietsky zväz o pár rokov po spustení amerického systému *TRANSIT* prišiel s projektom *Cyklon*, označovaný taktiež *Cikada-M*. Navigačný satelitný systém *Cyklon* bol v podstate sovietskou obdobou amerického systému *TRANSIT*. Jednalo sa o výlučne vojenský systém, vyhradený pre navigáciu ponorkových nosičov balistických rakiet. V rokoch 1967 až 1978 bolo na obežné dráhy vynesných 31 satelitov systému *Cyklon*. Tie umožňovali pomocou Dopplerovských meraní určenie polohy pre statické a pomaly pohybujúce sa plavidlá. V prípade pomaly pohybujúcich sa plavidiel boli nutné dlhodobé observácie (niekoľko desiatok minút) k určeniu dostatočne presnej polohy plavidla. Základňou vojenských ponoriek bol vybudovaný podzemný vojenský komplex (v súčasnosti múzeum) v zátok Balaklava na Kryme, kde sa opravovali a vyzbrojovali stredné dieselové ponorky využívajúce navigačný systém *Cyklon* (obr. 1.20, angl.).



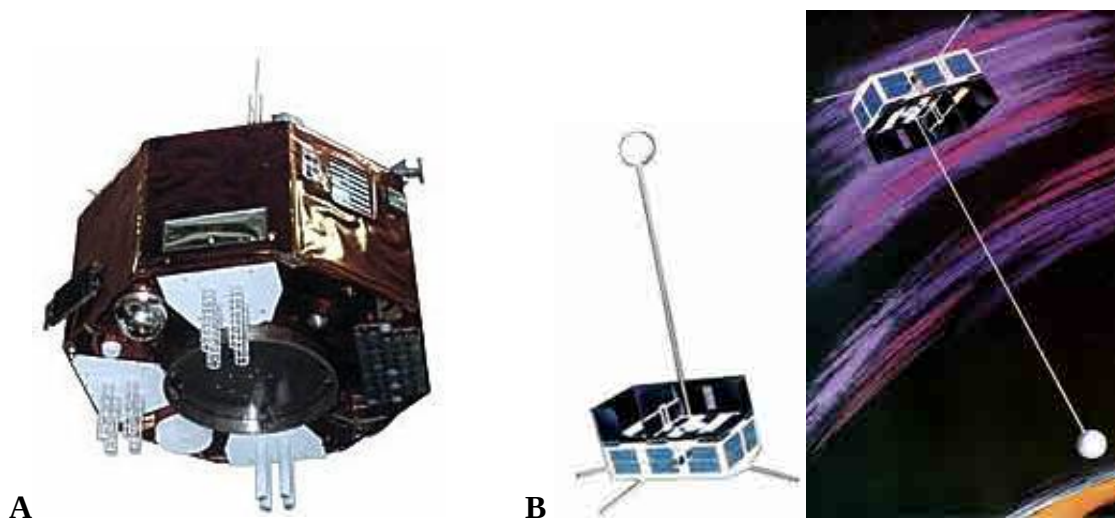
Obr. 1.20: Podzemný vojenský komplex v zátok Balaklava (Krym); umelcova vízia dokončenej základne (vľavo dole).

Prvým kľúčovým projektom, ktorý predchádzal NAVSTAR GPS, bol projekt SECOR (z angl. *SEquential Collation Of Range*, slov. *Sekvenčné zoradenie rozsahu*). Projekt bol realizovaný v priebehu rokov 1960 až 1970 americkou armádou. Cieľom projektu bolo uskutočniť presné geodetické meranie zemského povrchu, ktoré bude možné realizovať za akéhokoľvek počasia s použitím jedného satelitu (obr. 1.21). Zvláštnym predmetom záujmu boli predovšetkým ostrovy v Pacifiku. V rámci projektu boli vypustené dva satelity (v rokoch 1962 a 1969). Každý z dvoch satelitov systému SECOR bol zameraný z troch miest na zemskom povrchu, ktorých poloha bola geodeticky určená. Štvrté miesto s neznámou polohou bolo osadené rádiovým vysielačom. Z neho bol vyslaný signál k satelitu, ktorý ho vrátil späť. Vzdialenosť meraná zo satelitu k neznámemu miestu spoločne s polohou zameriavanou voči trom známym miestam poslúžila k výpočtu súradníc neznámeho miesta.



Obr. 1.21: Satelit systému SECOR.

Posledným projektom predchádzajúcim dnešný NAVSTAR GPS bol v roku 1964 projekt letectva a námorníctva USA s názvom TIMATION (z angl. *TIME/navigation*). Cieľom projektu bolo overiť nový koncept presného merania vzdialenosti diaľkomerným signálom zo satelitu na Zem (obr. 1.22). Koncept systému TIMATION bol založený na veľmi presnej časovej základni.



Obr. 1.22: Satelit TIMATION TS-1 (A); satelit TIMATION 2 (B).

Otázky a úlohy z kap. 1

K overeniu získaných vedomostí z obsahu kap. 1 zodpovedajte na nasledujúce otázky a riešte úlohy. Správne odpovede a riešenia nájdete na konci skrípt.

Otázky a úlohy:

1. Uľahčujú GNSS navigáciu a určenie priestorovej (3D) lokalizácie na zemskom povrchu?
2. Je technológia GNSS nástrojom pre priame alebo nepriame určenie polohy?
3. Bol v druhej polovici 20. stor. námorný chronometer (od roku 1737 bol podstatnou zložkou prístrojovej navigačnej výbavy 250 rokov v námorníctve a neskôr aj v leteckej navigácii) vytlačený z používania satelitnou alebo astronómickou navigáciou?
4. Nultý poludník prechádza cez Kráľovské observatórium v Greenwichi (Londýn) alebo cez západný mys ostrova Ferro (Hiero) v skupine Kanárskych ostrovov v Atlantiku?
5. Priradiť, čo k sebe patrí. Ktoré prostriedky sú používané a akou metódou navigácie ?
 - A. Kompas, mapa s orientačnými bodmi
 - B. Mapa, rýchlomer, kompas a stopky
 - C. GNSS prístroj, navigačný satelit
 - D. Sextant, hodiny, almanach, mapa
 - a) Navigácia výpočtom
 - b) Satelitná rádiová navigácia
 - c) Astronómická navigácia
 - d) Navigácia podľa magnetického poľa Zeme a orientačných bodov
6. Bol TRANSIT (niekedy taktiež NAVSAT) historicky prvý satelitný polohový systém prevádzkovaný v rokoch 1964 až 1996 vojenským námorníctvom USA, s ktorého pomocou bolo možné určiť polohu s presnosťou prvých stoviek metrov a presný čas kdekoľvek na Zemi?
7. Posledným projektom predchádzajúcim dnešný NAVSTAR GPS bol v roku 1964 projekt:
 - a) SECOR
 - b) TIMATION
 - c) Cyklon

2. GLOBÁLNE NAVIGAČNÉ SATELITNÉ SYSTÉMY

Do *GNSS* (Globálne navigačné satelitné systémy), ako to bolo už v úvode spomenuté, patria štyri navigačné satelitné systémy, t.j. v súčasnosti dobudované a plne funkčné systémy s celosvetovým (globálnym) dosahom, ktorými sú americký *NAVSTAR GPS*³³ (z angl. *NAVigation Signal for Timing And Ranging*, slov. *Navigačný signál pre časovanie a meranie*) a ruský *GLONASS* (rus. *GLObalnaja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistema*, slov. *Globálny navigačný satelitný systém*). K nim od decembra 2016 (15. decembra 2016) pribudol európsky (patriaci EÚ) navigačný satelitný systém *Galileo* s obmedzenou funkčnosťou³⁴. Dokončenie celého projektu *Galileo* s 30 satelitmi sa očakáva v roku 2019. Do *GNSS* bude patriť aj čínsky navigačný satelitný systém *Compass* (pôvodný *BeiDou-2*), ktorého využívanie ako globálny navigačný satelitný systém sa očakáva po jeho dobudovaní od roku 2020. Tab. 2.1 podáva ucelený prehľad *GNSS* s emblémami (znakmi) ich jednotlivých systémov.

Tab. 2.1: Prehľad *GNSS*.

<i>GNSS</i>			
<i>NAVSTAR GPS</i> (USA)	<i>GLONASS</i> (ZSSR, dnes RF ³⁵)	<i>Galileo</i> (EÚ)	<i>Compass</i> (Čína)
			

Éra *GNSS* teda začala niekedy začiatkom 70-tych rokov 20. stor. budovaním prvých globálnych satelitných systémov určených pre navigáciu a lokalizáciu na zemskom povrchu ni mimo neho, ktorými je *NAVSTAR GPS* a *GLONASS*. Éra *GNSS* pokračovala na prelome tisícročia začatím budovania ďalších dvoch systémov, európskeho *Galilea* a čínskeho *COMPASSu* (*BeiDou-2*)³⁶.

³³ Používa sa zjednotená forma skratky - *GPS*. *NAVSTAR* sa niekedy označuje za akronym názvu, ale sám autor projektu sa nad tým len usmieva. Táto časť názvu navigačného satelitného systému nemá žiadny význam. Bol použitý len preto, aby bolo vyhovené vysokému štátnemu úradníkovi na Ministerstve obrany USA, ktorý rozhodoval o pridelení financií na tento projekt a ktorý vyslovil nevôľu nad názvom *GPS*, t.j. krátky názov projektu (*GPS*) sa štátnemu úradníkovi videl príliš krátky a neadekvátny pridelenej enormne vysokej sume financií pridelenej ministerstvom na tento projekt.

³⁴ Z 30 satelitov vypustených na svoje obežné dráhy je zatiaľ 18 funkčných (15.12.2016).

³⁵ RF: Ruská federácia.

³⁶ *Compass*, tiež označovaný ako *BeiDou-2*, je projekt autonómnych *GNSS* Čínskej ľudovej republiky, ktorý je funkčný na území Číny, postupne taktiež v ázio-pacifickom regióne a po roku 2020 by mal byť dostupný na celom povrchu Zeme.

2.1 GPS - GLOBÁLNY POLOHOVÝ SYSTÉM

2.1.1 Z histórie GPS

Históriu satelitných systémov a tým aj NAVSTAR GPS (ďalej len skrátene GPS) môžeme začať datovať od začiatku 60-tych rokov 20. stor., keď memorandum Ministerstva obrany USA boli vzdušné sily poverené zlúčením pokusných programov, už spomínaného systému TIMATION (kap. 1.3.2) a tzv. programu 621B do jedného programu označeného ako prvá verzia GPS. Po vynájdení satelitov (umelých družíc Zeme) sa začalo uvažovať, či by sa nedali pomocou nich vyvinúť presnejšie navigačné systémy. Prvý takýto navigačný systém uviedli do prevádzky USA v 60-tych rokoch 20. stor. a bol ním taktiež už spomínaný TRANSIT (kap. 1.3.2). Koncom 60-tych rokov 20. stor. aj bývalý Sovietsky zväz (ZSSR) pod gesciou Ministerstva obrany ZSSR uviedol do prevádzky taktiež už prezentovaný navigačný satelitný systém Cyklon (kap. 1.3.2) a dodnes ešte stále používané ďalšie dva obdobné systémy, vojenský šesť-satelitný systém s názvom Parus (niekedy označovaný aj Cikada-M) a civilný štvor-satelitný s názvom Cikada.

Oba systémy, t.j. tzv. „prvý“ GPS a Cikada-M/Cikada mali v tom čase (začiatok 70-tych rokov 20. stor.) rovnaké nevýhody. Poskytovali len 2D súradnice, určenie polohy bolo s presnosťou 500 m pri prijímaní signálu len z jedného satelitu a systémy operovali s nepresným časovým signálom. Tieto navigačné systémy využívali Dopplerovské princípy, čo malo taktiež isté nevýhody najmä technického charakteru.

Po zlých skúsenostiach s Dopplerovskými systémami sa na začiatku 70-tych rokov USA (Ministerstvo obrany USA) rozhodli vybudovať nový presnejší navigačný satelitný systém, ktorý by umožňoval určenie 3D polohy v priestore spolu s presným časom a sprístupnil by tak satelitnú navigáciu aj letectvu³⁷. Od 17. decembra 1973 po súčasnosť riadi rozvoj programu GPS spoločná programová skupina JPO (z angl. *Joint Program Office*, slov. *Úrad pre spoločný program*), ktorá je súčasťou kozmického oddelenia veliteľstva systémov vzdušných síl USA. JPO je zložená zo zástupcov letectva, námorníctva, armády, námornej pechoty, pobrežnej stráže, obrannej kartografickej agentúry a zástupcov štátov NATO (z angl. *North Atlantic Treaty Organization*, slov. *Organizácia Severoatlantickej zmluvy*) a Austrálie.

Práce na budovaní „nového“ systému GPS boli rozdelené do dvoch častí:

1. Časť (rok 1973): Budovala sa najmä komunikačná infraštruktúra a riadiace strediská. Fírme Rockwell bola v roku 1980 pridelená objednávka na vývoj a výrobu 28 satelitov typu *Block II* (vyšší, technicky dokonalejší typ než *Block I*).
2. Časť (rok 1989): Prvý z 29 satelitov typu *Block II* bol vypustený v roku 1989. V rovnakom roku (1989) bol uzatvorený kontrakt s firmou General Electrics na rekonštrukciu a výrobu 20-tich ďalších, zdokonalených satelitov.

Do svojho prvého štádia IOC (z angl. *Initial Operational Capability*, slov. *počiatočná prevádzková spôsobilosť*) sa GPS dostal v roku 1993 vypustením v poradí už 35. satelitu. V celom systéme GPS vtedy pracovalo 21 navigačných a 3 záložné satelity. V roku 1994 vývoj GPS dosiahol štádia FOC (z angl. *Full Operational Capability*, slov. *plná operačná*

³⁷ Letectvo si vyžadovalo oveľa vyššiu presnosť a 3D polohu, než zaručovalo prvé GPS, ktoré bolo pôvodne vyvinuté pre vojenské námorníctvo USA.

funkčnosť), keď bolo v činnosti 24 satelitov. Tak je tomu dodnes. V tab. 2.2 (čes.) je uvedený stručný chronologický prehľad histórie vývoja GPS od roku 1973 po rok 1995.

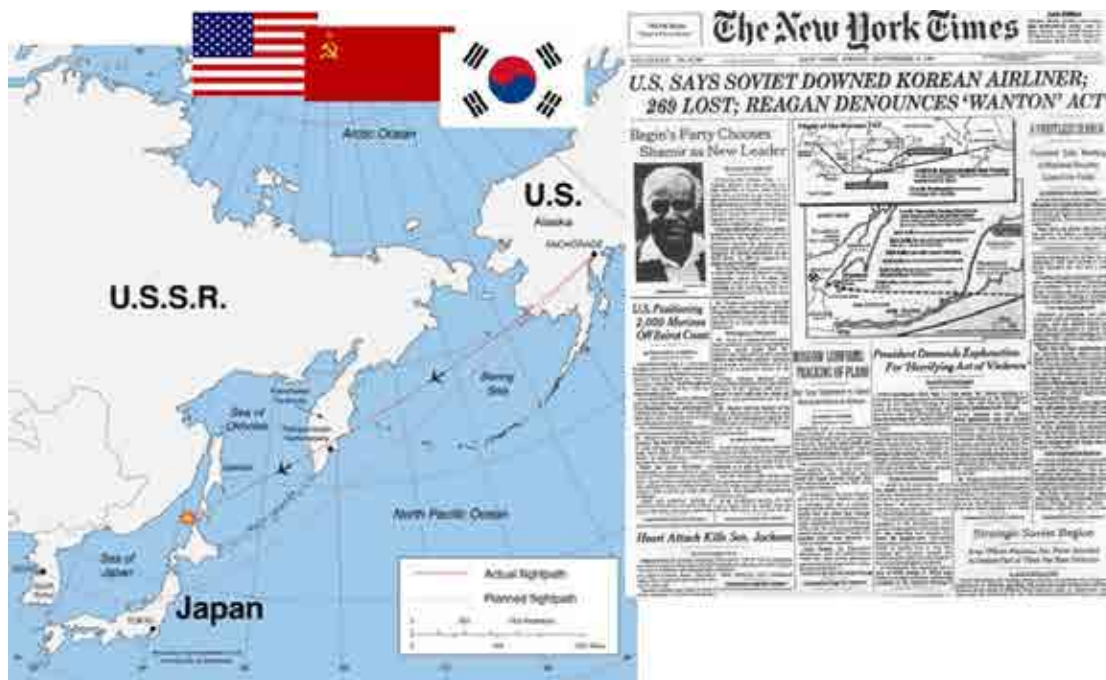
Tab. 2.2: Prehľad histórie GPS (1973-1995).

1973 prosince	JPO zahajuje projekt DNSS. (dnes známy ako GPS Navstar).
1974	První testovací družice NTS-1 a NTS-2.
1975	JPO pověřená dohledem nad vývojem fiducioho segmentu, kosmického segmentu a GPS přijímačů.
1978	Vypuštěná vývojová družice GPS Blok I.
1983	• DoD reviduje parametry SPS. • DoD doporučuje uvolnit SPS pro veřejnost. • SSSR sestřeluje civilní Korejské letadlo nad Sachalinem - prezident R. Regan odtajňuje systém GPS
1985	Poslední družice bloku I na orbitě.
1989	První družice z 29 družic bloku II na orbitě.
1991	• Aktivována selektivní dostupnost (SA). • Nasazení GPS v první válce v Iráku.
1993	• Dosažen IOC. • Schválení zpřístupnění GPS veřejnosti.
1994	• Dosažení FOC – 24 družic bloku II (U.S. Air Force, U.S. Coast Guard's). • Aktivován A-S.
1995	Oznámeno dosažení FOC.

Významným medzníkom v histórii GPS bol 1. január 1984, kedy systém bol uvoľnený aj pre civilných užívateľov. Čo predchádzalo sprístupneniu GPS pre civilných užívateľov? Let Korean Air 007 (skratka KAL 007 alebo KE 007) bol pravidelný civilný linkový let juhokórejskej spoločnosti Korean Air. 1. septembra 1983 sa v dôsledku chýb posádky odchytil z pravidelnej, resp. plánovanej trasy, vletel do sovietskeho vzdušného priestoru a bol zostrelený nad morom blízko Sachalinu stíhačkou Suchoj Su-15 sovietskej protivzdušnej obrany (obr. 2.1, angl.). Pri katastrofe zahynulo všetkých 269 osôb na palube. Sovietska strana pred zostrelením lietadla postupovala v zmysle medzinárodne dohodnutých postupov pri narušení vzdušného priestoru cudzím lietadlom. Posádka KAL 007 na žiadne výzvy sovietskej protivzdušnej obrany nereagovala, preto stíhačka Su-15 sovietskej protivzdušnej obrany v zmysle medzinárodných pravidiel lietadlo KAL 007 zostrelila. Juhokórejská vláda komentovala toto letecké nešťastie ako omyl, t.j. že lietadlo KAL 007 omylom zabľúdilo nad vtedy ešte sovietske, dnes ruské územie. Vtedajšia svetová tlač priniesla správu, že údajne pilotom lietadla KAL 007 zlyhalo klasické navigačné zariadenie a keby mali k dispozícii aj navigačný satelitný systém GPS, k zabľúdeniu lietadla by nedošlo. Základné dáta letu KAL 007 sú v tab. 2.3. V septembri 1983 oznámil vtedajší prezident USA *Ronald Reagan*³⁸

³⁸ *Ronald Wilson Reagan* (* 6. februára 1911 - † 5. júna 2004) bol 40. prezident USA (1981-1989) a 33. guvernér Kalifornie (1967-1975). Predtým, než vstúpil do politiky, pracoval ako herec a bol tiež predsedom hereckých odborov.

uvoľnenie dovtedy zámerne šifrovaných signálov satelitov *GPS* a tým aj sprístupnenie tohto vojenského navigačného satelitného systému pre civilné využitie s dátumom od 1. januára 1984, aby sa podobným leteckým „omylom“ predišlo.



Obr. 2.1: Plánovaná a skutočná dráha letu KAL 007; hektická správa o tragédii v The New York Times.

Tab. 2.3: Prehľad dát letu KAL 007.

Nehoda	
Dátum	1. september 1983
Charakteristika	zostrelenie letu
Hlavná príčina	chyba posádky (zlé nastavenie navigačného systému)
Miesto	blízko ostrova Moneron západne od Sachalinu, ZSSR
Súradnice	46°34'00"S 141°17'00"V Súradnice: 46°34'00"S 141°17'00"V (Mapa...)
Začiatok letu	Medzinárodné letisko Johna F. Kennedyho, New York, USA
Medzipristátie	Anchorage International Airport, Aljaška, USA
Cieľ letu	Gimpo International Airport, Soul, Kórejská republika
Lietadlo	
Model	Boeing 747-230B
Dopravca	Korean Air
Registrácia	HL7442
Ľahostroj	
Počet osôb na palube	269
Prežilo	0
Zranených	0
Mŕtvych	269 (všetci)
Lietadlo	zničené / zostrelené

USA urobili na základe tohto, na vtedajšiu dobu nesmierne tragického leteckého nešťastia aj ďalšie optrenia. V klasickej pozemnej radarovej lokalizácie lietadiel dodatočne predĺžili oblasť radarového sledovania z pôvodných 200 mi³⁹ na 1 200 mi od Anchorage (polostrov Aljaška). Na ostrove St. Paul⁴⁰ bol nainštalovaný sekundárny radar. V roku 1986 sa vtedajší ZSSR a USA dohodli na spoločnom systéme monitorovania leteckej prevádzky v oblasti severného Pacifiku.

2.1.2 Štruktúra, princíp činnosti, zásady a osobitosti GPS

V súčasnosti *GPS* je navigačný satelitný systém, ktorý v rámci *GNSS* spĺňa aj tie najnáročnejšie požiadavky užívateľov na presnosť v určení 3D polohy na zemskom povrchu i mimo neho. *GPS* je prioritnou súčasťou *GNSS*. O *GPS* v globále pojednáva veľké množstvo literatúry (knihy, monografie, učebné texty atď.). Z viacerých uvedme aspoň tie, ktoré sú úzko späté s obsahom týchto vysokoškolských skrípt. Sú to práce autorov: Betz, 2015; Dodel und Häupler, 2009; Gleason and Gebre-Egziabher, 2009; Hofmann-Vellenhof et al., 2008; Jeffrey, 2015; Jin et al., 2014; Kaplan a Hegarty, 2006; Leick et al., 2015; Mervart, 1994; Sedlák, 2003, 2012; Sedlák et al., 2009; Sedlák a Lošonczi, 2011; Seeber, 2003 a práce mnohých ďalších autorov.

Výsledky spracovania meraní *GPS* znamenajú prínos v presnosti a operatívnosti. Iste je účelné z praktických i ekonomických dôvodov chápať vstup tejto navigačnej techniky do praxe ako vítanú a významnú technológiu v určovaní priestorovej (3D) polohy objektu. *GPS* je navigačný satelitný a tiež v podstate informačný systém pre všetky poveternostné podmienky vyvinutý Ministerstvom obrany USA s cieľom naplňovať požiadavky vojenských jednotiek na presné určovanie polohy, rýchlosti a času v jednotnom referenčnom súradnicovom systéme kdekoľvek a kedykoľvek na povrchu Zeme alebo v jej blízkosti. Pôvodne bol *GPS* plánovaný na využívanie vo vojenskom námorníctve USA. Z uvedenej definície je zrejmé, že prvotné dôvody pre vývoj *GPS* boli čisto vojenské, ale americký prezident vydal neskôr pokyn pre uvoľnenie s určitými obmedzeniami i civilným užívateľom (kap. 2.1.1).

Keď *GPS* začal fungovať, sľuboval, že sa z neho stane celkom bežná záležitosť rozšírená a užitočná ako napr. telefón. Pre mnohých užívateľov sa tento prísľub stal realitou. Piloti môžu teraz využívať *GPS* k vyhľadávaniu letísk, námorníci prístavov, turisti sa môžu orientovať v neznámej krajine a geodeti môžu zmerať potrebnú polohu s milimetrovou presnosťou. Aplikácie technológie *GPS* sú skoro neobmedzené. Spomeňme plynárenstvo, energetika, vodné hospodárstvo, telekomunikácie, správa ciest, železnice, doprava, pôdohospodárstvo, lesné hospodárstvo, povrchové baníctvo, stavebníctvo, geológia, geofyzika, záchranné systémy, turistika, zábava atď.

GPS je založený na princípe jednosmerného dĺžkomeru. Meranou veličinou je doba šírenia rádiového signálu zo satelitnej antény k anténe prijímača *GPS*. Nameraný čas sa prepočítava

³⁹ míľ (miľa)

⁴⁰ St. Paul - Svätý Pavol je ostrov v Indickom oceáne, ktorý spoločne s väčším ostrovom Amsterdam tvorí distrikt Ostrovy Svätý Pavol a Amsterdam, ktorý je súčasťou francúzskeho námorského teritória s názvom Francúzske južné a antarktické územia (TAAF, z fran. *Terres Australes et Antarctiques Françaises*). Nie je trvalo obývaný.

na vzdialenosť. Rýchlosť šírenia signálu je známa, t.j. je to rýchlosť identická s rýchlosťou svetla. Každý umelý satelit Zeme v navigačnej správe okrem iných údajov vysiela i parametre svojej dráhy, tzv. efemeridy, z ktorých vieme vypočítať polohu, t.j. 3D súradnice (x , y , z) satelitu. Na základe známej polohy satelitov, ich vzdialeností od prijímača *GPS* a presného času prijímač vypočíta svoju aktuálnu 3D polohu. Pokiaľ sa prijímač *GPS* pohybuje, systém vie takisto určiť jeho rýchlosť, smer, ako i ďalšie navigačné údaje. Tak isto je možné získať informácie o presnom čase *UTC*. Jedná sa o koordinovaný časový systém, od ktorého sa okrem iných časomier odvíja aj v *GPS* používaný tzv. *GPS* časový systém (Sedlák, 2003, 2012).

GPS umožňuje v reálnom čase okamžité a pomerne presné určenie polohy jeho prijímača (rádovo na niekoľko mm až m) ľubovoľného počtu i rýchlo sa pohybujúcich objektov. Ako vojenský systém je odolný voči rušeniu a jeho špičkové možnosti sú nedostupné neoprávneným užívateľom. *GPS* vznikol ako veľmi zložitý systém, ktorý však poskytuje rad možností pre presné určovanie polôh statických alebo pohybujúcich sa objektov. Princípom merania je určovanie tzv. pseudovzdialenosti⁴¹ medzi satelitom pohybujúcim sa vo vesmíre a prijímačom *GPS* na zemskom povrchu alebo aj mimo neho. V tomto prípade sa využíva celý systém a meranie sa uskutočňuje v reálnom čase. Súčasné špičkové prijímače *GPS* (ďalej tiež prístroje *GPS*, aparatúry *GPS*, navigátori *GPS*, rovery *GPS*) umožňujú určenie polohy na zemskom povrchu v reálnom čase použitím meračskej metódy *DGPS* (z angl. *Differential Global Positioning System*, slov. *diferenciálny globálny polohovací systém*)⁴². Tieto metódy svojou presnosťou vyhovujú predovšetkým potrebám geodetov.

K významným prednostiam *GPS* nesporne patrí (Dodel und Häupler, 2009; Gleason and Gebre-Egziabher, 2009; Hofmann-Vellenhof et al., 2008; Leick et al., 2015; Mervart, 1994; Rapant, 2002; Sedlák et al., 2009; Sedlák a Lošonczi, 2011; Sedlák, 2012; Vojtek, 2014):

- možnosť navigácie objektov v reálnom čase v ľubovoľnom mieste na Zemi a v jej okolí v ktorúkoľvek dennú či nočnú dobu neobmedzeným počtom užívateľov vlastniacich prijímače *GPS*,
- možnosť navigácie objektov (vozidiel, lietadiel, rakiet a pod.) pohybujúcimi sa i vysokými rýchlosťami,
- odolnosť satelitných signálov voči rušivým vplyvom,
- vysoký stupeň univerzálnosti, ktorý spočíva v možnosti voľby technológií podľa požiadaviek na presnosť a rýchlosť získania využiteľných výsledkov,
- plne elektronická (digitálna) konštrukcia prijímačov *GPS* umožňuje ich priame spojenie s technickými prostriedkami iných systémov,
- krátky čas potrebný k získaniu údajov o polohe počas prevádzky s frekvenciou okolo jednej sekundy,
- minimálna závislosť od polohového a výškového bodového poľa,
- optimalizácia výberu aparatúr *GPS* a možnosti voľby optimálneho režimu merania (pozorovania) pre konkrétny spôsob využitia,
- medzi jednotlivými meraniami bodmi nemusí byť priama viditeľnosť,
- vysoká presnosť,
- poskytnutie výsledkov v jednotnom svetovom referenčnom súradnicovom systéme,
- operatívne poskytnutie 3D súradníc snímaného objektu.

⁴¹ Je to vzdialenosť satelit-prijímač *GPS*, ktorá je zaťažená chybami z chodu hodín na satelite a v prijímači, zemskou gravitáciou, odporom vzdušných obalov Zeme a pod. V ďalších kapitolách sa uvádza matematický postup určenia exaktnej vzdialenosti medzi satelitom a prijímačom *GPS*.

⁴² Meračské metódy *GPS* sú prezentované v kapitole 2.1.9.

Okrem uvedených predností sa navigačný GPS vyznačuje tiež niektorými nedostatkami, medzi ktoré patrí:

- lokalizácia objektov (určenia polohy) je plne závislá od príjmu vysielaných signálov,
- nevyhnutnosť príjmu satelitných signálov prijímačom GPS od minimálneho počtu štaroch satelitov pre určenie polohy v 3D súradnicovom systéme,
- možnosť vnesenia nepresných údajov do navigačnej správy správcom systému,
- nemožnosť merania v podzemí,
- horšie výsledky pri meraní v hustom poraste (napr. v lese),
- je dôležitá priama „viditeľnosť“ na satelity,
- problémy s meraním v husto zastavaných oblastiach (napr. mestské aglomerácie s úzkymi uličkami a vysokými budovami).

GPS má niektoré významné odlišnosti:

- diferenčné výpočty medzi stanicami s prijímačmi GPS sú uskutočňované na matematickom elipsoide WGS 84⁴³ a nie v lokálnej rovine,
- vypočítaná vzdialenosť medzi stanicami nie je vzdialenosť po povrchu zemského telesa, ale je priama vzdialenosť cez zemské teleso,
- všetky merania je nevyhnutné transformovať do žiadaného súradnicového systému kompatibilného s používanou topografickou mapou.

2.1.3 Aplikácie GPS

GPS sa dá využiť na pevnine, na mori aj vo vzduchu. V zásade je použiteľný všade, výnimku tvoria miesta, kde nie je prístupný satelitný signál (jaskyne, tunely, podzemie, pod vodou a pod.). Medzi najbežnejšie aplikácie patria: geodézia, stavebníctvo, geografia, geoinformatika, geofyzikálne a geologické výskumy, turistika, cestovanie, cyklistika, lov a rybolov, automobilová, letecká a lodná navigácia, logistika, rekreačná plavba, zábava atď. GPS posluží každému, kto potrebuje vedieť, kde sa práve nachádza, alebo chce nájsť cestu k stanovenému cieľu.

Praktické využitie GPS

▪ **Na horách a v lese:** Ak sa turistom či ľudom pracujúcim v lese a horách stalo nešťastie, prostredníctvom navigátora GPS (prijímača GPS, prístroja GPS) môže prísť pomoc oveľa skôr (obr. 2.2). V horách môže trvať aj deň alebo dva, kým zraneného človeka nájdu záchranári, keď nie je známa jeho poloha. Načo hľadať niekoho v noci, vo fujavici a riskovať životy záchranárov? Mobilné telefóny zväčša fungujú aj v horách a tak stačí nadiktovať svoju polohu, prípadne polohu postihnutého a zásahová jednotka môže ísť. Avšak nie všade v horách je príjem signálu z mobilných telefonických sietí. Už veľa turistov zomrelo na

⁴³ Svetový geodetický systém 1984 (angl. World Geodetic System 1984, slov. Svetový geodetický systém 1984, skrátené WGS 84) je svetovo uznávaný geodetický štandard vydaný Ministerstvom obrany USA v roku 1984, ktorý definuje súradnicový systém, referenčný elipsoid a geoid pre geodéziu a navigáciu. WGS 84 je obsahom kap. 2.1.12.

podchladenie len kvôli tomu, že ich nemohli nájsť záchranári a veľa turistov sa v zlých poveternostných podmienkach vybralo hľadať pomoc dole do doliny, pretože „tam sú zaručene ľudia“, hoci mali chatu 100 m nad sebou. Pritom stačilo tak málo: mať so sebou prijímač GPS. Prijímače GPS všeobecne majú síce zhoršený príjem v lesnatých porastoch a hlbokých dolinách, ale sú neoceniteľné pri orientačných problémoch. Ak návštevník hôr nevie ako ďalej, dokážu ho prijímače GPS navigovať naspäť presne po trase, ktorou prišiel. Tieto problémy určite poznajú hlavne vysokohorskí turisti, ktorí sa už stretli s hmlou, kde je vidieť len na pár metrov a kamenný chodník sa veľmi rýchlo stratí. Keďže sa môže signál GPS v hlbokých dolinách občas stratiť, je najdôležitejšie nespadať z hrebeňa, kde so signálom nie je problém. Dôležité je umiestniť navigátor GPS na popruh rucksaku čo najvyššie nad hlavu človeka bez prekrytia antény. Prijímač GPS však nie je len na to, ako sa mnohí mylne domnievajú, aby pomohol, keď človek nevie niekam trafiť, ale dokáže tiež merať všetky vlastnosti pohybu, zaznamenávať ich a rôzne kombinovať. Z rýchlosti, akou sa človek či dopravný prostriedok pohybuje, prístroj GPS dokáže vypočítať okamžitú dobu potrebnú na dosiahnutie cieľa a ukáže aj čas pri jeho dosiahnutí. Z navigátora GPS sa môže vyčítať, kedy presne zapadne slnko (tma cca 15 až 30 min. po západe slnka) a človek sa môžete ľahšie rozmyslieť či pokračovať do ďalšieho tábora alebo sa radšej utáboriť. Nezanedbateľné je aj to, že navigátor GPS dokáže upozorniť na blížiace sa nebezpečné miesto. Nemôže sa stať, že napr. človek na člně s navigátorom GPS minie tábor, ktorý je zle označený a nemôže sa už proti prúdu vrátiť. Bez navigátora GPS sa môže stať aj to, že majiteľ príde o loď a ďalej musí ísť pešo, lenže v dohľade žiadna osada. Navigátor GPS ukáže smer a vzdialenosť do tej najbližšej osady, poprípade vie aj nájsť najbližšiu zastávku autobusu či vlaku. Väčšina ručných navigátorov GPS je vodotesných, takže sa netreba báť ich zobrať so sebou do daždivého a vlhkého počasia.



Obr. 2.2: Turistické navigátory GPS.

- **Morská navigácia:** Navigátorom GPS, určeným pre orientáciu na mori, sa vraví tiež často „plotter“, ale keďže aj tieto prístroje pracujú na princípe signálu GPS, obecné ich môžeme tiež nazývať „navigátor GPS“ (obr. 2.3). Existujú navigátory GPS, ktoré obsahujú podrobné námorné mapy, alebo ktoré sa používajú v spolupráci s papierovou mapou. Pri námornej a inej vodnej doprave sa nevyžaduje vysoká presnosť navigátorov GPS, stačia navigátory GPS s polohovou presnosťou niekoľkých metrov až desiatok metrov, pretože trasa plavby plavidla na mori nie je tak priestorovo obmedzovaná, ako je to v cestnej doprave.



Obr. 2.3: GPS navigácia na mori.

▪ **Mestská turistika:** Ak turista, ktorý je vyznávač cestovania po cudzích mestách a obdivovania starej architektúry, tak mu navigátor *GPS* bude robiť aj tu neoceniteľného spoločníka (obr. 2.4). Na začiatku je dobré si do navigátora *GPS* vložiť dáta, ktoré mu označujú miesto, kde si turista zaparkoval svoje auto, alebo ho vysadil autobus či vlak, potom sa nemôže stať, že by to miesto turista nenašiel. Keď už sa turista vydá do mesta za pamiatkami, stačí pozrieť do navigátora *GPS* a ten ich ukáže podľa toho, ktorá pamiatka je najbližšie. Pomocou navigátora *GPS* sa dá zistiť, kde je najbližšia reštaurácia, najbližšia banka či bankomat. Navigátor *GPS* však má v meste jednu nevýhodu, pretože do úzkych uličiek a v zastavaných miestach sa signál nedostane. Stačí si len nájsť otvorenejšie priestranstvo a problém je vyriešený. Ak človek mešká napr. stretnutie a nevie popísať, kde sa nachádza, stačí poslať z mobilu SMS (z angl. *Short Message Service*, slov. krátka textová správa) so správou o súradniciach, kde sa práve nachádza a partner stretnutia, ak vlastní navigátor *GPS*, už nemá problém s hľadaním človeka, s ktorým má stretnutie. Na mestskú navigáciu sú vhodne dnes už bežne dostupné navigátori *GPS*, ktoré sú súčasťou telefónnych mobilov.



Obr. 2.4: Ručné navigátori GPS pre mestskú turistiku.

▪ **Cyklistika:** Na cyklistických túrach poslužia niektoré druhy navigátorov *GPS* ako multifunkčný cyklocomputer, ktorý poskytne nielen všetky informácie týkajúce sa pohybu (okamžitá rýchlosť, priemerná rýchlosť, maximálna rýchlosť, prejdená vzdialenosť a iné), ale vykreslí na mape presne prejdenú trasu a dokonca výškový profil prejdenej trasy (obr. 2.5). Samozrejme pomocou navigátora *GPS* ľahko sa dá nájsť najbližší camping, hotel, vlaková zastávka, alebo iné zaujímavé ciele.



Obr. 2.5: Rôzne druhy navigátorov *GPS* a ich umiestnenia na bicykli.

▪ **V automobile:** Vodičom automobilov sa stáva, že napr. ľahko minú diaľničný výjazd a nevedia, kde je ďalší, alebo jazdia okolo diaľnice a nevidia sa na ňu dostať. Alebo vodič ide na stretnutie do vzdialeného mesta a chce vedieť, či to danou rýchlosťou to stihne. Tak s týmito, ale i inými problémami sa dá hravo poradiť, ak vodič má v automobile navigátor *GPS* (obr. 2.6). Ak vodič chce používať navigátor *GPS* aj v aute, najlepší je taký navigátor *GPS*, ktorý podporený autoroutingom⁴⁴ a ešte lepšie s hlasovou navigáciou. Niektoré vyspelé navigátory *GPS* podporujú tzv. dynamickú navigáciu ktorá pomôže, hoci na známych cestách, rýchlejší prejazd daným územím. Táto funkcia je síce podporovaná iba v niektorých štátoch západnej Európy, ale dá sa ušetriť aj niekoľko-hodinové zdržanie.

⁴⁴ Automatické plánovanie trasy je služba, ktorú poskytujú automobilové alebo osobné navigačné prístroje *GPS* pre uľahčenie orientácie v hustej mestskej dopravnej sieti, alebo v neznámom meste. Plánovač trasy v navigátore *GPS* je schopný užívateľovi v krátkom čase nájsť najkratšiu alebo najrýchlejšiu cestu na požadované miesto. Užívateľ môže spresniť parametre trasy, napr. ak si neželá využívať spoplatnené úseky ciest, volí si typ dopravného prostriedku (automobil, bicykel, chodec), prípadne zadáva medzizastávky.



Obr. 2.6: Rôzne druhy navigátorov GPS pre automobily; voľné na upevnenie v interiéri automobilu alebo pevne zabudované v palubovej doske automobilu.

▪ **Na motorke:** Využitie navigátora *GPS* na motorkách je veľmi podobné ako v automobile. Pre motorky je jednoznačne najlepší navigátor *GPS* s podporou autoroutingu, pretože pozeráť sa počas rýchlej jazdy niekoľko sekúnd na displej navigátora *GPS* a vyberať vhodnú cestu, je nebezpečné (obr. 2.7). Existujú už aj hlasové sady navigátorov *GPS* s použitím slúchadla alebo prepojením na komunikátor.



Obr. 2.7: Rôzne druhy navigátorov GPS a ich umiestnenia na motorke.

▪ **Zábava s GPS:** S navigačnými zariadeniami *GPS* je možné zažiť aj veľa zábavy. Najznámejší spôsob je tzv. „*Geocaching*“, kde nadšenci vytvárajú rôzne skrýše (poklady či tzv. „*cache*“ (z angl. *cache*, slov. *úkryt*, *skrýša*), ktoré je možné nájsť len s pomocou navigátora *GPS*. Ak hľadač skrýšu nájde, môže si z nej niečo zobrať, ale vhodné je aj niečo vložiť. Obvykle sú *cache* umiestnené na zaujímavých miestach, takže väčšinou je hľadanie spojené s pekným zážitkom (obr. 2.8).



Obr. 2.8: Geocaching - zábava s GPS; ukážky obsahu rôznych caches (skrýš geocachingu); logo geocachingu (vľavo hore).

2.1.4 GPS a jeho perspektívy

Výhodou *GPS* je dnes už takmer ukončený jeho dlhodobý vývoj, stabilita, spoľahlivosť a podpora vlády USA. Z toho vyplýva jeho využiteľnosť pre vojenské aj civilné využitie. Pri nasadení na jednoduché problémy nezaťažené veľmi vysokou spoľahlivosťou je dnes *GPS* jedným z veľmi dobrých prostriedkov pre navigáciu a určovania polohy, rýchlosti a času.

Hlavnou úlohou *GPS* je okamžité zistenie 3D polohy statického alebo pohyblivého objektu na ľubovoľnom mieste na Zemi i mimo nej za akýchkoľvek meteorologických a pozičných podmienok. Systém *GPS*, ktorý bol pôvodne vyvinutý pre potreby armády USA, ponúka veľké množstvo využití aj v civilnom sektore.

Prístroje *GPS* majú vlastnú pamäť a sú schopné zapamätať si od 100 do 500 bodov na ktoromkoľvek mieste na Zemi a k týmto bodom ukázať smer alebo vzdialenosť. Pri pohybe k vybranému bodu prístroj *GPS* upozorní na odchýlenie od ideálnej trasy, alebo oznámi dosiahnutie cieľa. Prijímač *GPS* je vhodný nielen pre turistických sprievodcov a horských vodcov, ale aj pre samotných turistov, rybárov, horolezcov, poľovníkov a pod. Dá sa použiť na navigáciu po meste, pre automobilových turistov pri zahraničných dovolenkách. Kombináciou s alarmom v aute je prijímač *GPS* schopný poslať SMS správu s určením

pozície na mobilný telefón. Navigátor *GPS* je možné použiť na prieskum a mapovanie terénu, navigáciu v teréne, na vode, vo vzduchu, pri navádzaní vozidiel na cestách, v mestách a pri presnej navigácii po uliciach miest. Je vhodný pre logistiku, kuriérske a špedičné firmy, kde je nutná presná navigácia na úrovni presnosti ulíc alebo pri zahraničnom tranzite cez neznáme územia (Sedlák et al., 2009; Sedlák a Lošonczi, 2011).

GPS môžu používať bezpečnostné služby, ktoré sa zaoberajú prepravou cenín do peňažných inštitúcií. Dispečer na svojom monitore presne vidí dráhu sledovaného auta. Keď sledovaný objekt opustí nadefinovanú trasu (napr. pri prepade alebo krádeži), zariadenie nahlási zmenu dispečerovi, alebo sa priamo spojí s políciou. Navigátor *GPS* je možné priamo spojiť s bezpečnostným zariadením v automobile (Sedlák, 2012).

Hlavnými aplikáciami využívajúcimi *GPS* sú geodetické či geografické mapovania terénu (vyžadujú si špeciálne prístroje *GPS*), navrhovanie trás ciest a inžinierskych sietí a pri geologickom prieskume. Namerané (pozorované) údaje môžu byť spracovávané v reálnom čase alebo zhromažďované a spracované neskôr. Mapovanie sa používa pri vytváraní geografických informačných systémov a pri lokalizácii prírodných zdrojov.

V roku 1994 bol *GPS* uznaný *FAA* (z angl. *Federal Aviation Administration*, slov. *Federálna letecká správa*) ako štandard pre leteckú navigáciu. Na mori navigátor *GPS* poskytuje informácie o súradniciach, presnom čase, kurze, rýchlosti a spolupracuje s pobrežnou a prístavnou navigáciou (majáky). Pôvodne bol *GPS* vyvinutý a používaný pre presné určenie polohy vojenských lodí, neskôr lietadiel a pozemných vojenských jednotiek.

Je veľmi pravdepodobné, že už v najbližších rokoch prenikne *GPS* ako súčasť *GNSS* veľmi výrazne do mnohých ďalších oblastí súčasného sveta. Inak tomu nie je ani v geodézii, kde prijímač *GPS*, resp. v súčasnosti uvádzajme už prijímač *GNSS* (ďalej len *GPS/GNSS*), umožňuje veľmi vysokú presnosť v určení 3D polohy zameriavaného bodu (s presnosťou na cca niekoľko milimetrov). Zvyšovanie presnosti meraní, zjednodušovanie aparatúr *GPS/GNSS* a vzrastajúci počet užívateľov schopných chápať základné princípy systému len uľahčujú tento nástup. Neustále zdokonaľovanie hlavne elektronických súčiastok prístrojov *GPS* v rámci *GNSS* prináša so sebou permanentné zvyšovanie kvality meraní. Dosahuje sa to najmä zlepšovaním rozlíšiteľnosti vlnovej dĺžky, ktorá sa využíva pri *GPS* fázových meraniach. Súčasný trend predstavujú meranie vlnovej dĺžky s presnosťou 0,1 %, čo umožňuje merať pseudovzdialenosti s presnosťou niekoľkých cm, či niekoľkých mm. Pokrok je badateľný aj pri konštrukciách prijímacích antén *GPS/GNSS*.

Dnešné prístroje *GPS/GNSS* sú konštruované tak, aby ich používanie bolo čo najpohodlnejšie a zároveň účelné. Vzhľadom na všeobecné rozširovanie metódy *RTK* (z angl. *Real Time Kinematic method*, slov. *kinematická metóda určovania polohy v reálnom čase*) môžu byť prijímače *GPS/GNSS* stále viac a viac využívané ako tyče s odrazovým hranolom, na ktoré sme zvyknutí pri meraniach geodetickými totálnymi stanicami. Takto je možná integrácia *GPS/GNSS* aj do „kráľovskej disciplíny“ geodetických totálnych staníc, v inžinierskej geodézii, katastrálneho mapovania a pod. Cenovú náročnosť a potrebný počet pracovných síl je možné vyriešiť realizáciou najnovších projektov z oblasti diferenciálnych meraní *GPS/GNSS* (*DGPS*). Tieto projekty uvažujú o zriaďovaní tzv. virtuálnych referenčných staníc (permanentné referenčné *GNSS* stanice, ktoré poskytujú užívateľom *GNSS* požadované dáta potrebné k určeniu 3D polohy). Sú to siete vlicovacích bodov so známymi transformačnými kľúčmi pre príslušné územia. Užívateľ *GPS/GNSS* tak potrebuje na meranie iba jednu aparatúru *GPS/GNSS*. Prostredníctvom mobilnej telefónnej siete sa

prihlási do riadiaceho centra referenčnej siete, napr. SKPOS⁴⁵, kde bude preňho zriadená virtuálna referenčná stanica a dostane údaje potrebné pre presné meranie vo WGS 84 a pre prípadnú transformáciu do súradnicového systému S-JTSK⁴⁶ (Systém jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej).

Slovenská observačná priestorová služba - SKPOS

Slovenská priestorová observačná služba (SKPOS, s označením **SKPOS®**) je multifunkčný nástroj na presné určovanie polohy objektov a javov pomocou GNSS. SKPOS je služba využívajúca GNSS na presné priestorové určenie polohy objektov v reálnom čase. Služba umožňuje používateľom pracovať on-line alebo dodatočne v záväzných geodetických referenčných systémoch ETRS89⁴⁷ a S-JTSK (v realizácii JTSK03⁴⁸). SKPOS pozostáva zo siete permanentných referenčných staníc GNSS pripojených pomocou privátnej virtuálnej siete do Národného servisného centra nachádzajúceho sa na Geodetickom a kartografickom ústave v Bratislave. Národné servisné centrum je vybavené riadiacim softvérom služby, ktorý spravuje namerané satelitné observácie zo siete permanentných referenčných staníc a zároveň generuje tzv. sieťové korekcie pre používateľov využívajúcich službu v reálnom čase a údaje slúžiace na dodatočné spracovanie pre používateľov vybavených postprocesingovým softvérom (SKPOS, 2017).

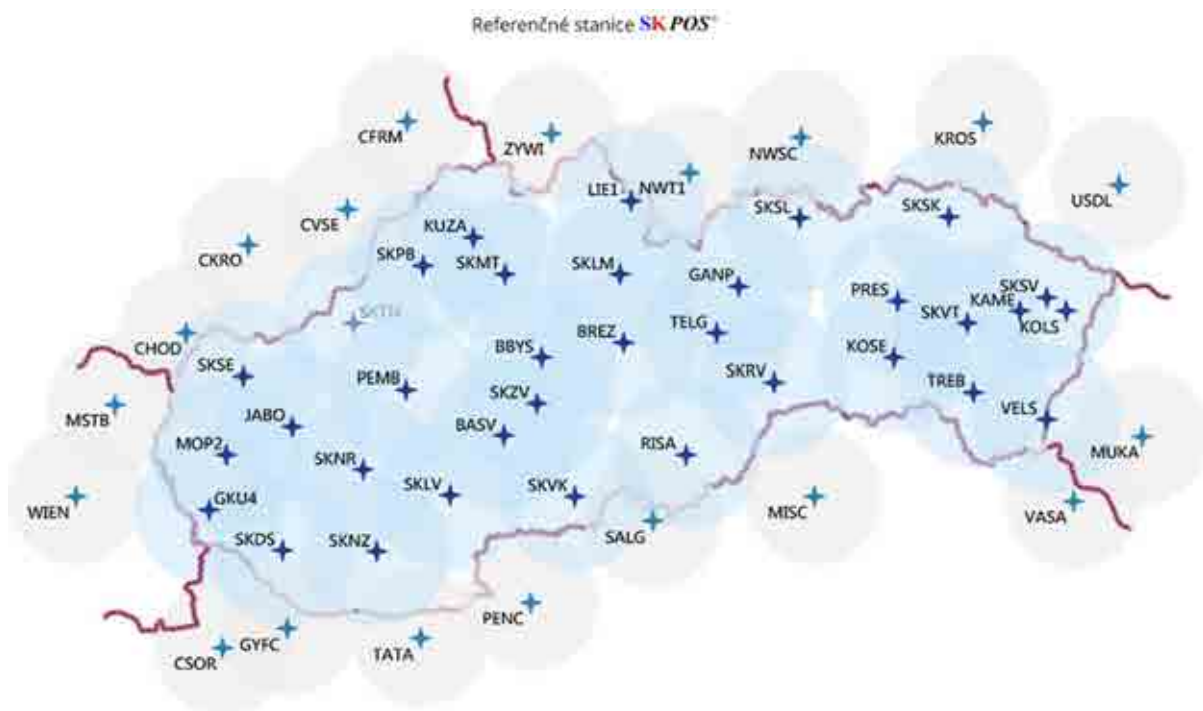
SKPOS pozostáva z 33 permanentných pozemných staníc vybudovaných na celom území Slovenska. Všetky stanice sú vybavené anténami a prijímačmi GNSS firmy TRIMBLE. V rámci SKPOS je možné využívať aj signály zo 17 staníc z okolitých štátov v blízkosti hraníc so Slovenskom, t.j. zo štyroch staníc v Českej republike, štyroch staníc v Poľsku, jednej stanice na Ukrajine, siedmych staníc v Maďarsku a jednej stanice v Rakúsku (obr. 2.9). Tým na území Slovenska je možnosť získania signálu GNSS až z 50 staníc (SKPOS + okolité prihraničné štáty). Všetky permanentné stanice prijímajú signály od satelitov GPS a GLONASS a už niektoré signály od satelitov Galileo a Compass (Beidou-2) v rámci GNSS. Permanentné stanice SKPOS majú niekoľko metrov hĺbkovú pevnú stabilizáciu (betónové piliere), ktorá zabezpečuje stabilitu antény prijímača GNSS. Stanice budované pôvodne na strechách budov postupne sú restabilizované na zemskom povrchu už vyššie spomínanou hĺbkovou betónovou stabilizáciou. Obr. 2.10 prezentuje ukážku niektorých staníc SKPOS. SKPOS služby online sú dostupné na: <http://monitoringskpos.gku.sk/help.php?lang=sk>.

⁴⁵ Slovenská priestorová observačná služba (SKPOS®) je multifunkčný nástroj na presné určovanie polohy objektov a javov pomocou GNSS.

⁴⁶ Systém jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej (S-JTSK) je národný polohový súradnicový systém platný na Slovensku. Je obsahom štúdia predmetu Kartografia, resp. Kartografia a geoinformatika.

⁴⁷ Európsky terestrický referenčný systém 1989 (ETRS89) je definovaný na základe rezolúcie č. 1 Technicko-riadiacej skupiny subkomisie Európskeho referenčného rámca (EUREF TWG, z angl. European REference Frame Technical Working Group) prijatej na sympóziu konanom v roku 1990 vo Florencii. Rezolúcia definuje ETRS89 ako systém, ktorý je stotožnený s Medzinárodným terestrickým referenčným systémom (ITRS, z angl. International Terrestrial Reference System) v epoche 1989.0 a ktorý je fixovaný na stabilnú časť Eurázijskej tektonickej platne. Týmto ETRS89 nesie všetky vlastnosti a charakteristiky ITRS.

⁴⁸ JTSK03 je nová realizácia súradnicového systému S-JTSK určená s použitím GNSS.



Obr. 2.9: Referenčné stanice SKPOS.

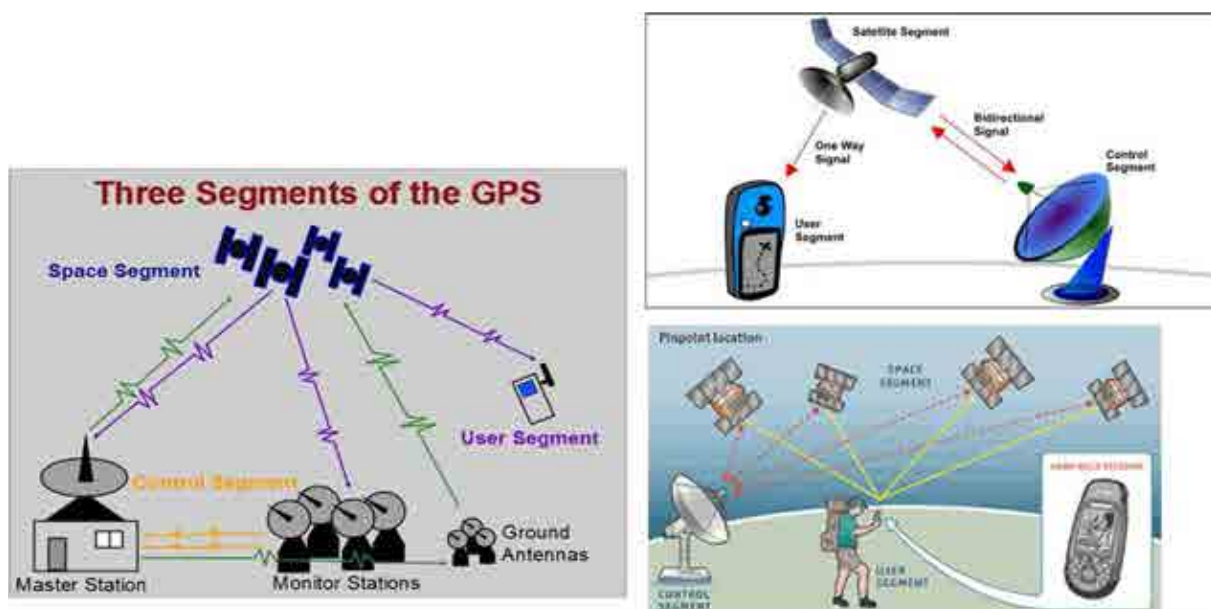


Obr. 2.10: Ukážky niektorých staníc SKPOS.

2.1.5 Štruktúra GPS

Pri opise navigačného satelitného a tiež informačného systému *GPS* je obvykle členený na tri súčasti - segmenty (subsystémy) (obr. 2.11, angl.) (Betz, 2015; Dodel und Häupler, 2009; Gleason and Gebre-Egziabher, 2009; Hofmann-Vellenhof et al., 2008; Jeffrey, 2015; Jin et al., 2014; Leick et al., 2015; Sedláček, 2003, 2012; Sedláček et al., 2009; Sedláček a Lošonczi, 2011):

1. *Kozmický (vesmírny) segment* - sústava aktívnych a záložných satelitov.
2. *Riadiaci segment* - kontrola činnosti systému, určovanie a predpoveď dráh a vysielanie informácií na satelity.
3. *Užívateľský segment* - užívatelia vybavení prijímačmi a software *GPS* pre rozličné aplikácie.



Obr. 2.11: Rôzne ukážky zobrazení a schém segmentov GPS.

Kozmický segment

Kozmický segment (tiež *vesmírny segment*) *GPS* je tvorený sústavou satelitov rozmiestnených systematicky na obežných dráhach a vysielajúcich navigačné signály (obr. 2.12). Po úplnom rozvinutí *GPS* jeho vesmírny segment zabezpečuje globálne pokrytie satelitmi tak, aby boli možné simultánne merania na 4 až 8 satelitov vo výške viac než 15° nad horizontom v každom mieste na Zemi. Pôvodná konštelácia kozmického segmentu *GPS* obsahovala 24 aktívnych satelitov⁴⁹ (21 operačné, t.j. navigačné a 3 záložné satelity) rozmiestnených v troch obežných dráhach (dráhových rovinách, tiež orbitách) so sklonom 63°

⁴⁹ Kozmický segment bol projektovaný na 24 satelitov, ale v súčasnosti je využívaných až medzných 32 satelitov.

(inklinácia⁵⁰) k rovine rovníka. Neskôr počet satelitov sa zmenil na 21 (18 operačné a 3 záložné satelity) v šiestich obežných dráhach so sklonom 55° k svetovému rovníku.



Obr. 2.12: Kozmický segment GPS a konštelácia satelitov.

Po roku 2008 sa počet satelitov rozšíril opäť na pôvodných 24 satelitov v šiestich obežných dráhach so sklonom 55° k svetovému rovníku. Z toho vyplýva, že v každej dráhovej rovine sú štyri satelity. Tým sa dosahuje priaznivejší stav, keď pri poruche niektorého z navigačných satelitov zostanú v jednej obežnej dráhe tri funkčné satelity. Okrem toho pri tomto rozložení satelitov v šiestich obežných dráhach sa vyhne krátkym intervalom nevhodnej konfigurácie štyroch satelitov nad horizontom v dôsledku zákrytov niektorej dvojice satelitov, čo bolo častejšie sa vyskytujúci stav pri počte pôvodných troch obežných dráh. Obežné dráhy satelitov sú vzájomne posunuté o 60° .

Každá zo šiestich obežných dráh A až F^{51} má možných maximálne päť pozícií (pozície č. 1 až 5) pre umiestnenie satelitov, z čoho plynie, že za súčasnej konfigurácie je maximálny možný počet satelitov GPS na obežnej dráhe rovný počtu 30 kusov. Pozícia č. 5 je u každej obežnej dráhy záložná a pre dosiahnutie FOC⁵² (z angl. *Full Operational Capability*, slov. *plná operačná schopnosť*) postačuje 24 funkčných satelitov. V súčasnosti sa medzný počet 30 satelitov by mohol zvýšiť až na 32 satelitov, čo znamená, že každá obežná dráha by obsahovala 5 až 6 nepravidelne rozmiestnených pozícií satelitov. Pre ďalšie zvyšovanie počtu satelitov bude treba zmeniť vysielaný signál.

⁵⁰ Inklinácia je uhol sklonu obežnej dráhy satelitu k svetovému rovníku.

⁵¹ Obežné dráhy satelitov sú označované latinskou abecedou A až F.

⁵² FOC (*Full Operational Capability*) globálneho polohového systému GPS bola vyhlásená 17. júla 1995 po dosiahnutí počtu 24 satelitov Bloku II a Bloku IIA na obežnej dráhe a ich dôslednom testovaní. V obecnom ponímaní označenie pre dostupnosť danej technológie (frekvencie, kódu) na 24 plne funkčných satelitov GPS na obežnej dráhe.

Satelity obiehajú vo výške takmer 20 200 km nad povrchom Zeme (presne 20 190 km) po eliptickej dráhe (orbite). Doba obehu satelitu okolo Zeme 11 hod. 58 min. *hviezdneho (siderického) času*⁵³. Za jeden hviezdny (siderický) deň (24 hodín, t.j. čas, za ktorý sa Zem otočí o 360°) uskutoční každý satelit dva obehy okolo Zeme. Keďže jeden obeh satelitu na svojej dráhe trvá 11 hod. a 58 min., potom každý satelit je ďalší deň na rovnakom mieste obežnej dráhy vždy o 4 min. skôr. Veľká polos eliptickej dráhy satelitu s malou excentricitou je 26 561 km, čomu zodpovedá podľa tretieho *Keplerovho zákona* už vyššie uvedená doba obehu satelitu okolo Zeme 11 hod. a 58 min. hviezdneho času. Základné dáta konštelácie satelitov GPS sú prezentované a zhrnuté na obr. 2.13 (angl.).



Obr. 2.13: Základné dáta konštelácie satelitov GPS.

Satelit GPS sa na strednej obežnej dráhe *MEO*⁵⁴ (z angl. *Medium Earth Orbit*, slov. *stredná obežná dráha*) pohybuje rýchlosťou $3,8 \text{ km.s}^{-1}$ ($11\,300 \text{ km.h}^{-1}$) (obr. 2.14, angl.). Rozdiel v rektascenzii výstupných uzlov obežných dráh (dráhových rovin) satelitov je 60°, interval argumentu šírky v jednotlivých dráhových rovinách je 120°.

Na palube každého satelitu GPS (obr. 2.15) sa nachádza (Betz, 2015; Dodel und Häupler, 2009; Gleason and Gebre-Egziabher, 2009; Hofmann-Vellenhof et al., 2008; Jeffrey, 2015; Jin et al., 2014; Leick et al., 2015; Sedlák, 2012):

- Antény: prijímacie antény (pre komunikáciu s pozemnými kontrolnými stanicami v pásme S (2204,4 MHz) a vysielacie antény (12 antén pre vysielanie rádiových kódov v pásme L (2000–1000 MHz) a antény pre vzájomnú komunikáciu satelitov v pásme UHF, t.j. UKV-ultra krátke vlny.
- Atómové hodiny: 3 až 4 veľmi presné (10^{-13} sek.) atómové hodiny s rubídiovým, predtým taktiež s céziovým oscilátorom.

⁵³ *Hviezdny čas*, tiež *siderický čas*, sa užíva v astronómii na opis zdanlivého pohybu hviezd po oblohe, ktorý je spôsobený otáčaním Zeme okolo jej osi. Líši sa od bežne používaného *slnečného času*, ktorý hodnotami od 0 do 24 hodín opisuje rotáciu Zeme voči Slnku. Jeden deň *hviezdneho času* - *hviezdny deň* (*siderický deň*) netrvá 24 hodín, ale 23 hodín, 56 minút a 4,09 sekundy. Rozdiel je spôsobený tým, že zatiaľ čo Zem vykoná jednu otáčku voči hviezdám, posunie sa zároveň po svojej dráhe okolo Slnka asi o 2,5 milióna kilometrov, takže Slnko v tú chvíľu nie je na rovnakom mieste na oblohe ako na začiatku hviezdneho dňa. Za jeden rok vykoná Zem o jednu otáčku viac voči vzdialeným hviezdám než voči Slnku, ktoré obieha. Rozdiel prepočítaný na jeden deň dáva necelé 4 minúty. Hviezdny a slnečný čas majú rovnakú hodnotu raz za rok, t.j. v čase jesennej rovnodennosti.

⁵⁴ *Medium Earth Orbit* (*MEO*), niekedy nazývaná *medzikruhová obežná dráha* *ICO*, (z angl. *Intermediate Circular Orbit*), je oblasť okolo Zeme nad nízkou obežnou dráhou Zeme (nadmorská výška 2000 km = 1,243 mi) a pod geostacionárnou obežnou dráhou (nadmorská výška 35 786 km = 22 236 mi).

- Palivo pre dýzy (trysky) pohonu.
- Akumulátory pre elektrický pohon motorov so solárnymi panelmi s plochou 7,2 m².
- Palubné počítače s príslušnými pamäťovými médiami: robia korekcie obežných dráh a časov.
- Rada ďalších prístrojov slúžiacich pre navigáciu alebo iné špeciálne účely (napr. pre detekciu výbuchu jadrových náloží a pod.).



Obr. 2.14: Porovnanie geostacionárnej obežnej dráhy, obežných dráh GPS, GLONASS a Galileo a strednej obežnej dráhy (Compass).



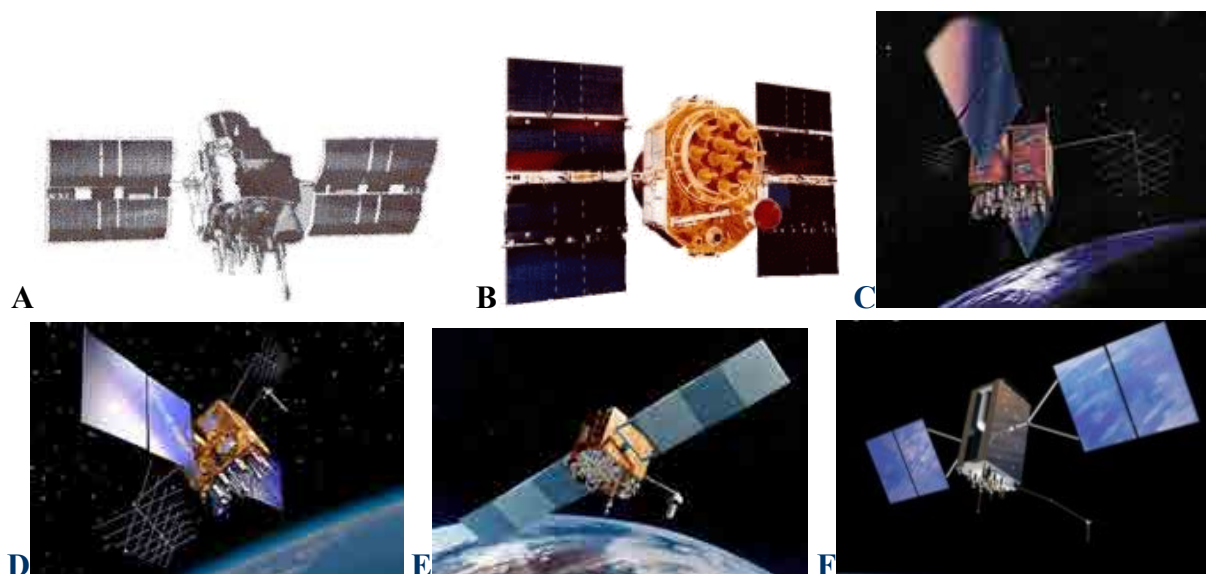
Obr. 2.15: Satelit GPS.

Satelity GPS majú hmotnosť 900 až vyše 1 800 kg, rozmery približne (2x1x1,5) m, pohybujú sa rýchlosťou 3,8 km.sek.⁻¹ a majú predpokladanú životnosť v priemere 7,5 roka (4,5 až 10 rokov). Korekcie dráh a orientácie satelitov umožňuje vlastný pohonný systém.

Cena jedného satelitu je odhadovaná na približne 50 miliónov USD (United States Dollar). Satelit prijíma, spracováva, uchováva a vysiela informácie z a do pozemného riadiaceho centra, na základe ktorých môže korigovať svoju dráhu dýzami, alebo informuje o svojom stave riadiace centrum.

Pre program GPS bolo vyvinutých päť blokov (typov) satelitov (obr. 2.16) (Hofmann-Vellenhof et al., 2008; Jeffrey, 2015; Jin et al., 2014; Sedlák, 2003, 2012; Sedlák et al., 2009; Sedlák a Lošonczi, 2011):

1. Satelity *NTS* (z angl. *Navigation Technological Satellites*, slov. *navigačné technologické satelity*), t.j. technologické navigačné satelity. Išlo o dva satelity. Obiehali na nižších dráhach a testovali jednotlivé bloky satelitov projektu GPS.
2. Satelity *Block I*. Boli to satelity tiež pod označením *NDS* (z angl. *Navigation Development Satellites*, slov. *navigačné vývojové satelity*), ktoré rozvíjali technológiu GPS. Bolo ich spolu vypustených 11. Satelity boli projektované so životnosťou 3 roky, no niektoré z nich slúžili viac než 10 rokov. Prvých 11 prototypových satelitov, vypustených v období 1978 až 1985, bolo typu *Block I*. Hoci ich životnosť bola plánovaná na 4,5 roka, v roku 1993 boli ešte 3 satelity aktívne. Sklon dráhy k rovníku mali 63° .
3. Satelity *Block II* a *IIA*. Nahradili satelity *Block I*. V súčasnej dobe sú funkčné len 4 satelity (*Block IIA*).
4. Satelity *Block IIR* a *IIR-M* (z angl. *R: Replacement Operational Satellites*, slov. *náhradné operačné satelity*, *M: z angl. Modernized*, slov. *modernizované*) sú zdokonalené satelity *Block II*. Majú väčšiu odolnosť proti radiácii. V súčasnej dobe je funkčných 12 satelitov rady *IIR* a 7 satelitov vyššej rady *IIR-M*.
5. Satelity *Block IIF* (z angl. *F: Follow on Group*, slov. *nasledovať v skupine*). V súčasnej dobe je funkčných 8 satelitov.
6. Satelity *Block IIIA*, *IIIB*, *IIIC* sú v príprave na vynesenia na obežné dráhy, resp. vo svojom vývoji. Sú technologicky dokonalejšie než satelity *Block IIF*.



Obr. 2.16: Satelity GPS: Block I (A), Block IIA (B), Block IIR (C), Block IIR-M (D), Block IIF (E), Block III (F).

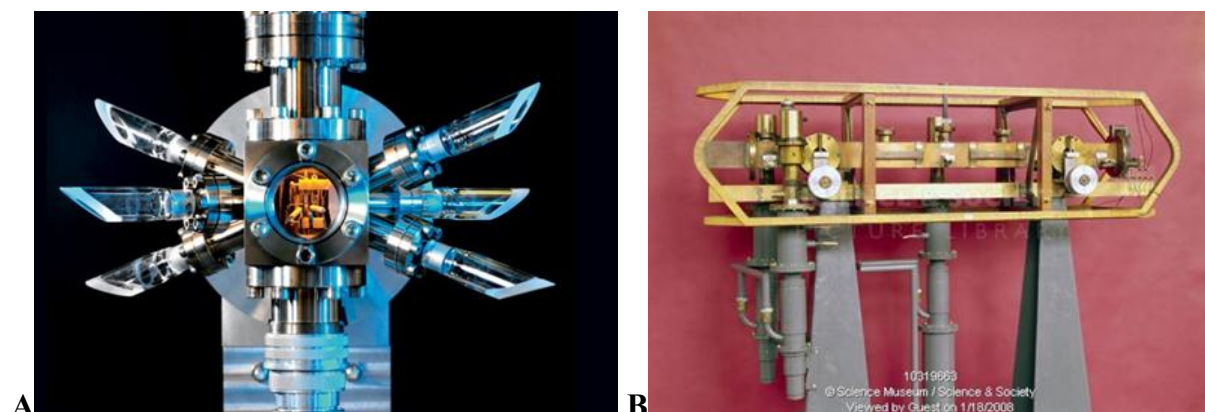
Podrobnejšie údaje o jednotlivých satelitoch sú uvedené v tab.2.4.

Tab. 2.4: Prehľad počtu a typov satelitov GPS.

Blok (Block)	Obdobie	Vypustené	Aktívne	Životnosť plán/skutočná
I	1978–1985	10+1 ¹	0	-/?
II	1989–1990	9	0	7,5/12,1
IIA	1990–1996	19	4	7,5/20+
IIR	1997–2004	12+1 ¹	12	10,0/13+
IIR-M	2005–2009	8	7	8,5/8+
IIF	2010–2016	8+4 ²	8	15,0/2+
IIIA	2016–	0+4 ² +8 ³	0	15/-
IIIB		0+8 ³	0	-/-
IIIC		0+16 ³	0	-/-
Celkom		66 + 2¹ + 5² + 36³	31 (32)	

¹ stratená pri štarte alebo zlyhalo oživenie
² v príprave
³ plán
⁴ vývojové/testovacie
 (Posledná zmena: 25. januára 2015) (Posledná zmena: január 2016)

Atómové hodiny (obr. 2.17) sú doteraz najpresnejšie hodiny, ktorých základom sú oscilácie molekúl alebo atómov vhodnej látky, napr. plynového amoniaku, na vlnovej dĺžke 1,2599 cm. Atómové hodiny sú zdokonalené kremenné hodiny, kontrolované frekvenciou vhodnej molekulovej alebo atómovej spektrálnej čiary. Tak sa získa kmitanie zachovávajúce si vysokú stálosť kmitočtu. Kmity sa prenášajú na mechanizmus ukazujúci čas a sú veľmi stále. Atómové hodiny zmenia svoj chod o 1 sek. asi za 1 000 rokov a udávajú *atómový čas*⁵⁵. Od roku 1967 dĺžka 1 sek. zodpovedá 9 192 631 770 kmitom atómu cézia 133.



Obr. 2.17: Atómové hodiny na satelite GPS (A); prvé atómové hodiny z roku 1955 (B).

⁵⁵ *Atómový čas* je čas udávaný atómovými hodinami. Stupnica atómového času využíva vysokostabilné molekulové a atómové frekvenčné etalóny na regulovanie kremenných hodín, je takmer dokonale rovnomerná a nezávisí od zemskej rotácie. Stupnica času založená na sústave atómových hodín je rovnomerná s presnosťou do 10^{-11} s, kým jednotka času určená z obehu Zeme okolo Slnka je presná do 10^{-9} s. Atómová sekunda je časový úsek, za ktorý nastane 9 192 631 770 kmitov atómu cézia. Tento interval zodpovedá efemeridovej sekunde s presnosťou $\pm 2 \cdot 10^{-9}$. V súčasnosti medzinárodne spolupracuje asi 30 vedeckovýskumných ústavov a laboratórií disponujúcich atómovými časovými a frekvenčnými etalónmi. Z niekoľkých nezávislých škál atómového času sa roku 1971 zaviedol *medzinárodný atómový čas IAT* (z angl. *International Atomic Time*). IAT je vážený priemer atómových časov (t. j. časov meraných na základe definície sekundy) nameraných siedmimi najlepšími časovými laboratóriami sveta, ktoré disponujú céziými atómovými hodinami a frekvenčnými normálmi.

Satelity sa dopravujú na plánované miesta pomocou nosných rakiet *Delta* alebo pomocou raketoplánov odpaľovaných z vojenskej leteckej základne (kozmodrómu) v Cape Canaveral⁵⁶ na Floride (obr. 2.18, angl.).



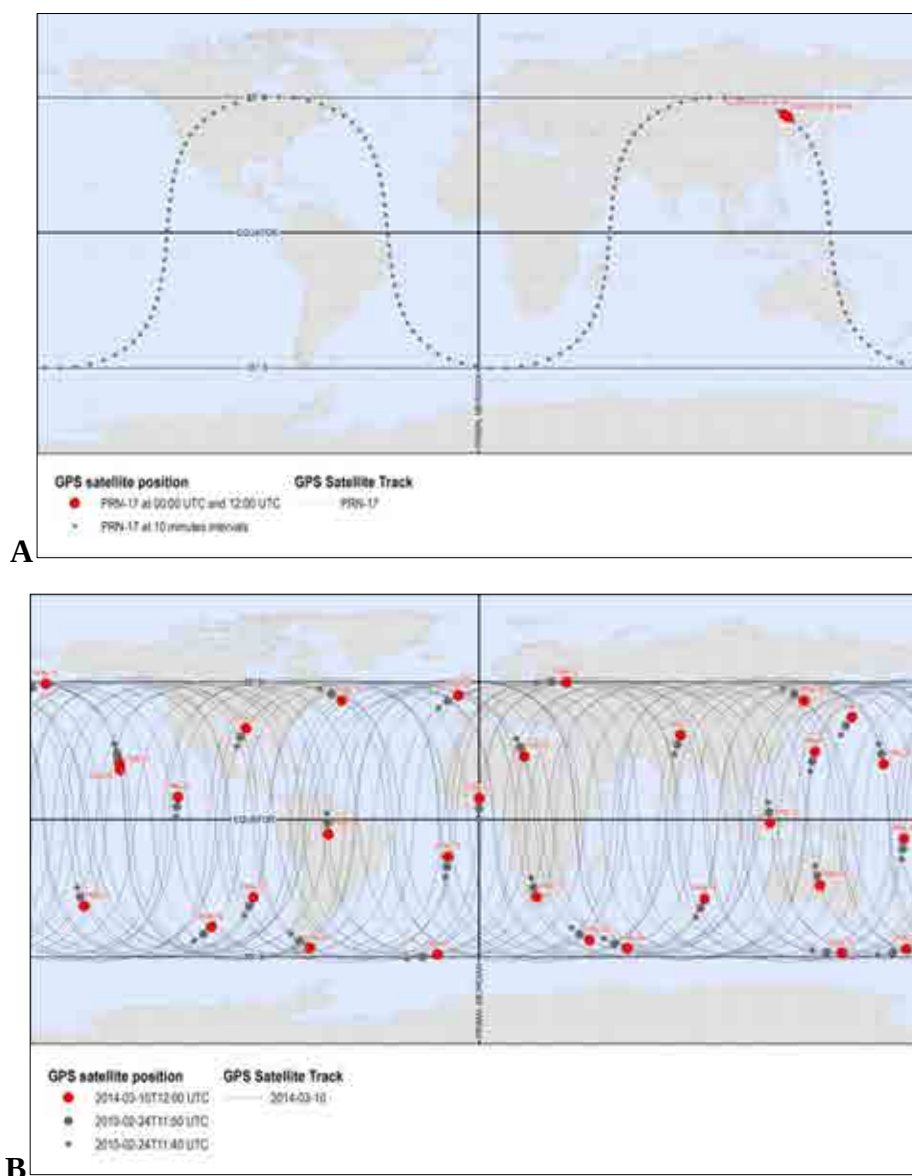
Obř. 2.18: Raketa Delta v príprave a na odpaľovacej rampe pre vynesenie satelitov GPS do vesmíru z vojenskej leteckej základne v Cape Canaveral (A); foto niektorých odpaľovacích rámp amerického kozmodrómu v Cape Canaveral (B); Cape Canaveral (Florida) Air Force Station (C).

Významným rozdielom medzi satelitmi *Block I* a *Block II* bol ten, že satelity *Block II* mali možnosť modifikovať vysielané kódy, a tak obmedziť civilných užívateľov. Od roku 1997 sa do kozmu vysielali satelity zlepšeného typu *Block IIR* so životnosťou 10 rokov. Ako

⁵⁶ Cape Canaveral Air Force Station je základňa pre štarty kozmických nosičov Ministerstva obrany USA na východnom pobreží. Nachádza sa na Myse Canaveral v štáte Florida. Základňa susedí s Kennedyho vesmírnym strediskom.

frekvenčné normály pri satelitoch typu *Block II* slúžili dvojce rubídiové a dvojce céziové hodiny. Satelity typu *Block IIR* využívajú atómové hodiny na báze vodíkových maserov, ktoré sú o jeden rad presnejšie, než sú hodiny u typu *Block II*. Vyššia, dokonalejší rad satelitov *Block IIR* sú satelity rady *IIR-M*. Satelity *Block IIF* sú vypúšťané na svoje orbity v skupinách. Od roku 2016 sú vo vývoji vyššie rady satelitov typu *Block IIIA*, *IIIB* a *IIIC* s presnejšími a dokonalejším chodom hodín a jednotlivé technické parametre súčastí satelitov majú vyšší štandard.

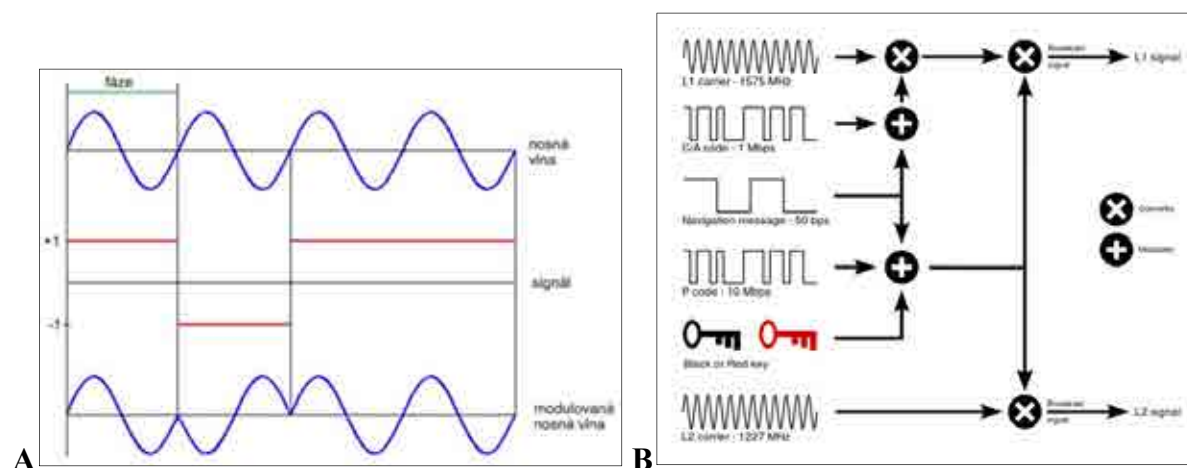
Obr. 2.19 (angl.) prezentuje trajektóriu obežnej dráhy satelitu GPS (*Block IIF*) s PRN⁵⁷-17 za 24 hod. (24. február 2010) a celú konšteláciu kozmického segmentu GPS k 10. marcu 2014 o 12:00 UTC.



Obr. 2.19: Trajektória obežnej dráhy satelitu GPS (Block IIF) s PRN-17 za 24 hodín (24.2.2010) (A); celá konštelácia kozmického segmentu GPS (trajektórie satelitov) 10.3.2014 o 12:00 UTC (B).

⁵⁷ Kódy PRN: Pseudonáhodný(é) šum(y); PRN (z angl. *Pseudo Random Noise*).

GPS je založený na využití vysoko presných stabilných časových a frekvenčných informácií vysielaných satelitmi v podobe zložitého signálu vytvoreného sústavou koherentných frekvencií. Rozhodujúcim prvkom k dosiahnutiu vyššej presnosti sú stabilné signály odvodené zo základnej frekvencie L -pásma s frekvenciou $f_0 = 10,23$ MHz udržiavanej atómovými hodinami na palube satelitu (štyri atómové hodiny: dvojica rubídiových a dvojica céziových). Celočíselným násobením základnej frekvencie sa získajú dve nosné rádiové vlnenia v L -pásme, označené ako vysielacie vlnenia $L1$ a $L2$ s frekvenciami $f_1 = 1,57542$ GHz a $f_2 = 1,22760$ GHz ($f_1 = 154 \cdot f_0$ a $f_2 = 120 \cdot f_0$). Nosné vlny sú modulované tzv. pseudonáhodnými kódmi (PRN) (z angl. *Pseudo Random Noise*) využívanými na meranie pseudovzdialeností a tzv. navigačnou správou, ktorá obsahuje údaje o polohe satelitu, stave palubných hodín a iné informácie o celom GPS (obr. 2.20, čes., angl.). Na nosnej vlne $L1$ sa vysielajú dva pseudonáhodné kódy, t.j. presný P -kód (z angl. *Precise*⁵⁸, slov. *presný*) a menej presný C/A -kód (z angl. *Coarse Acquisition*, slov. *hrubé určenie polohy*). Satelity sa identifikujú poradovými číslami, ktoré súvisia s úsekom P -kódu vysielaného daným satelitom.



Obr. 2.20: Schéma fyzikálneho princípu modulácie vln (A); schéma modulácie signálu vysielaného satelitom GPS (B).

Frekvencia $L1$ (1575,42 MHz, vlnová dĺžka 19,05 cm) je modulovaná dvomi meracími kódmi reprezentovanými tzv. pseudonáhodnými šumami PRN. Prvý, merací kód P -kód, môže byť pre vojenské účely zašifrovaný a potom sa označuje ako Y -kód. Druhý, merací kód C/A -kód, nie je šifrovaný. Frekvencia $L2$ (1227,60 MHz, vlnová dĺžka 24,45 cm) je modulovaná len P -kódom (resp. aj jeho šifrovaným variantom, t.j. Y -kódom). Väčšina civilných prijímačov GPS používa pre meranie len C/A -kód, výnimku tvoria veľmi presné geodetické prijímače GPS, ktoré prijímajú obe frekvencie, t.j. využívajú aj P -kód. Prevádzkovateľ GPS (Ministerstvo obrany USA) má možnosť kedykoľvek znížiť presnosť tohto systému tzv. *selektívnou dostupnosťou* (SA – z angl. *Selective Availability*). Tá zníži presnosť C/A -kódu tak, že pozemné prijímače môžu vypočítať svoju pozíciu s chybou až 100

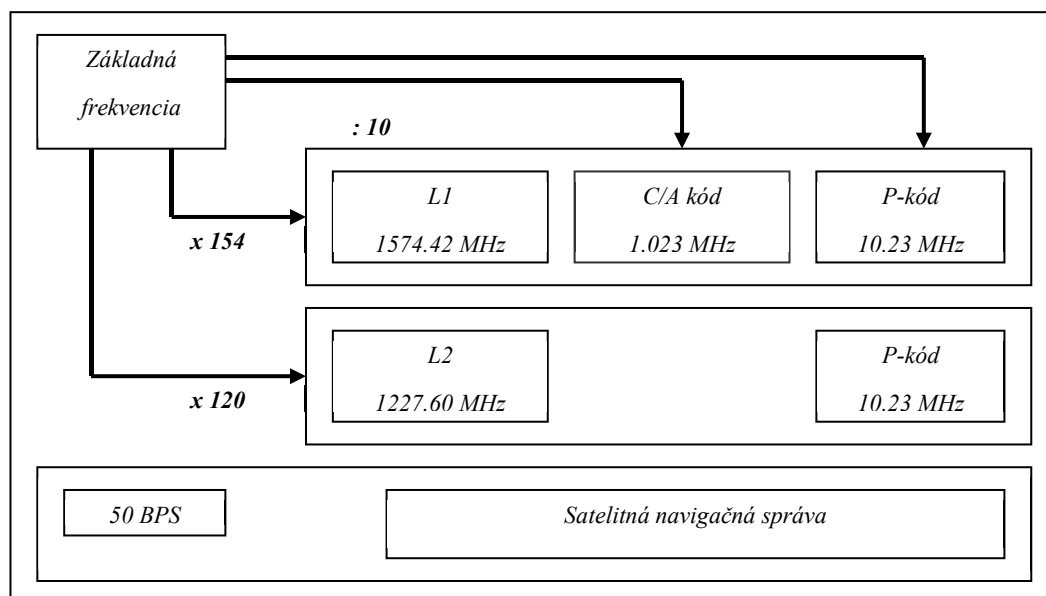
⁵⁸ Niekedy tiež označovaný ako „Protected“ kód.

m. SA od 2.5. 2000 je nariadením vtedajšieho prezidenta USA George W. Busha⁵⁹ pre civilných užívateľov GPS zrušené.

V tab. 2.5 sú zahrnuté základné údaje o jednotlivých zložkách satelitom vysielaných signálov GPS (základná frekvencia je kvôli kompenzácii relativistického efektu znížená o 0,005 Hz) a schéma na obr. 2.21 znázorňuje odvodzovania frekvencií jednotlivých signálov GPS.

Tab.2.5: Zložky signálu GPS.

<i>Zložka</i>	<i>Frekvencia (MHz)</i>
Základná frekvencia <i>L</i>	$f_0 = 10,23$
Nosná frekvencia <i>L1</i>	$154 \cdot f_0 = 1575,42$
Nosná frekvencia <i>L2</i>	$120 \cdot f_0 = 1227,60$
<i>P</i> -kód	$f_0 = 10,23$
<i>C/A</i> -kód	$f_0/10 = 1,023$
Navigačná správa	$f_0/204600 = 50 \cdot 10^{-6}$



Obr. 2.21: Schéma odvodzovania frekvencií jednotlivých signálov GPS.

Signály modelujúce prvú nosnú frekvenciu *L1* sa označujú ako signály v rámci tzv. štandardnej polohovej služby (*SPS*) (z angl. *Standard Positioning Service*)⁶⁰ GPS. Frekvencia *L2* je používaná v rámci pre tzv. presnej polohovej služby (*PPS*) (z angl. *Precise Positioning*

⁵⁹ George W. Bush, celým menom George Walker Bush (* 6. júl 1946, New Haven, Connecticut) je americký politik, v poradí 43. prezident Spojených štátov amerických.

⁶⁰ Požiadavky na presnosť sú definované nasledovne: horizontálna presnosť do 100 m, vertikálna presnosť do 156 m, presnosť času do 167 nanosekúnd (nsek.).

Service)⁶¹ GPS a umožňuje merať oneskorenie signálu pri prechode ionosférou. Táto frekvencia je využívaná len špeciálne vybavenými prijímačmi GPS. Okrem C/A a P-kódu je oboma nosnými frekvenciami prenášaný ešte tzv. *binárny kód*, čo je satelitná „navigačná správa“, ktorá je kódovaná pomocou fázového posunu nosných vln.

Čo je *navigačná správa*? Navigačná správa je súbor údajov vysielaný každým satelitom s údajmi o parametroch hodín na palube satelitu, dráhových parametroch satelitu, zdravotnom stave (prípadne poruchách) satelitu, jeho pozícii a o rôznych korekčných údajoch.

Navigačnú správu tvoria nasledujúce bloky:

- Prvý (1.) blok obsahuje koeficienty kvadratického polynómu modelu chodu satelitných hodín, bindikátory epochy vysielaných dát a ďalšie údaje (poradové číslo týždňa GPS, koeficienty kvadratického polynómu slúžiaceho na korekciu hodín a parametre, ktoré indikujú stav satelitu).
- Druhý a tretí (2. a 3.) blok obsahuje vysielané dráhové parametre daného satelitu (dráhové elementy daného satelitu a parametre ich zmien). Údaje o pozíciách (efemeridy) sú dekódované prijímačmi.
- Štvrtý a piaty (4. a 5.) blok obsahuje údaje o stave ionosféry, informácie o čase UTC a tzv. almanach, kde sú efemeridy pre ostatné satelity, t.j. približné údaje o polohe ostatných satelitov.

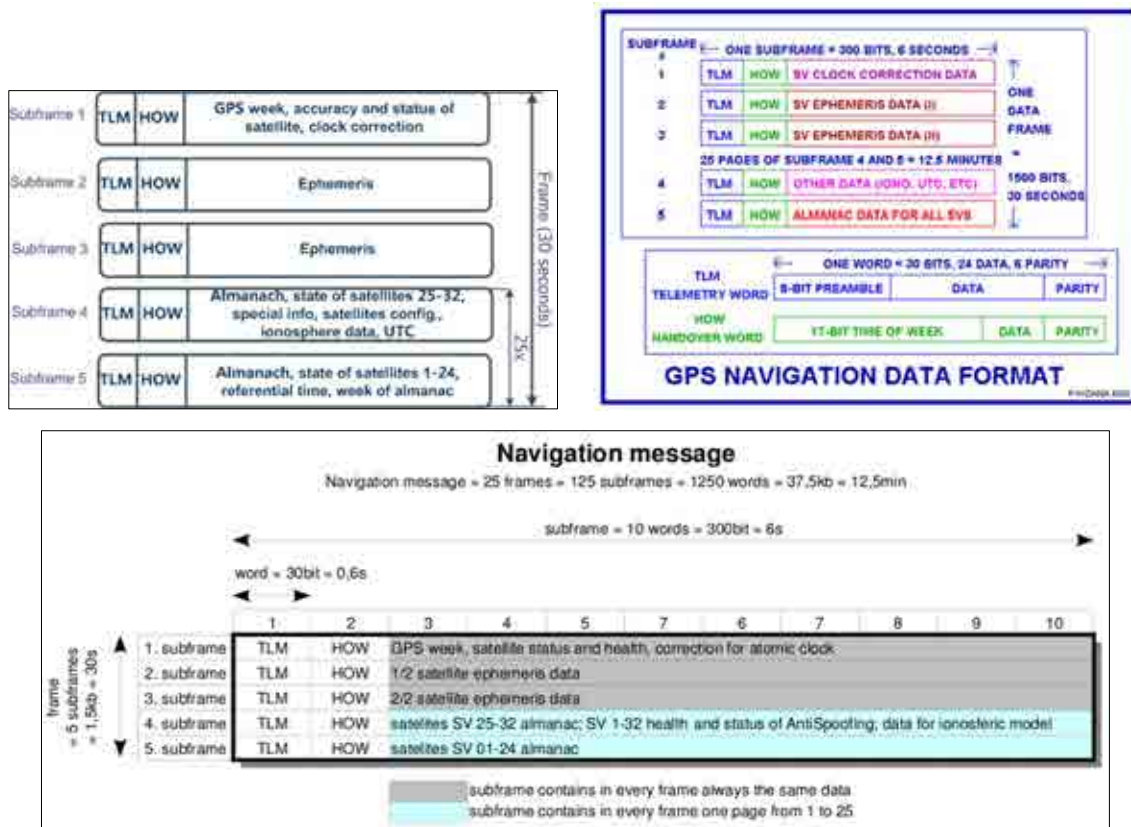
Obsah blokov sa postupne mení v každej navigačnej správe (obr. 2.22, angl.). Celý cyklus sa zopakuje po vyslaní 25 správ. Čas vyslania kompletnej informácie teda vyžaduje 12,5 min. Efemeridy v navigačnej správe popisujú obežnú dráhu satelitov pre krátky úsek ich orbity. Prijímač GPS obyčajne získa nové efemeridy každú hodinu, alebo môže používať staré dáta až po dobu štyroch hodín bez výrazného ovplyvnenia výsledkov merania. Almanachy obsahujú parametre obežných dráh všetkých satelitov (efemeridy). Znalosť aktuálnych almanachov môže výrazne znížiť dobu potrebnú pre naštartovanie prijímača GPS a získanie signálu.

Obsah navigačnej správy (zhrnutie) a údaje o jej obmene:

- čas vysielania začiatku správ,
- Keplerovské efemeridy satelitu,
- údaje umožňujúce korigovať presne čas a vysielanie satelitu,
- stav satelitu (chorý, zdravý),
- almanach, kde sú informácie o efemeridách ostatných satelitov,
- 12,5 min. - 25 správ.

K ďalším častiam, ktoré tvoria vybavenie satelitu, patrí rádiový vysielač, pamäťové médiá, počítače, zdroj energie, ktorý slúži na prevod slnečnej energie na elektrickú. Neodmysliteľnou časťou je pohonný systém riadiaci pohyby satelitov.

⁶¹ Požiadavky na presnosť sú definované nasledovne: horizontálna presnosť do 17,8 m, vertikálna presnosť do 27,7 m, presnosť času do 100 nsek.



Obr. 2.22: Rôzne schématické znázornenia navigačnej správy GPS.

Riadiaci segment

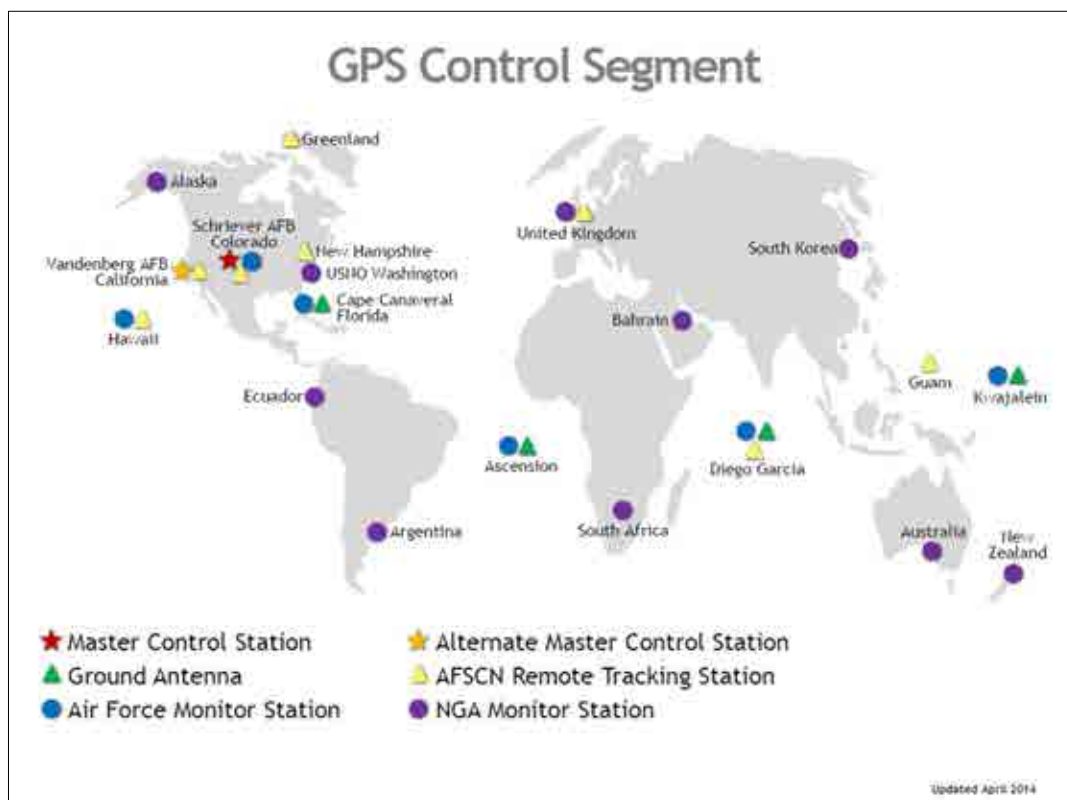
Riadiaci segment zodpovedá za nepretržitú činnosť GPS. Z užívateľského hľadiska jeho prvou úlohou je neustále obnovovanie dráhových elementov (efemeridy) v navigačných správach a spojitie meranie pseudovzdialeností medzi *monitorovacou stanicou* (MS, z angl. *Monitoring Station*) a okamžitými polohami satelitov. Aby bolo možné túto úlohu plniť, riadiaci segment pozostával v začiatkoch fungovania GPS z piatich MS⁶², neskôr šesť MS zabezpečujúcich permanentné meranie na satelity GPS. Jedna MS je súčasne hlavným riadiacim centrom (MCS) (z angl. *Master Control Station*, slov. *hlavná riadiaca stanica*) a štyroch, neskôr piatich pozemných vysielacích staníc MS. MS sú zoskupené v tzv. „vojenskej sieti GPS“ (obr. 2.23, angl.). (Betz, 2015; Dodel und Häupler, 2009; Gleason and Gebre-Egziabher, 2009; Hofmann-Vellenhof et al., 2008; Jeffrey, 2015; Jin et al., 2014; Leick et al., 2015; Sedlák, 2003, 2012; Sedlák et al., 2009; Sedlák a Lošonczi, 2011).

MCS je umiestnený na leteckej základni Falcon⁶³ v Colorado Springs v USA (štát Colorado). Ďalšie MS sú na Havaii a Kwajalein (ostrovy v Tichom oceáne), Diego Garcia

⁶² S postupom času a najmä s rozvojom GPS sa počet monitorovacích staníc zmenil na šesť.

⁶³ Hlavná riadiaca stanica (MCS - *Master Control Station*) je umiestnená v opevnenom bunkri v Skalistých horách na Schrieverovej vojenskej leteckej základni (bývalej Falcon vojenskej leteckej základni) v Colorado Springs (Colorado, USA) a má špeciálnu ochranu. Výstavba základne začala v roku 1983, sprevádzkovaná bola v roku 1985 pod názvom „Falcon Air Force Station“. 5. júna 1998 bola pomenovaná na počesť generála letectva Bernarda Adolpha Schrievera, priekopníka vývojových programov balistických rakiet.

(ostrov v Indickom oceáne), Ascencion (ostrov v Atlantickom oceáne) a Cape Canaveral (Florida), a to vždy po jednej MS. Komunikačnú výbavu (anténu) pre zavedenie dát do satelitov majú vysielacie stanice v Ascencion, Diego Garcia, Kwajalein a Cap Canaveral. Sú to tzv. *povelové MS*, ktoré ako jediné majú oprávnenie komunikovať so satelitmi GPS. Satelity GPS sa vynášajú na svoje obežné dráhy do vesmíru z už skôr spomínaného kozmodrómu - Air Force Station v Cap Canaveral na Floride.



Obr. 2.23: Riadiaci segment GPS s rozmiestnením jeho komponentov (staníc GPS).

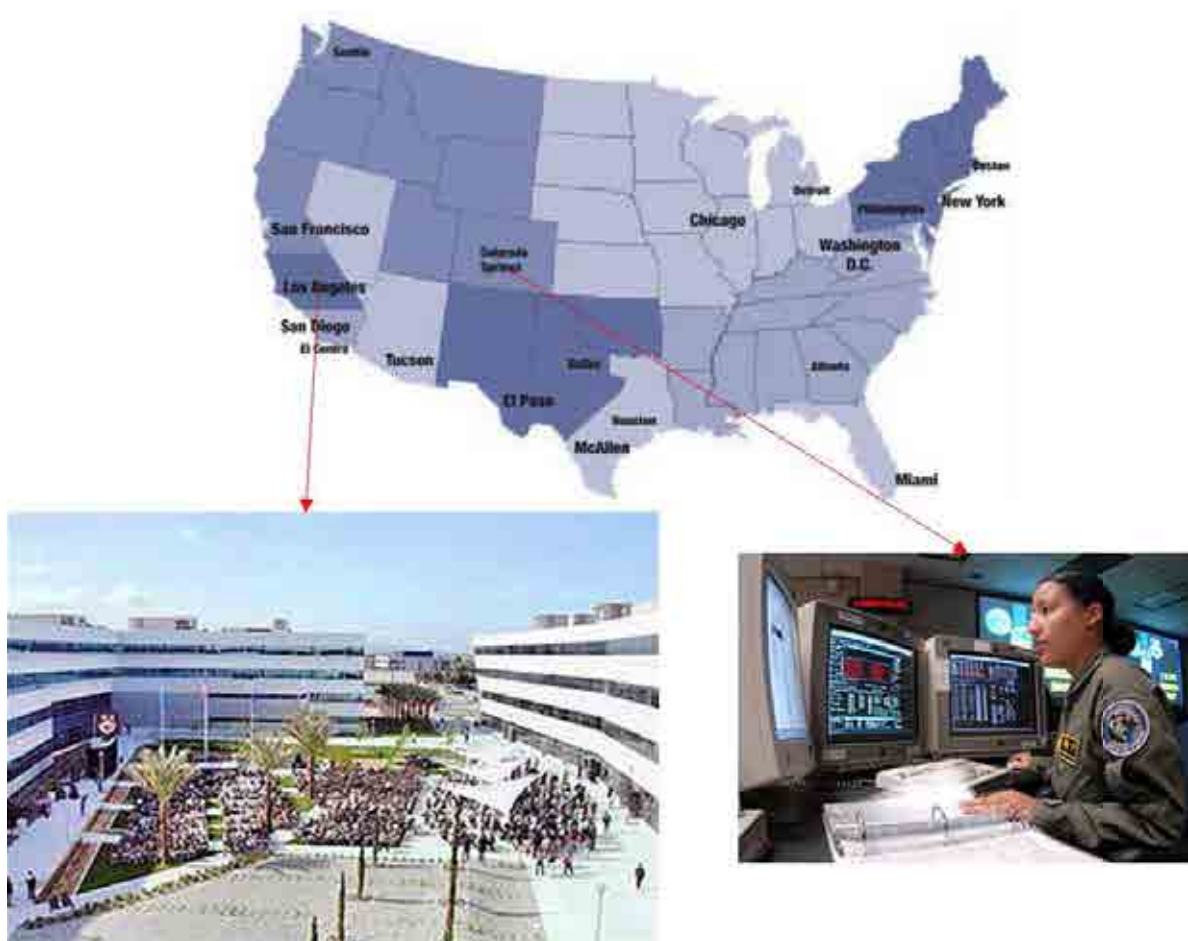
Zhrnutie - riadiaci segment GPS sa skladá z niekoľkých častí:

- Hlavná riadiaca stanica (MCS), (tiež hlavné riadiace centrum) je na Schrieverovej vojenskej leteckej základni USAF (z angl. *United States Air Force*) v Colorado Springs v štáte Colorado, USA.
- Záložná riadiaca stanica (BMCS, z angl. *Backup Master Control Station*) (tiež záložné veliteľstvo GPS) je umiestnená na vojenskej leteckej základni Vandenberg (Vandenberg AFB, z angl. *Vandenberg Air Force Base*) na území mesta El Segundo, okres Los Angeles v štáte California, USA.
- 6 MS (vojenské). Pôvodných päť vysielacích MS, t.j. stanice pre príjem signálov zo satelitov a pre komunikáciu so nimi prostredníctvom pozemnej antény (angl. *Ground Antenna*), ktoré sú umiestnené na základniach USAF: Kwajalein, Diego Garcia, Ascension, Havaj, Colorado Spring a dodatočne, neskôr jedna MS aj v Cape Canaveral (Florida). Štyri MS (Ascencion, Diego Garcia, Kwajalein a Cap Canaveral) sú povelové stanice.
- 18 MS, ktoré sú umiestnené na základniach USAF: Havaj, Colorado Springs, Cape Canaveral, Ascension, Diego Garcia, Kwajalein a k nim patria MS spravujúce NGA

(National Geospatial-Intelligence Agency, Virginia): Fairbanks (Aljaška), Papeete (Tahiti), Washington DC (USA), Quito (Ekvádor), Buenos Aires (Argentína), Hermitage (Anglicko), Pretória (Južná Afrika), Manama (Bahrain), Osan (Južná Kórea), Adelaide (Austrália) a Wellington (Nový Zéland). Sú to taktiež vojenské *MS*, majúce testovacie a technicko-vývojové poslanie pre *GPS* a tvoria akúsi výskumnú bázu *GPS*.

MS vybavené céziiovými frekvenčnými normálmi a prijímačmi s *P*-kódmi spojitou merajú pseudovzdialenosti na všetky satelity nad horizontom. Informácie sú špeciálnymi komunikačnými prostriedkami dopravené do hlavného riadiaceho centra (*MCS* v Colorado Springs), kde sa vykonáva globálne spracovanie a počítajú sa efemeridy na všetky satelity *GPS*.

V *MCS* sa taktiež určujú korekcie atómových hodín satelitov na tzv. *systémový čas GPS* (odvodený od hviezdneho času). Z týchto údajov sa zostaví *navigačná správa*, ktorá sa prenáša do pozemných vysielacích antén vo vysielacích (povelových) *MS* a prostredníctvom týchto vysielacích antén sa správa vysíla na satelity. Obr. 2.24 podáva geografický a pohľad na záložné veliteľstvo *GPS* a na *MCS*. Obr. 2.25 (angl.) prezentuje pohľad na *MS* na Havaji a na muzeálny exponát *MS GPS* v Air Force Space and Missile Museum v Cape Canaveral na Floride, USA.



Obr. 2.24: Navstar Headquarters v El Segundo - záložné veliteľstvo *GPS* (vľavo dole); *MCS* v Colorado Springs - operátorka riadiaceho strediska na leteckej základni Schriever monitorujúca stav kozmického segmentu *GPS* (vpravo dole).



Obr. 2.25: Monitorovacia stanica GPS na Havajii (hore); monitorovacia stanica GPS v Museum Rocket Garden, Air Force Space and Missile Museum v Cape Canaveral, Florida, USA (dole).

Sieť šiestich pozemných *MS* je oficiálna sieť *GPS*. Je to vojenská sieť *GPS* pre určovanie vysielaných efemeríd, ktoré popisujú obežné dráhy satelitov pre krátky úsek ich orbít. Okrem vyššie uvedenej „vojenskej siete *GPS*“ pracuje aj niekoľko nezávislých tzv. „civilných“ medzinárodných rozsiahlejších monitorovacích sietí *GPS*, ktoré tiež určujú presné efemeridy na satelity *GPS*. Tieto siete sa však nezúčastňujú na riadení a činnosti *GPS*. Príkladom globálnej celosvetovej siete s 20 civilnými *MS* je sieť *CIGNET* (z angl. *Cooperative International GPS Network*, slov. *Kooperatívna medzinárodná sieť GPS*) koordinovaná Národnou geodetickou službou USA. Niektoré z prijímačov sú umiestnené v miestach *VLBI* (z angl. *Very Long Baselines Interferometry*, slov. *interferometrické metódy s veľmi dlhými základnicami*) alebo so zariadeniami *SLR* (z angl. *Satellite Laser Ranging*, slov. *laserové meranie vzdialenosti na satelity*). Tým je možné permanentné prepojenie sietí *GPS* s *VLBI* a *SLR*. V roku 1992 sa Medzinárodná geodetická federácia (*FIG*) (angl. *International Federation of Surveyors*, z fran. originálu *Fédération Internationale des Géomètres*) rozhodla zriadiť Medzinárodnú geodynamickú službu na báze *GPS* (angl. *International Geo-Dynamic GPS Service*). Je to ďalšia civilná *GPS* sieť, ktorá okrem sledovania geodynamických javov má za úlohu určovať aj presné dráhy satelitov *GPS*. Výsledky meraní získané z asi 25 permanentných *MS* tejto služby spolu s dráhovými parametrami sú pre vedecké využitie k dispozícii prostredníctvom počítačových sietí.

Užívateľský segment

Užívateľský segment tvoria prijímacie aparatúry GPS (prístroje GPS, navigátori GPS, prijímače GPS alebo rovery GPS) od malých vreckových navigačných prijímačov až po presné geodetické a nekomerčné aparatúry.

Základne užívateľské vybavenie aparatúry GPS pozostáva z (Sedlák a Lošonczi, 2011; Sedlák, 2012):

- prístrojovej časti,
- softvérovej časti.

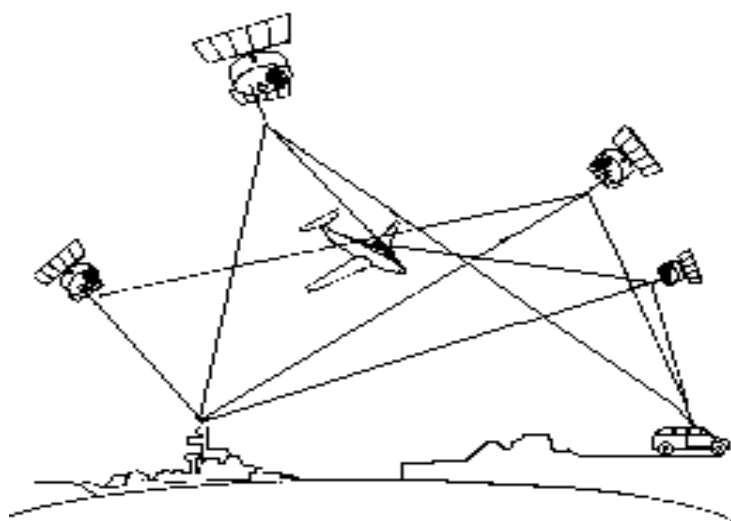
Prístrojovú časť tvorí anténa s predzosilňovačom, prijímač s ovládacím panelom, displejom a registračným zariadením, zdrojom energie a prepojovacími káblami. Rôzni výrobcovia ponúkajú prijímače GPS jedno a dvojfrekvenčné s alebo bez P-kódu. Pri použití rovnakej technológie GPS merania (pozorovania) a spracovania sú z hľadiska inžinierskych potrieb takmer rovnocenné. Malé rozdiely sú v hmotnosti, rozmeroch, počte kanálov, veľkosti pamäte, softwarovom vybavení a cenových reláciách.

Softvérovú časť tvoria balíky programov (softvérov) umožňujúcich plánovanie pozorovacích kampaní, spracovanie nameraných údajov a vyrovnanie 3D súradníc. Programové vybavenie dodávané jednotlivými výrobcami je spravidla kompatibilné iba s ich prístrojovým vybavením.

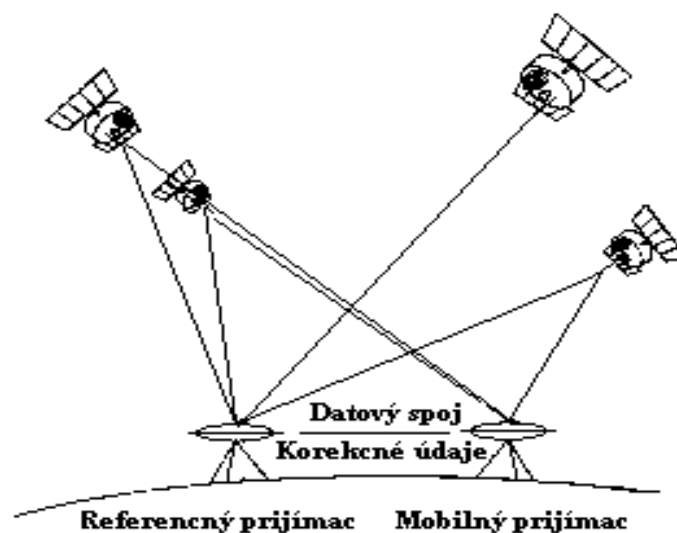
Prijímače GPS vykonávajú na základe prijatých signálov zo satelitov predbežné výpočty polohy, rýchlosti a času. Pre výpočet všetkých štyroch súradníc (x , y , z , t) je potrebné prijímať signál aspoň zo štyroch satelitov. Tieto prijímače sú používané k navigácii, určovaniu polohy, meračstvu, stanoveniu presného času ale i k iným účelom (Sedlák et al., 2009; Sedlák, 2012):

- a) Navigácia v 3D priestore je základnou úlohou GPS (obr. 2.26). Navigačné prijímače GPS sú vyrobené pre lietadlá, lode, pozemné vozidlá, kozmické telesá a sú tiež v ručnom prevedení.
- b) Presné stanovenie polohy je možné pri použití referenčných prijímačov GPS umiestnených na miestach so známou pozíciou, ktorá potom umožňuje získať korekcie pre opravu výpočtov z mobilných staníc (obr. 2.27). Príkladom použitia potom môžu byť meračské práce, vytyčovanie geodetických sietí, meranie súvisiace s pohybom litosférických platní⁶⁴ zemskej kôry (geodynamické pohyby) a pod.
- c) Ďalším možným použitím GPS je poskytovanie presného časového signálu a prípadne kmitočtového štandardu. Špeciálne k tomu účelu vyvinuté prijímače GPS potom umožňujú pre potrebu astronomických observatórií, telekomunikačných zariadení a laboratórií každého druhu nastaviť presný čas a prípadne i presnú frekvenciu.

⁶⁴ Vrchná časť zemskej kúry je rozsekaná do litosférických platní, ktoré sa navzájom v zemskej kôre pohybujú (geodynamické pohyby). Slovensko patrí do euroázijskej litosférickej dosky, ktorá sa každým rokom pohybuje asi o 2,5 cm smerom na západ (je to tzv. západný drift).



Obr. 2.26: Navigácia pomocou GPS.



Obr. 2.27: Diferenciálne meranie polohy pomocou GPS.

Prijímače GPS je možné rozdeliť do skupín podľa rôznych kritérií (Sedlák, 2012):

- Podľa spôsobu použitia rozlišujeme prijímače GPS:
 1. *Letecké prijímače GPS*: Sú obecné používané pre účely navigácie a stanovenie výšky letu. K dispozícii je široká škála prijímačov, ktoré môžu vyhovieť akýmkoľvek finančným možnostiam.
 2. *Lodné prijímače GPS*: Sú využívané výlučne pre navigáciu.
 3. *Kozmické prijímače GPS*: Používajú sa pre účely satelitnej navigácie a stanovenie výšky letu. Od bežných prijímačov GPS sa odlišujú predovšetkým antiradiačným obalom a tiež cenou.
 4. *Ručné prijímače GPS*: Dnes je už k dispozícii široká škála týchto prijímačov. Mnohé z nich sú určené k špeciálnym účelom, ako je pozemná, prípadne ručná navigácia, navigácie malých lietadiel, pre priemyselné mapovanie a pod.

5. *Mapovacie prijímače GPS*: Sú určené k získavaniu podkladov pre tvorbu máp. Bežne sú vybavené veľkou kapacitou vnútornej pamäti pre uchovávanie nameraných údajov, prípadne textových komentárov k týmto údajom.
 6. *Geodetické (meračské) prijímače GPS*: Sú prijímače určené k najpresnejším meračským účelom, najmä geodetickým (obr. 2.28).
 7. *Časovacie prijímače GPS*: Sú určené k jednému účelu - generovať presný čas.
 8. *OEM moduly*: Sú to holé dosky prijímačov GPS, určené k zabudovaniu do iných prístrojových zariadení.
 9. *PC karty*: Jedná sa jednak o bežné karty do počítača, jednak o karty štandardu PCMCIA (z angl. *PC card Computer Memory International Association*, slov. *pamäťová karta PC medzinárodnej asociácie*).
- Podľa spôsobu merania (pozorovania) rozdeľujeme prijímače GPS do dvoch skupín:
 1. *Prijímače GPS založené na sledovaní PRN kódu*: Do tejto skupiny patria predovšetkým prístroje pre navigačné účely. Je možné ich použiť aj pre zber dát pre potreby mapovania, avšak je treba mať na pamäti presnosť získaných výsledkov a tomu podradiť i mierku výslednej mapy.
 2. *Prijímače GPS založené na fázovom meraní*: Tieto prístroje sú určené predovšetkým pre geodetické účely. Pri práci v teréne rovnako používajú PRN-kódy pre stanovenie polohy a času, ale pri následnom spracovaní sú spracovávané výsledky práve fázových meraní pre získanie veľmi presných polôh. Presnosť stanovenia základne sa udáva na 1 cm (1 ppm⁶⁵ dĺžky základne).

Prijímače GPS pre fázové meranie môžu byť:

 - *Jednofrekvenčné* – pracujú iba s frekvenciou *L1*. Vo všeobecnosti možno povedať, že sú menej presné (4 ppm pre statické metódy do vzdialenosti 10 km) a majú len C/A-kód.
 - *Dvojfrekvenčné* – pracujú aj s frekvenciou *L2*. Je ich nutné používať pre väčšie vzdialenosti (bez *P*-kódu alebo s *P*-kódom na jednej, prípadne na oboch frekvenciách).
 - Podľa počtu súčasne sledovaných satelitov delíme prijímače GPS na:
 1. *Jednokanálové prijímače GPS*: Sú vybavené jedným vstupným kanálom, takže pri sledovaní viac satelitov musí postupne prepínať tento vstupný kanál na jednotlivé satelity. V súčasnosti sa jednokanálové prijímače GPS nevyrábajú.
 2. *Viackanálové prijímače GPS*: Majú dostatočný počet vstupných kanálov (5, 6 a viac), aby mohli súčasne sledovať všetky dostupné satelity.
 3. *Hybridné prijímače GPS*: Predstavujú určitý medzistupeň medzi oboma vyššie spomenutými prijímačmi, kde prijímač je vybavený viacerými vstupnými kanálmi (dvoma, troma). Keďže počet kanálov je nedostačujúci pre sledovanie všetkých dostupných satelitov, preto musí byť každý vstupný kanál opäť prepínaný medzi satelitmi. Počet satelitov, ktoré pripadajú na jeden kanál, je však nižší než v prvom prípade. V súčasnosti je výroba hybridných prijímačov GPS už ukončená.

⁶⁵ Ppm (z angl. parts per million) je označenie jednej milióntiny, t.j. ako vyjadriť zlomok – milióntinu – celým číslom. Napr. zápis 45 ppm znamená 45 milióntin, t. j. 0,000045, alebo 45×10^{-6} , či 0,0045 %, prípadne 0,045 ‰.



Obr. 2.28: Ukážka geodetických prijímačov GPS.

K spracovaniu meraní *GPS* (pre presné geodetické a iné veľmi presné meranie) je potrebné špeciálne programové vybavenie, ktoré dodáva výrobca ako súčasť prístroja. Okrem toho existujú aj programy, ktoré sú orientované na spracovanie komplexných projektov s veľkým objemom pozorovaní a pozorovacích staníc. Okrem súradníc majú možnosti získať aj iné údaje, napr. dáta o dráhach satelitov, atmosferické korekcie a pod.

2.1.6 Čas GPS

Čas ako štvrtý rozmer časopriestoru má spolu s frekvenciou dôležitú úlohu vo všetkých prístrojoch a satelitoch *GPS*. Čas v *GPS* má dvojakú úlohu. Prvá spočíva v tom, že pomocou časových intervalov atómového času, ktoré sú určované s veľmi vysokou presnosťou, umožňuje získať presné veľmi dlhé vzdialenosti, druhá zase v tom, že dáva do vzájomného vzťahu súradnicový systém satelitov a polohu bodov na Zemi. Zabezpečiť realizáciu presnej časovej stupnice, resp. určovať jej vzťah k rotácii Zeme, je nad možnosti jedného laboratória, resp. observatória. Preto sa týmito úlohami zaoberá *Medzinárodná časová služba (ITM z angl. International Time Service)*.

Všeobecne sa historicky vytvorilo niekoľko základných časových systémov. V skutočnosti ide o časové stupnice, skrátene nazývané čas. Pre *GPS* má čas prioritný význam a rozoznávame nasledujúce druhy časov (Sedlák, 2003, 2012; Sedlák et al. 2009):

- *Atómový čas*, ktorý je založený na elektromagnetickom vlnení vznikajúcom pri kvantových prechodoch atómu.
- *Hviezdny a slnečný čas*. Sú to uhly odvodené od rotácie Zeme majúce zmysel času. Tradične ich nazývame rotačné časy.
- *Efemeridový čas*, ktorého meranie je definované pohybom Zeme okolo Slnka a ktorý sa v súčasnosti už nepoužíva.

- *Dynamický čas.* Je to súradnicový čas zahŕňajúci relativistické efekty vyplývajúce z pohybu planét. Určuje sa ako argumenty dynamických teórií pohybu Slnka, Mesiaca a planét slnečnej sústavy a tiež ako argumenty efemeríd týchto telies majúce zmysel času.

Každá skupina časov má rôzne modifikácie (podsystemy). Každá z časových stupníc je charakterizovaná nielen svojou definíciou, ale tiež i reálnou presnosťou závisiacou na spôsobe realizácie. Najviac modifikácií je založených na atómovej sekunde a tým na atómovom čase.

Medzi tieto časové modifikácie patrí (Sedlák a Lošonczi, 2011; Sedlák, 2012):

- koordinovaný svetový čas *UTC*,
- systémový čas *GPS*,
- pásmové časy.

V súčasnosti existujú dva základné spôsoby *odvodzovania času*:

- *z pohybu Zeme (astronomický čas)*,
- *z kmitania atómu (atómový čas)*.

Koordinovaný svetový čas - UTC (z angl. *Coordinated Universal Time*) vznikol ako nutnosť prispôbiť časovú stupnicu *atómového času* k *svetovému času* (*UT*) (z angl. *Universal Time*), ktorý je odvodený od rotácie Zeme. V dôsledku toho, že atómová sekunda je kratšia, než sekunda odvodená od rotácie Zeme, oba časy sú divergentné. Za jeden rok svetový čas zaostane za medzinárodným atómovým časom približne o jednu sekundu. Napr. od 1. januára 1958, kedy bol začiatok medzinárodného atómového času stotožnený so svetovým časom, rozdiel narastal a od 1. januára 1996 je to 30 sekúnd (Sedlák, 2003).

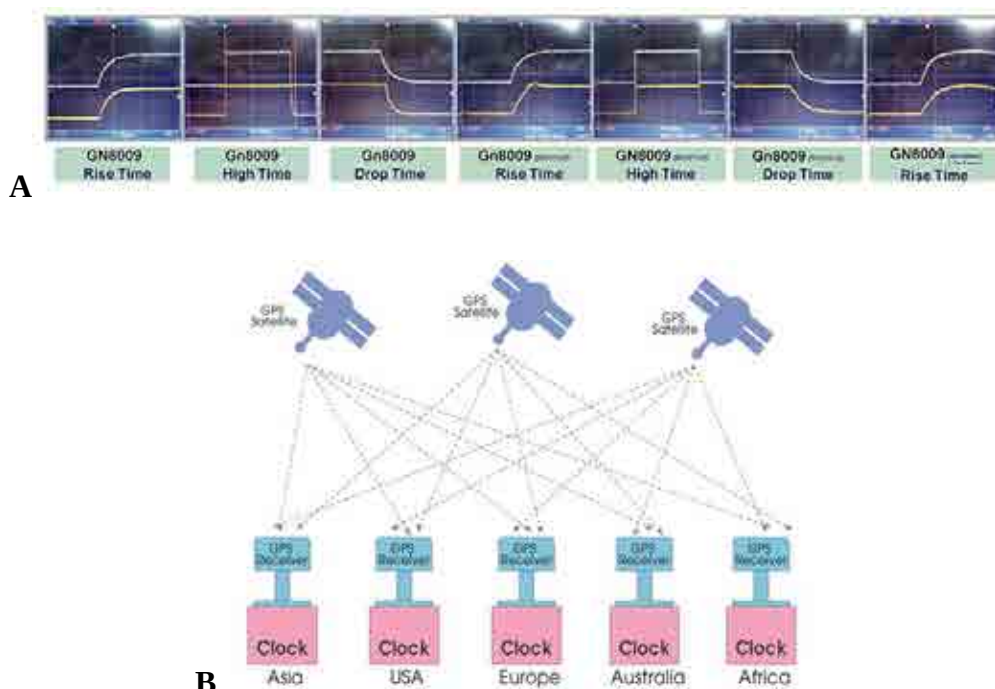
Systémový čas GPS - TGPS (z angl. *Time GPS*) pozostáva z dvoch hodnôt:

- poradového čísla *GPS-týždňa*,
- počtu sekúnd v rámci *GPS-týždňa*.

Systémový čas GPS počíta čas týždňa a v týždni pomocou atómových sekúnd. Atómová sekunda je kratšia ako sekunda odvodená od rotácie Zeme. Prispôsobenie sa zabezpečuje zaradením priestupnej minúty so 61 sekundami podľa potreby buď 30. júna alebo 31. decembra. Jeden týždeň má teda 604 800 atómových sekúnd. Počiatok systémového času *GPS* bol položený do okamihu 0:00 hod. *UTC* dňa 6 januára 1980. Jeho vzťah k medzinárodnému atómovému času je 19 sek. a k *UTC* (platí od 1. januára 1996) je to 11 sek.. Začiatok jednotlivých *GPS-týždňov* je vždy polnoc medzi sobotou a nedeľou.

TGPS sa riadi *hlavnými kontrolnými hodinami (MCC)* (z angl. *Master Control Clock*). S nimi sú synchronizované hodiny jednotlivých satelitov tak, aby odchýlka neprekročila 1 msek. Čas *GPS* sa uvádza v týždňoch (angl. *Time of Week*) a sekundách. Je synchronizovaný s časom *UTC* s presnosťou na jednu mikrosekundu. Rozdiel je len v tom, že čas *GPS* nemá zabudovaný mechanizmus prestupných sekúnd, a preto sa postupne oneskoruje za časom *UTC*. Satelitná navigačná správa každého satelitu obsahuje údaje, ktoré umožňujú prepočítať čas *GPS* na čas *UTC* a eliminovať tak toto oneskorenie. *Pásmové časy* sú odvodené od koordinovaného svetového času *UTC* a sú všeobecne známe a riadime sa nimi v občianskom živote. Satelit má svoj tzv. *satelitný čas*, ktorý si udržiava každý satelit samostatne. Za týmto účelom je každý satelit vybavený až štyrmi atómovými hodinami (dva cézieve a dva rubídiové atómové hodiny). Časy jednotlivých satelitov sú sledované pozemnými *MS* systémom tzv. *hlavných kontrolných/riadiacich hodín (MCC)* a v prípade potreby koordinované tak, aby sa udržal rozdiel oproti *TGPS* pod jednu milisekundu. Satelitná

navigačná správa každého satelitu obsahuje údaje nevyhnutné pre korekciu posunu medzi satelitným časom a *TGPS* (obr. 2.29 angl.).



Obr. 2.29: MCC koordinácia časov na satelitoch GPS.

V prijímačoch *GPS* v časových informáciách pre používateľa sa uvádza čas aktuálneho časového pásma a tiež posun pásma v hodinách vzhľadom na čas *UTC*. Tiež sa uvádza poradové číslo týždňa systémového času *GPS*, dátum s názvom dňa v týždni a poradové číslo aktuálneho dňa od začiatku roka označené ako *Juliánsky deň*⁶⁶. V prijímači *GPS* sa však uvádza dátum a počet *Juliánskych dní* od začiatku roka podľa *Gregoriánskeho kalendára*, ktorým sa riadime v občianskom živote. Ten je v porovnaní s *Juliánskym kalendárom* vpredu o 13 dní⁶⁷. Z doteraz uvedeného je zjavné, že pri určovaní polohy satelitu v *GPS* vystupujú

⁶⁶ Čo je to *Juliánsky dátum (JD)* ? *Juliánsky dátum* (skrátene *JD*) sú plynule počítané dni a ich zlomky od poludnia (až do 1. januára 1925 bol začiatok občianskeho dňa vždy na poludnie) svetového času 1. januára 4713 pr. n. l. (podľa *Juliánskeho kalendára*). Odvtedy ubehlo už skoro 2,5 milióna dní. *JD* sa veľmi dobre uplatnil v astronómii a aj ako premenná času v astronomických programoch. Pri výpočtoch môže v podobe jediného 64 bitového čísla vyjadrovať dátum s presnosťou okolo 1 milisekundy. Všimnime si, že časová jednotka používaná ako základ pre *JD* je jeden deň v svetovom čase, a že 0h UT zodpovedá zlomku *Juliánskeho dňa* 0,5.

⁶⁷ V *Juliánskom kalendári*, ktorý zaviedol cisár Júliu Cézar v r. 46 pred Kristom (pr.n.l.), dĺžka dvanástich mesiacov bola stanovená tak, aby dala 365 dní v obyčajnom roku. V priestupných rokoch bol pridaný jeden deň vo februári a rok mal 366 dní. Astronomická skutočnosť je však mierne odlišná, preto sa s ňou *Juliánsky kalendár* rozchádza rýchlosťou približne 1 deň za 128 rokov (11 min. 14s ek. za 1rok). *Juliánsky kalendár* sa používal až do konca 16. stor.. Keď už časová odchýlka kalendára bola neúnosná, pápež Gregor XIII. nariadil jeho úpravu a zaviedol *Gregoriánsky kalendár*. Prechod z *Juliánskeho kalendára* na *Gregoriánsky* prebehol v októbri 1582, tak ako to nariadil pápež Gregor XIII. Presnejšie, pre dátumy pred 4. októbrom 1582 sa používa počítanie prestupných rokov podľa *Juliánskeho kalendára* a pre dátumy po 15. októbri 1582 je použitý dnešný *Gregoriánsky kalendár*. Takto vzniká desaťdňová medzera v kalendári, ale žiadny skok v *JD* (*Juliánsky dátum*) alebo dňoch v týždni: jednoducho podľa pápežskej buly nastal po štvrtku 4. októbra 1582 (*Juliánsky*), podľa *JD* 2 299 159,5 hneď piatok 15. októbra 1582 (*Gregoriánsky*), podľa *JD* 2 299 160,5. Vynechanie desiatich dní v kalendári bolo nevyhnutné kvôli rozdielu medzi skutočnou dĺžkou roka a dĺžkou roka podľa *Juliánskeho kalendára*. Táto nepresnosť kvôli pričastému používaniu prestupných rokov narastala v priebehu niekoľkých storočí používania až na desať dní, takže bola nevyhnutná reforma. V niektorých krajinách, napr. v Rusku, sa *Juliánsky kalendár* používal až do prvých dekád dvadsiateho storočia. Preto sa napr. Októbrová revolúcia v Rusku podľa *Juliánskeho kalendára* odohrala v októbri, ale podľa *Gregoriánskeho kalendára* sa odohrala až v novembri. *Juliánsky kalendár* dodnes používa napr. pravoslávna cirkev na výpočet dátumu Veľkej noci. V *Juliánskom kalendári* je prestupný každý štvrtý rok, zatiaľ čo *Gregoriánsky kalendár* je prestupný každý štvrtý rok okrem koncov storočí, ktoré nie sú deliteľné 400 bez zvyšku (teda rok 2000 bol prestupný, pretože bol bez zvyšku deliteľný 400).

princiipiálne rozdielne časové systémy. To by samo o sebe nebol problém. Problémom je však skutočnosť, že ich presnosť určenia je rôzna. Systémy odvodené od atómového času sú realizované a reprodukovanie s vysokou presnosťou ($1 \cdot 10^{-9}$ sek.). Neumožňujú sami o sebe určiť polohu a orientáciu Zeme v priestore a tým aj vzájomnú polohu základných rovín a satelitu. Túto úlohu umožňuje splniť *hviezdny čas*, ktorý je odvodený od rotácie Zeme. Presnosť určenia je však podstatne nižšia (do $1 \cdot 10^{-4}$ sek.). Hviezdny čas pri určovaní polohy satelitov nevystupuje priamo, ale je realizovaný prostredníctvom uhlovej rýchlosti rotácie Zeme. Je dokázateľné, že chyba v určení hviezdneho času ovplyvní polohu satelitu. V GPS, ktorého satelity sa pohybujú po dráhach so sklonom $i = 55^\circ$, vo výške približne $h = 20\,000$ km sú extrémne polohové chyby: $d_{\max} = 1,92$ m, $d_{\min} = 1,10$ m v prípade, že systémový čas GPS je naviazaný na rotáciu Zeme s chybou $d_s = 0,001$ sek.

Systém prevodu časov vrátane TGPS je na <http://www.leapsecond.com/java/gpsclock.htm>.

2.1.7 Merné veličiny GPS

GPS je založený na jednosmernom prenose informácií zo satelitu do prijímača GPS za pomoci elektromagnetických vln. Fyzikálne vlastnosti týchto vln charakterizuje ich frekvencia f , perióda p , vlnová dĺžka λ a rýchlosť šírenia vln c . Jednotkou frekvencie je $1 \text{ sek.}^{-1} = 1 \text{ Hz}$, respektíve dekadické násobky MHz a GHz, jednotkou periódy je 1 sek., vlnovej dĺžky 1 m a rýchlosti msek.^{-1} .

Medzi jednotlivými parametrami platí vzťah (Leick et al., 2015; Sedlák, 2003, 2012; Sedlák et al., 2009; Sedlák a Lošonczi, 2011)

$$f = \frac{1}{p} = \frac{c}{\lambda} . \quad (2.1)$$

Fázou Φ periodickej vlny rozumieme bezrozmernú veličinu definovanú ako podiel časového intervalu $t - t_0$, počas ktorého dochádza k vlneniu a periódy p . Celočíselná časť Φ dáva informáciu o tom, koľko opakovaní vlnenia už prebehlo. Desatinná časť fázy sa nazýva fázový posun a je údajom o zlomku periódy, o ktorý sa vlnenie zmenilo relatívne k okamihu počiatku merania t_0 . Definícia okamžitej frekvencie je určená ako derivácia fázy Φ podľa času t

$$f = \frac{d\Phi}{dt} . \quad (2.2)$$

Fázu získame integráciou frekvencie medzi epochami t_0 a t podľa vzťahu

$$\Phi = \int_{t_0}^t f t . \quad (2.3)$$

V prípade, že frekvencia f je konštantná a pre fázu v okamihu t_0 platí $\Phi(t_0) = 0$, bude fáza signálu vyslaného satelitom

$$\Phi = f t . \quad (2.4)$$

Ak zohľadníme časový interval t_0 , ktorý je dôležitý pre šírenie signálu na vzdialenosť ρ od vysielača k prijímaču, v okamihu t bude pozorovaná fáza v mieste príjmu

$$\Phi = f(t - t_\rho) = f t - f \frac{\rho}{c}. \quad (2.5)$$

V prípade pohybujúceho sa vysielača alebo pohybujúceho sa prijímača je prijímaná frekvencia posunutá vplyvom Dopplerovského efektu. Znamená to, že prijatá frekvencia f_p sa líši od satelitom vyslanej f_s o hodnotu Δf . Ak zanedbáme relativistické efekty, je Δf úmerná radiálnej rýchlosti $v_\rho = d\rho/dt$ pohybu vysielača vzhľadom k prijímaču

$$\Delta f = f_p - f_s = -\frac{1}{c} v_\rho f_s. \quad (2.6)$$

2.1.8 Základné princípy merania pseudovzdialenosti GPS

Každý prijímač GPS obsahuje vlastný generátor, ktorý umožňuje generovať pre špecifický satelit odpovedajúci kód C/A PRN-kód rovnakou rýchlosťou, teda každú milisekundu⁶⁸. Generovanie tohto kódu je synchronné s časom GPS (TGPS). Prijímač GPS najprv musí pre neznámy satelit nájsť odpovedajúci PRN-kód a potom musí postupným posúvaním prijímačom generovanej sekvencie dosiahnuť úplnú zhodu oboch signálov (obr. 2.30).



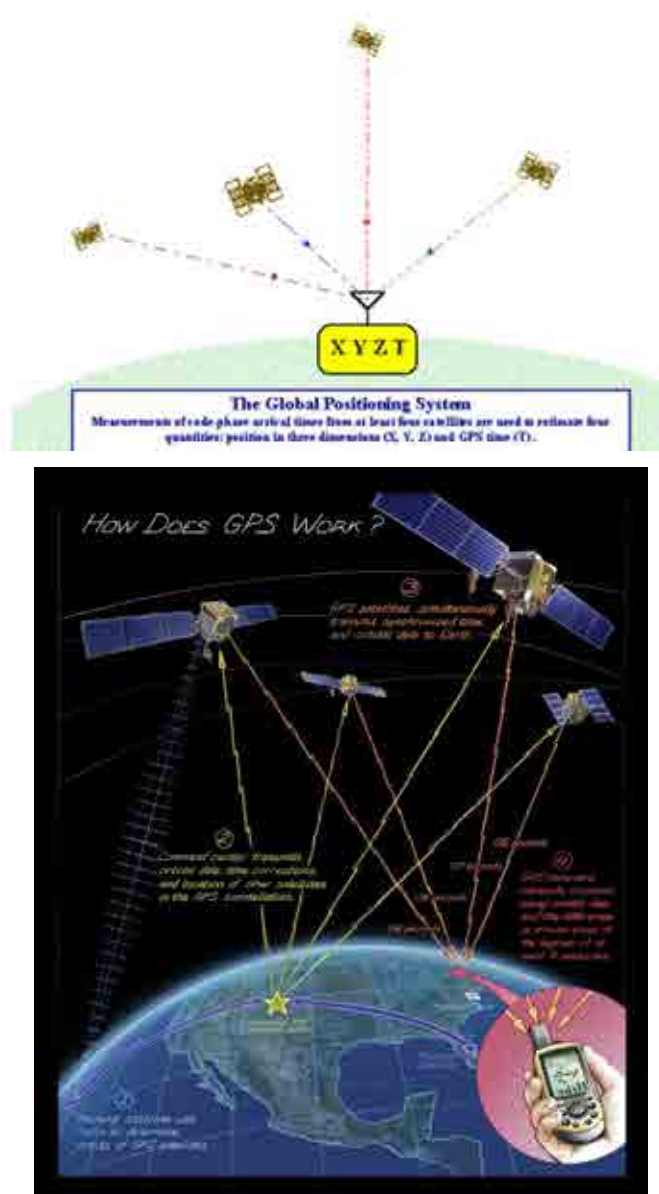
Obr. 2.30: Profesionálny testovací modul generátora signálov GPS s anténami

GPS je založený na princípe jednosmerného dĺžkomeru. Meranou veličinou je doba šírenia rádiového signálu (t.j. tzv. časové meranie, inou meranou veličinou je fázový rozdiel rádiových vln, t.j. fázové meranie.) z antény satelitu k anténe prijímača GPS. Nameraný čas sa prepočítava na vzdialenosť. Rýchlosť šírenia signálu je známa (rýchlosť svetla). Každý satelit v navigačnej správe okrem iných údajov vysiela i parametre svojej dráhy - efemeridy, z

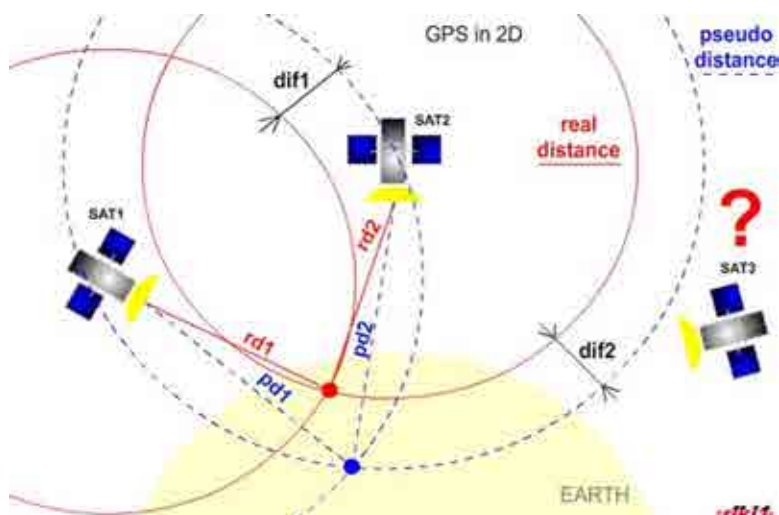
⁶⁸ To znamená, že v prijímači GPS sa generuje elektromagnetické vlnenie, ktoré je referenčné elektromagnetickému vlneniu vysielaného z príslušného satelitu (t.j. obe rádiové vlnenia majú rovnakú charakteristiku).

ktorých sa dá vypočítať poloha, t.j. 3D súradnice (x, y, z) satelitu. Ako to bolo už uvedené v kap. 2.1.2 na základe známej polohy minimálne štyroch satelitov, ich vzdialeností od prijímača GPS a presného času, prijímač GPS vypočíta svoju aktuálnu polohu (3D) (obr. 2.31, angl.).

Vzhľadom k tomu, že satelit vysiela jednotlivé sekvencie C/A-kódu v presne stanovených časových okamihoch, je možné z prijatého C/A-kódu a navigačnej správy stanoviť presný čas odoslania správy (s presnosťou na 1 msek.). Rozdiel medzi časom odoslania sekvencie C/A-kódu a časom jeho prijatia prijímačom GPS sa rovná času šírenia signálu od satelitu k prijímaču GPS. Z tohto časového rozdielu sa dá vypočítať jeho vynásobením rýchlosťou šírenia rádiových vln tzv. pseudovzdialenosť k satelitu. Pojem pseudovzdialenosť sa používa z toho dôvodu, že určovaná vzdialenosť satelit-prijímač GPS je zaťažená istými chybami z chodu hodín na satelite a v prijímači GPS (obr. 2.32, angl.).



Obr. 2.31: Určenie 3D polohy prijímača a GPS času.



Obr. 2.32: Názorný príklad: Skutočná vzdialenosť a pseudovzdialenosť medzi satelitom a prijímačom GPS.

Pseudovzdialenosť D (satelit–prijímač GPS) sa určí zo vzťahu (Sedlák et al., 2009; Sedlák a Lošonczi, 2011; Sedlák, 2012)

$$D = c(t_p - t_s) + c(dt_p - dt_s) = cdt, \quad (2.7)$$

kde: c je rýchlosť svetla,
 t_p je čas prijímu podľa hodín prijímacej aparatury,
 t_s je čas vysielania podľa palubných hodín,
 dt_p, dt_s sú opravy pozemných a palubných hodín na spoločný etalónový čas.

Poloha prijímača GPS sa na základe merania pseudovzdialeností určuje geodetickou (trigonometrickou) metódou „pretínaním nazad“. Táto poloha je zaťažená chybou z korekcie pozemných hodín (dt_p), ktorá vystupuje pri výpočte ako ďalšia neznáma. Vzorec pre korekciu palubných hodín (dt_s) je vysielaný satelitom. Z toho vyplýva, že na určenie polohy prijímača GPS je nutné súčasne pozorovať aspoň štyri satelity. Nominálna presnosť v určení pseudovzdialenosti je pre C/A-kód 4,6 m a pre P-kód 0,46 m. Merania sú zaťažené aj ďalšími chybami, ktoré je možné úplne alebo čiastočne eliminovať, takže chyba v určení absolútnej polohy prijímača GPS je pre C/A-kód 10 až 15 m, pre P-kód 6 m.

GPS meria pseudovzdialenosti medzi prijímačom GPS a okamžitou polohou satelitu. Spôsob tohto merania pseudovzdialenosti je dvojakoého charakteru:

- Absolútne (časové) GPS meranie*, ktoré spočíva v meraní časového rozdielu medzi okamihom vyslania a okamihom prijatia signálu (rádiové vlny, t.j. vlny elektromagnetického vlnenia). Nazýva sa tiež *kódové meranie* meranie, t.j. meranie pseudovzdialenosti pomocou pseudonáhodných kódov (PRN-kódy).
- Relatívne (fázové) GPS meranie* založené na meraní fázového rozdielu medzi fázou vyslanej a prijatej vlny elektromagnetického vlnenia.

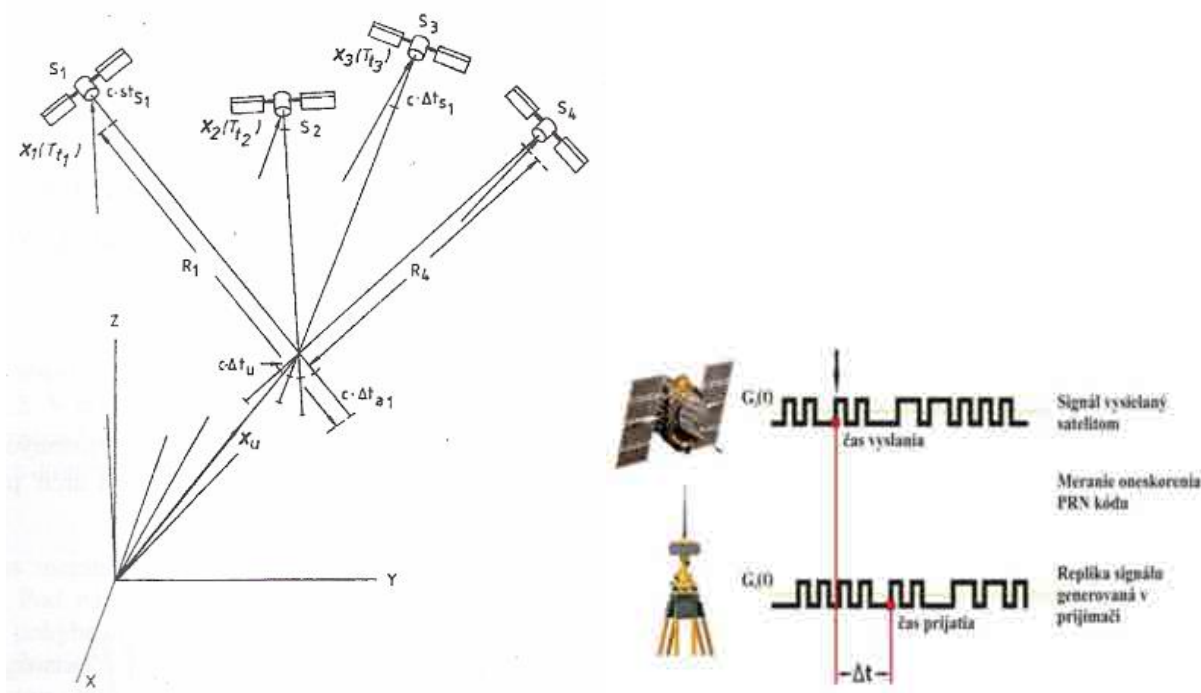
V počiatkoch GPS, resp. v satelitných systémoch, ktoré predchádzali dnešnú podobu GPS sa používalo meranie pseudovzdialenosti na princípe integrácie Dopplerovského efektu a meranie pseudovzdialenosti na základe interferometrického určovania rozdielu v prijíme časovej informácie. Z praktického hľadiska sa v súčasnosti uplatňujú metódy časového (kódového, t.j. absolútneho) a fázového (relatívneho) merania pseudovzdialenosti.

Absolútne meranie pseudovzdialenosti

Jedná sa o absolútne určovanie 3D polohy pomocou kódových (časových) meraní. Absolútne meranie pseudovzdialenosti medzi satelitom a prijímačom *GPS* je založené na meraní časového rozdielu Δt medzi časovým okamihom vyslania t_s elektromagnetického vlnenia zo satelitu S a časovým okamihom t_p prijatia tohto vlnenia v prijímači *GPS* P na zemskom povrchu (obr. 2.33) (Leick et al., 2015; Sedlák, 2003, 2012; Sedlák et al., 2009; Sedlák a Lošonczi, 2011).

Princíp merania pseudovzdialenosti medzi satelitom a anténou prijímača *GPS* pomocou kódov je nasledovný. Oscilátor prijímača generuje referenčnú nosnú vlnu, ktorá je následne modulovaná replikou známeho *PRN*-kódu. Tento referenčný signál sa potom porovnáva v prijímači so signálom prijatým zo satelitu. Keďže oba signály majú zhodný *PRN*-kód, ich korelácia umožní nájsť ich vzájomný časový posun. V prijímači sa vytvorí replika referenčného signálu, ktorá sa posúva po bitoch a porovnáva sa s prijatým kódom.

Ide o základný princíp merania pseudovzdialenosti z hľadiska primárnej koncepcie systému *GPS*, ktorý dovoľuje prácu v reálnom čase. Na určenie polohy stačí samostatné meranie jedným prijímačom. Výsledná presnosť závisí od toho, či ide o tzv. *štandardnú polohovú službu* (*SPS*) (z angl. *Standard Positioning Service*) využívajúci *C/A*-kód, ktorý zabezpečuje s 95 %-nou pravdepodobnosťou polohovú presnosť 10 m, alebo ide o presnú polohovú službu (*PPS*) (z angl. *Precise Positioning Service*) s *P*-kódom, ktorá zabezpečuje s 95 %-onou pravdepodobnosťou polohovú presnosť 1 m. Merania kódov satelitov *GPS* sa využívajú na absolútne určovania polohy a sú základom pre navigačné aplikácie systému, t.j. pre prijímače *GPS* s nižšou presnosťou navigačné *GPS*.



Obr. 2.33: Absolútne (časové, kódové) *GPS* meranie.

Z fyzikálneho hľadiska sa jedná o jednocestný spôsob merania vzdialenosti medzi S a P . Pre oba časové údaje t_s , t_p platia vzťahy (Sedláček, 2012)

$$t_s = (GPS)_s - \delta_s, \quad (2.8)$$

$$t_p = (GPS)_p - \delta_p, \quad (2.9)$$

kde: $(GPS)_s$, $(GPS)_p$ sú systémové časy GPS (údaje na hodinách) na satelite S a v prijímači P ,

δ_s , δ_p sú korekcie časov v dôsledku chýb hodín na satelite S a v prijímači P .

Rozdielom oboch vzťahov (2.8) a (2.9) dostávame časový rozdiel Δt medzi časovým okamihom vyslania t_s vlny zo satelitu S a časovým okamihom t_p prijatia tejto vlny v prijímači P na zemskom povrchu

$$\Delta t = t_p - t_s = [(GPS)_p - \delta_p] - [(GPS)_s - \delta_s] \quad (2.10)$$

a po úprave, keď pre rozdiel systémových časov GPS, t.j. $(GPS)_s$, $(GPS)_p$ zavedieme označenie Δt_{GPS} [$\Delta t_{GPS} = (GPS)_p - (GPS)_s$] a pre rozdiel časových korekcií δ_s , δ_p zavedieme označenie $\Delta \delta$ [$\Delta \delta = \delta_s - \delta_p$], dostávame pre časový rozdiel Δt výsledný vzťah

$$\Delta t = \Delta t_{GPS} + \Delta \delta. \quad (2.11)$$

Na základe fyzikálneho princípu určenia vzdialenosti ($D = c\Delta t$) z rýchlosti šírenia vln c zo satelitu S do prijímača P a časového rozdielu Δt_{GPS} medzi vyslaním týchto vln a ich prijatím pre pseudovzdialenosť D medzi satelitom a prijímačom platí vzťah

$$D = c\Delta t = c(\Delta t_{GPS} + \Delta \delta) = D_r + D_{kor}, \quad (2.12)$$

kde: D_r je skutočná (reálna) vzdialenosť medzi satelitom a prijímačom,

D_{kor} je korekcia určovanej pseudovzdialenosti z dôvodu korekcie hodín na satelite a v prijímači.

Z takto určenej pseudovzdialenosti D možno vypočítať súradnice prijímača (bodu na zemskom povrchu, na ktorom je umiestnená anténa prijímača). Vychádzame zo vzťahu (2.12), v ktorom miesto pseudovzdialenosti D použijeme fyzikálne vyjadrenie vzdialenosti, t.j. $D = c\Delta t$ a miesto výrazu D_{kor} použijeme vyjadrenie korekcie pseudovzdialenosti $D_{kor} = c\Delta \delta$, potom pre pseudovzdialenosť D platí vzťah

$$\begin{aligned} D &= D_r + D_{kor} \\ c\Delta t &= D_r + c\Delta \delta \end{aligned} \quad (2.13)$$

Reálna vzdialenosť D_r je v podstate priestorová úsečka daná dvoma koncovými bodmi, ktorými sú body satelitu S a bod P (stanovisko) s anténou prijímača GPS. Oba body (S , P) sú teoreticky determinované 3D súradnicami (x_S , y_S , z_S , x_P , y_P , z_P), takže po vyjadrení priestorovej úsečky (reálnej vzdialenosti) týmito súradnicami vzťah (2.13) nadobúda tvar

$$c\Delta t = \sqrt{(x_S - x_P)^2 + (y_S - y_P)^2 + (z_S - z_P)^2} + c\Delta \delta \quad (2.14)$$

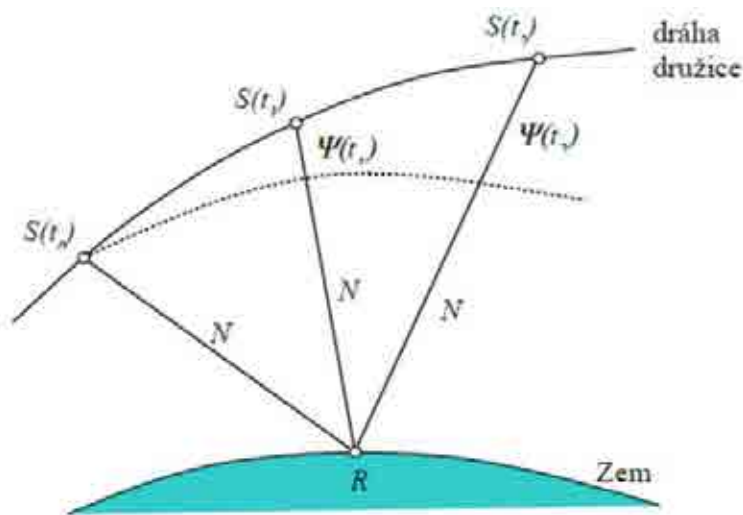
a po úprave

$$\Delta t = \frac{1}{c} \sqrt{(x_s - x_p)^2 + (y_s - y_p)^2 + (z_s - z_p)^2} + \Delta \delta, \quad (2.15)$$

v ktorom sú štyri neznáme parametre: 3D súradnice určovaného bodu P (stanoviska), t.j. x_p , y_p , z_p a korekcia hodín $\Delta \delta$. Časový rozdiel Δt meriame a 3D súradnice satelitu S , t.j. x_s , y_s , z_s poznáme z efemeríd. Z uvedeného vyplýva, že pri meraní na jednom stanovisku je nutné simultánne meranie na minimálne štyri satelity, aby bolo možné k matematickému riešeniu štyroch neznámych zostaviť štyri rovnice o štyroch neznámych.

Relatívne meranie pseudovzdialenosti

Vysoká presnosť GPS sa dosahuje práve pomocou fázových meraní, ktoré sa tu používajú len v rozdielnom režime, t.j. režime, v ktorom určujeme neznámu 3D polohu (bod, objektu) relatívne vo vzťahu k bodu (objektu) o známej 3D polohe. Princíp je rovnaký ako u elektronických diaľkomerov, t.j. určuje sa fázový rozdiel medzi vyslanou a prijatou vlnou (obr. 2.34). Pri GPS však nie je možné vzhľadom na malú vlnovú dĺžku 0,19 až 0,24 m určiť celý počet vln. Dá sa však presne určiť rozdiel počtu celých vln buď medzi dvoma okamihmi alebo medzi dvoma stanicami. Na určenie týchto vln sa okrem fázového merania využívajú aj pseudonáhodné kódy C/A a P-kód.



Obr. 2.34: Relatívne (fázové) GPS meranie.

Fázové merania sú založené na stanovení fázového posunu nosnej vlny. Fáza prijatého satelitného signálu je porovnávaná s referenčným signálom generovaným v prijímači GPS. Zo zisteného fázového posunu možno zistiť, ktorá časť vlny bola práve prijatá prijímačom GPS. Tak možno stanoviť prvú časť vzdialenosti medzi prijímačom GPS a satelitom. Presnosť stanovenia tejto časti vzdialenosti je pritom rádovo v milimetroch. Čo však zo začiatku prijímač nepozná, je počet celých vlnových dĺžok, ktoré “ležia” medzi prijímačom a satelitom. Tento počet sa obvykle značí N a označuje sa ako celočíselná nejednoznačnosť (integer ambiguity). S cieľom možnosti spočítať presné súradnice prijímača programové

vybavenie pre spracovanie dát musí umožniť stanovenie tohto počtu. Ako náhle prijímač túto hodnotu určí, je už schopný priebežne sledovať zmeny fázového posunu a počtu celých vln a tým aj vlastnú pozíciu, resp. jej zmenu (v prípade mobilných staníc).

Vychádzame z fyzikálnej teórie okamžitej fázy $\Phi_s(t_p)$ prijatej vlny danej vzťahom (Leick et al., 2015; Sedlák et al., 2009; Sedlák a Lošonczi, 2011; Sedlák, 2012)

$$\Phi_s(t_p) = -\Phi_s^0 - f\Delta t, \quad (2.16)$$

kde: Φ_s^0 je počiatočná fáza vyvolaná nekorektnosťou hodín na satelite,
 f je frekvencia nosnej vlny.

V prijímači GPS sa generátorom generuje referenčné vlnenie s rovnakými charakteristikami ako prijaté vlnenie od satelitu. Okamžitá fáza prijatej vlny $\Phi_p(t_p)$ generovaného vlnenia je daná vzťahom

$$\Phi_p(t_p) = -\Phi_p^0, \quad (2.17)$$

kde: Φ_p^0 je počiatočná fáza vyvolaná nekorektnosťou hodín v prijímači.

Referenčné vlnenie sa v prijímači porovnáva (komparuje) s prijatým vlnením od satelitu a stanoví sa fázový rozdiel $\Delta\Phi$

$$\Delta\Phi = \Phi_s(t_p) - \Phi_p(t_p) = -\Phi_s^0 - f\Delta t + \Phi_p^0. \quad (2.18)$$

Po dosadení známych fyzikálnych vzťahov pre počiatočné fázy, (t.j. súčinov korekcií hodín na satelite δ_s a v prijímači δ_p s frekvenciou f nosnej vlny miesto hodnôt počiatočných fáz Φ_s^0 a Φ_p^0) a pre vyjadrenie časového rozdielu Δt medzi prijatým vlnením a generovaným vlnením použijeme taktiež známy fyzikálny vzťah z určenia vzdialenosti (reálnej) D_r , vzťah (2.18) nadobúda tvar

$$\Delta\Phi = -f \frac{D_r}{c} - f\delta_s + f\delta_p. \quad (2.19)$$

Ak uvažujeme fázovú charakteristiku $\Delta\hat{\Phi}$ ako súčet fázového rozdielu $\Delta\Phi$ a počtu celých vln N (celočíselná hodnota počtu cyklov vlny k počiatočnej epoche merania t , t.j. *nejednoznačnosť, neurčitost'*, z angl. *ambiguity*⁶⁹ (obr. 2.35, angl.), vzťah (2.19) nadobúda tvar

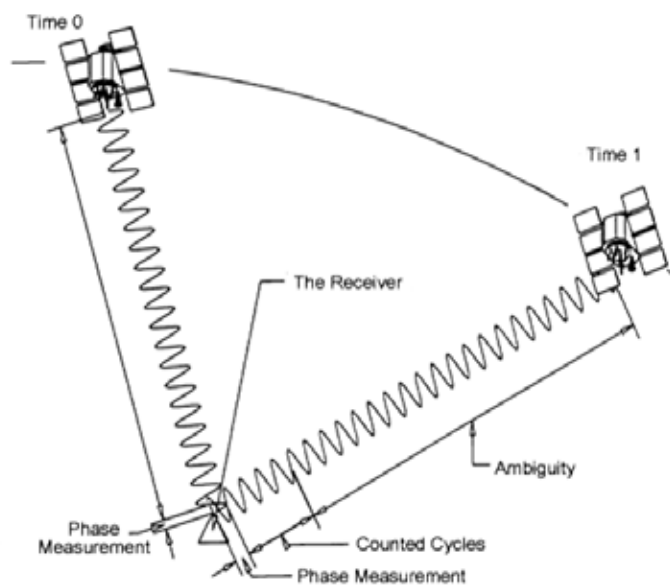
$$\Delta\hat{\Phi} = \Delta\Phi + N = -f \frac{D_r}{c} - f\delta_s + f\delta_p + N. \quad (2.20)$$

Po vyjadrení reálnej vzdialenosti D_r vo vzťahu (2.20) známym vzťahom určeným súradnicami prijímača a satelitu, pre fázovú charakteristiku $\Delta\hat{\Phi}$ dostávame vzťah

$$\Delta\hat{\Phi} = -\frac{f}{c} \sqrt{(x_s - x_p)^2 + (y_s - y_p)^2 + (z_s - z_p)^2} - f\delta_s + f\delta_p + N, \quad (2.21)$$

⁶⁹ V slovenskom jazyku sa udomácnil výraz *ambiguita*.

kde na pravej strane tohto vzťahu je päť neznámych, t.j. súradnice x_P , y_P , z_P určeného stanoviska P s prijímačom *GPS*, rozdiel $\Delta\delta$ korekcií hodín v prijímači a na satelite, ambiguita N . Preto k riešeniu týchto piatich neznámych je nutné zostaviť päť rovníc o piatich neznámych, čiže zabezpečiť neustály príjem minimálne z piatich satelitov počas celej doby merania, čo žiadny prijímač *GPS* nemôže zaručiť. Preto vzťah (2.21) riešime vytvorením tzv. *diferencií*.



Obr. 2.35: Konceptia ambiguity vo fázovom meraní.

Vytvárame diferencie:

- jednoduché,
- dvojnásobné,
- trojnásobné.

Tvorba jednoduchých diferencií

Pri tvorbe jednoduchých diferencií relatívneho merania pseudovzdialenosti medzi satelitom a stanoviskom s prijímačom *GPS* na zemskom povrchu sa meranie realizuje dvoma aparatúrami (prijímačmi) *GPS* na dvoch stanoviskách (A , B) a zabezpečuje sa simultánny príjem signálov zo satelitu (S). Vychádzame z predpokladu, že 3D súradnice jedného stanoviska $[x_A, y_A, z_A]$ sú známe.

Jednoduchá diferencia $\nabla^I \Delta\hat{\Phi}_{AB}$ je daná vzťahom

$$\nabla^I \Delta\hat{\Phi}_{AB} = \Delta\hat{\Phi}_A - \Delta\hat{\Phi}_B. \quad (2.22)$$

Miesto fázových charakteristík $\Delta\hat{\Phi}_A, \Delta\hat{\Phi}_B$ dosadíme adekvátne veličiny podľa vzťahu (2.21) a pre jednoduchú diferenciu vo vzťahu (2.22) dostávame

$$\nabla^1 \Delta\hat{\Phi}_{AB} = -\frac{f}{c} \left[\sqrt{(x_s - x_A)^2 + (y_s - y_A)^2 + (z_s - z_A)^2} - \sqrt{(x_s - x_B)^2 + (y_s - y_B)^2 + (z_s - z_B)^2} \right] + f(\delta_A - \delta_s) - f(\delta_B - \delta_s) + (N_A - N_B). \quad (2.23)$$

Po úprave vzťah (2.23) nadobúda tvar

$$\nabla^1 \Delta\hat{\Phi}_{AB} = -\frac{f}{c} \left[\sqrt{(x_s - x_A)^2 + \dots} - \sqrt{(x_s - x_B)^2 + \dots} \right] + (f\delta_A - f\delta_B) + N_{AB}, \quad (2.24)$$

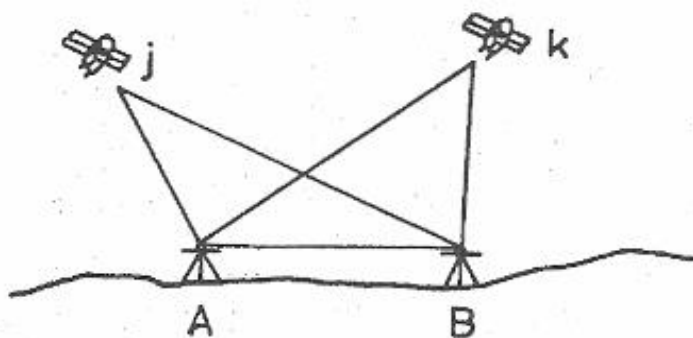
z ktorého vyplýva, že v jednoduchej diferencii je päť neznámych veličín, t.j. $[x_B, y_B, z_B]$, $\Delta\delta$, ($\Delta\delta = \delta_A - \delta_B$) a N_{AB} . K riešeniu takýchto diferencií je potrebné zostaviť päť rovníc o piatich neznámych veličinách, čo podmieňuje zabezpečenie neustáleho príjmu z minimálne piatich satelitov počas celej doby merania na oboch stanoviskách A a B, čo žiadny prijímač GPS nemôže zaručiť, a teda riešenie tvorby jednoduchých diferencií pri relatívnom GPS meraní je nerealizovateľné. Preto prechádzame k tvorbe dvojnásobných diferencií.

Tvorba dvojnásobných diferencií

Tvorba dvojnásobných diferencií vyžaduje súčasné meranie na dvoch stanoviskách A, B s prijímačmi GPS a zabezpečenie simultánneho príjmu signálov z dvoch satelitov S_i a S_j . Vychádzame z predpokladu, že 3D súradnice jedného stanoviska $[x_A, y_A, z_A]$ sú známe (obr. 2.36) (Sedlák, 2003, 2012; Sedlák et al., 2009; Sedlák a Lošonczi 2011).

Dvojnásobná diferencia $\nabla^2 \Delta\hat{\Phi}_{AB}^{jk}$ je daná vzťahom

$$\nabla^2 \Delta\hat{\Phi}_{AB}^{jk} = \nabla^1 \Delta\hat{\Phi}_{AB}^j - \nabla^1 \Delta\hat{\Phi}_{AB}^k. \quad (2.25)$$



Obr. 2.36: GPS meranie pri tvorbe dvojnásobných diferencií.

Miesto jednoduchých diferencií $\nabla^1 \Delta \hat{\Phi}_{AB}^j, \Delta \hat{\Phi}_{AB}^k$ dosadíme adekvátne veličiny zo vzťahu (2.24) a pre dvojnásobnú diferenciáciu vo vzťahu (2.25) po úprave dostávame

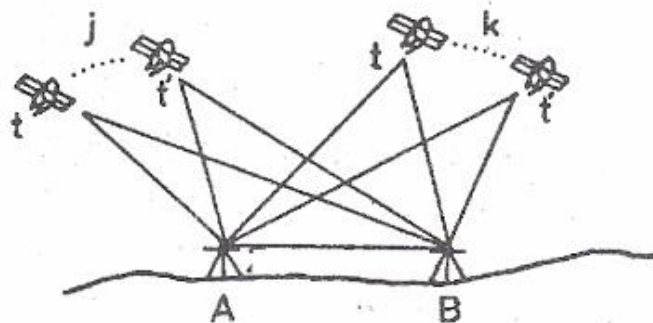
$$\nabla^2 \Delta \hat{\Phi}_{AB}^{jk} = -\frac{f}{c} \left[\sqrt{(x_s - x_A)^2 + \dots}^j - \sqrt{(x_s - x_B)^2 + \dots}^j - \sqrt{(x_s - x_A)^2 + \dots}^k + \sqrt{(x_s - x_B)^2 + \dots}^k \right] + N_{AB}^{jk}, \quad (2.26)$$

v ktorom po eliminácii korekcií hodín ako jednej z neznámych veličín dostávame len štyri neznáme veličiny, t.j. $[x_B, y_B, z_B]$ a N_{AB}^{jk} . Úloha je riešiteľná, pretože k zostave štyroch rovníc o štyroch neznámych veličín každá aparatúra (prijímač) GPS vie zabezpečiť simultánny príjem z minimálne štyroch satelitov.

Dvojnásobné diferenciencie sa používajú v prípade, ak vzdialenosť s_{AB} medzi stanoviskami je menšia než 400 až 500 km.

Tvorba trojnásobných diferencií

Pri tvorbe trojnásobných diferencií $\nabla^3 \Delta \hat{\Phi}_{AB}^{jk}(t, t')$ sa eliminuje i ambiguita N_{AB}^{ij} , pričom sa meranie realizuje v dvoch časových epochách (t, t') (obr. 2.37) (Sedláček, 2012).



Obr. 2.37: GPS meranie pri tvorbe trojnásobných diferencií.

Poznámka: Pokiaľ v dôsledku oslabenia signálu z nízko letiaceho satelitu alebo v dôsledku zatienenia antény (omylom rukou, jazdou v tunely alebo prechádzaním popod most, zatienením stromami alebo domom) dôjde k prerušeniu sledovania nosnej vlny, dôjde k tzv. fázovému skoku (*cycle slip*). V praxi to znamená, že prijímač musí začať nový cyklus merania, od stanovenia fázového posunu až po nové stanovenie počtu celých vln medzi nim a satelitom.

2.1.9 Meračské metódy GPS

Všetky postupy (metódy) GPS merania sú založené na diferenciálnej fázovej metóde, čo ich predurčuje pre presné geodetické práce. Aby bolo možné použiť diferenciálne metódy, je nutné pozorovať súčasne aspoň dvomi aparátúrami (prijímačmi) GPS, ktoré sledujú aspoň štyri rovnaké satelity (S). Výsledkom týchto pozorovaní po hardwarovom spracovaní sú súradnicové rozdiely Δx , Δy , Δz v súradnicovom systéme WGS-84, šikmé vzdialenosti D (tiež označované ako vektory meraných vzdialeností) medzi určenými bodmi, ich prevýšenie dH a geodetické azimuty α normálových rezov (Sedlák, 2003, 2012; Sedlák et al., 2009, Sedlák a Lošonczi, 2009). V súčasnosti v rámci využívania SKPOS nutnosť potreby minimálne dvoch prijímačov GPS odpadá, pretože výstupy z prijímača GPS na tzv. referenčnom bode (bode o známych 3D súradniciach) získavame priamo z najbližších permanentných referenčných staníc SKPOS (kap. 2.1.4).

Použitie meračských postupov s technikou GPS závisí od prijímačov GPS a ich funkčných možností, od možnosti merania veličín, akými sú pseudovzdialenosti, fáza a pod., ďalej od času a od požadovanej presnosti. Keďže absolútne (časové, resp. kódové) GPS meranie si nevyžaduje žiadne špecifické metódy merania, budeme sa podrobnejšie zaoberať len metódami reálného (fázového) GPS merania (metódy fázového merania pseudovzdialenosti).

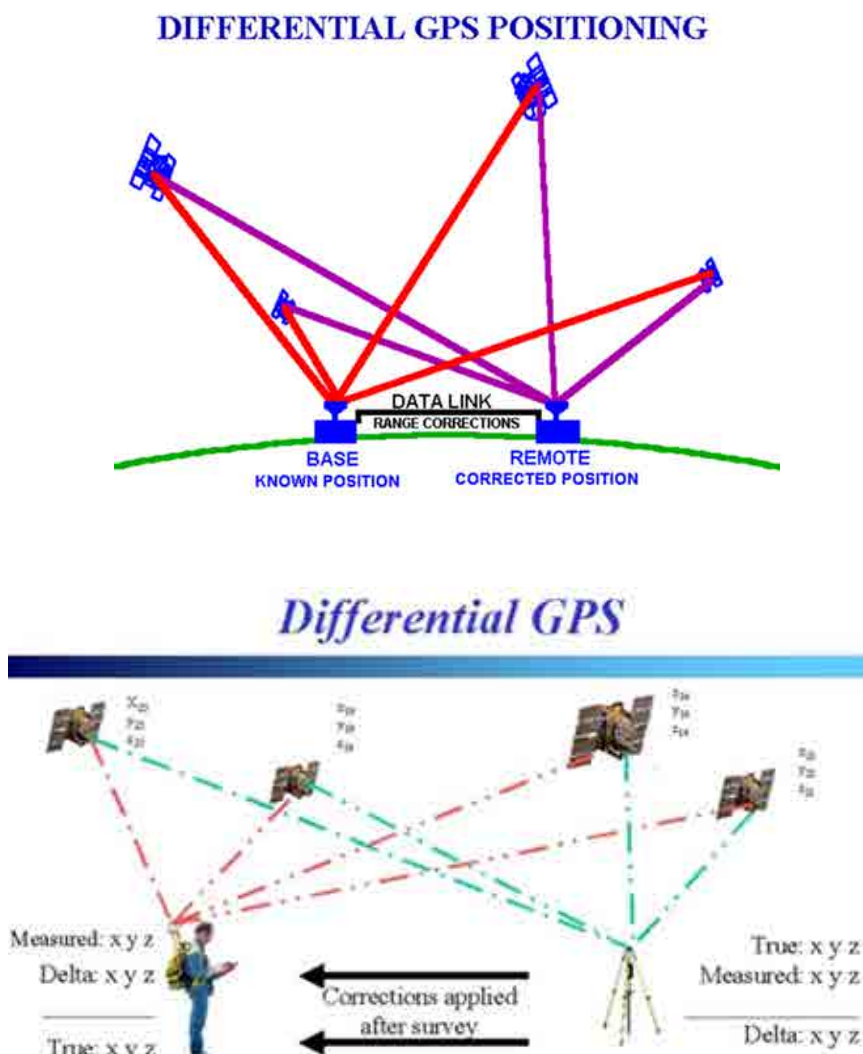
K objasneniu jednotlivých metód relatívneho určenia polohy z GPS meraní je potrebné oboznámiť sa s tzv. *diferenciálnym GPS (DGPS)* (z angl. *Differential Global Positioning System*).

Diferenciálny GPS

Diferenciálny GPS (DGPS) je technológia GPS merania založená principiálne na relatívnom stanovení 3D polohy. Bežne sa vyhodnocovanie takýchto meraní vykonávalo až dodatočne, preto nebolo možné tieto merania použiť napr. pre potreby navigácie. Ale v súčasnosti pri využívaní SKPOS je možné určovanú 3D polohu získať priamo v teréne počas GPS meraní. Na základe zistenia výhod tejto metódy začali výrobcovia vybavovať svoje prijímače GPS potrebnými komunikačnými kanálmi, ktoré umožňujú privádzať do prijímača potrebné korekčné údaje z *referenčnej stanice* (angl. *Base Station*), resp. z SKPOS a realizovať tieto merania v reálnom čase. Po celom svete sa začali organizovať služby, ktoré budujú siete referenčných staníc a zaisťujú nepretržité, verejné vysielanie korekčných údajov. Tieto služby vznikali najskôr v oblasti lodnej dopravy na pobreží USA, ale dnes sa budujú aj inde, napr. v Európe (vrátane Slovenska - SKPOS), Ruskej federácie, Číny, Indie atď. Napriek tomu, že tieto služby sú určené primárne pre navigáciu, je možné ich dostatočne dobre využiť aj pre potreby mapovania (Sedlák, 2003, 2012; Sedlák et al., 2009; Sedlák a Lošonczi, 2011).

Pre civilných užívateľov bola do 2. mája 2000 presnosť v určení 3D polohy umelo degradovaná na niekoľko desiatok až 100 m v dôsledku už spomínanej tzv. *selektívnej (obmedzenej) dostupnosti (SA)* (z angl. *Selective Availability*). Na získanie rádovo metrovej presnosti musel užívateľ zaviesť diferenciálne korekcie za pomoci referenčnej stanice. Podstata je v tom, že meriame na dvoch bodoch, z ktorých jeden má známe 3D súradnice (referenčný bod) a druhý chceme určiť (obr. 2.38, angl.). Užívateľ potom využije pre určenie svojej polohy údaje o polohe satelitu a polohe referenčnej GPS stanice na výpočet chýb

v dôsledku SA a ich následných korekcií. Tieto korekcie môžu byť aplikované na akýkoľvek iný prijímač (vzdialený, podriadený alebo pohyblivý prijímač GPS) v rámci určitej oblasti. Po 2. máji 2000, kedy vtedajší prezident USA *George W. Bush*⁷⁰ vydal nariadenie o zrušení SA pre všetkých civilných užívateľov GPS, nutnosť zavádzania korekcií v dôsledku umelých chýb vyplývajúcich z SA odpadá.



Obr. 2.38: Diferenciálny GPS.

Porovnaním známych a určených 3D súradníc na referenčnom bode (resp. bodoch permanentných staníc GNSS v rámci SKPOS) získame diferencie (odchýlky), o ktoré opravíme súradnice určovaného bodu (primo po softvérovom spracovaní v prijímači GPS bez následných spracovaní dát).

⁷⁰ Americký prezident *Bill Clinton* už v roku 1996 naznačil skrátenie pôsobnosti SA, ale až 2.5.2000 za veľkej pozornosti verejnosti oznámil vtedajší prezident USA *George W. Bush* vypnutie zámerného rušenia SA. SA bolo zapnuté u všetkých satelitov GPS od 25.3.1990 a bolo najväčším zdrojom chyby pri kódovom meraní. Od jeho zrušenia si mnoho užívateľov GPS sľubuje podstatný pokles chýb a možnosť obísť sa bez DGPS.

Pre presnosť DGPS sú definované dve základné chyby:

- tzv. *pravdepodobná kruhová chyba (CEP)* (z angl. *Circular Error Probable*) je daná polomerom kruhu, v ktorom budú správne horizontálne súradnice umiestnené aspoň 50 % z doby merania,
- tzv. *pravdepodobná sférická chyba (SEP)* (z angl. *Spherical Error Probable*) je daná polomerom gule, v ktorej bude správna poloha umiestnená aspoň v priebehu 50 % z doby merania.

Dosiahnuteľná presnosť merania DGPS je :

- 25 až 10 m: lacné ručné prijímače GPS (navigátori) so základným vybavením pre DGPS,
- 5 až 1 m: lepšie ručné prijímače GPS a prijímače určené pre mapovanie,
- 1 m až 1 cm: kvalitné prijímače GPS pre mapovanie a lacnejšie geodetické prijímače GPS,
- 10 cm až sub-cm: vysoko kvalitné geodetické prijímače GPS, ktoré používajú fázové meranie obvykle s využitím oboch frekvencií.

Metódy merania (pozorovania) technológiou reálného GPS merania sa delia na dve základne skupiny (Leick et al., 2015; Mervart, 1994; Rapant, 2002; Sedláček et. al., 2009; Sedláček, 2012; Vojtek, 2014):

- statické,
- dynamické.

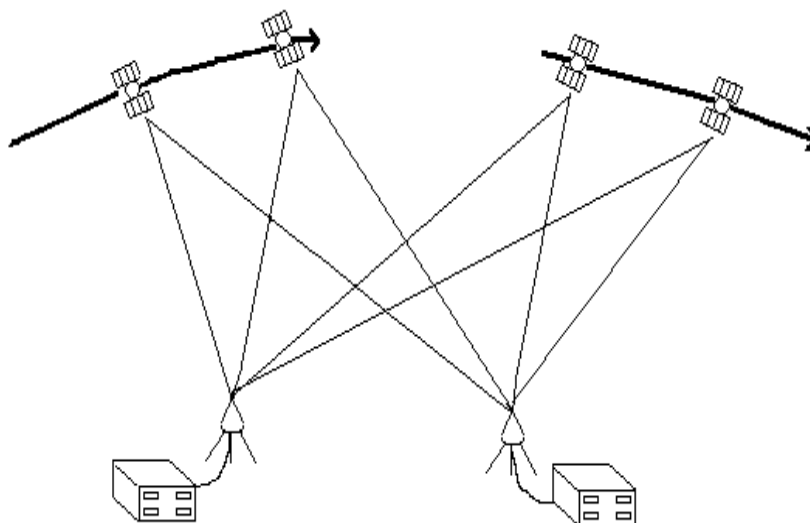
Generálny rozdiel medzi statickými a dynamickými metódami je len v dĺžke doby prijímania signálov zo satelitov GPS.

Metódy relatívneho určenia polohy (t.j. určenie 3D polohy bodu na zemskom povrchu z meraných pseudovzdialeností medzi satelitom a prijímačom GPS) v súhrne statických aj dynamických metód sú nasledovné:

- statická metóda
- kinematická metóda
- pseudokinematická metóda
- rýchla statická metóda
- STOP and GO metóda
- kontinuálna metóda
- RTK metóda
- OTF metóda.

Statická metóda

Statická metóda GPS pomocou fázových meraní patrí k metódam, ktoré sú v súčasnej dobe najviac využívané a vedie k najpresnejším výsledkom. Statická metóda je založená na veľmi jednoduchom princípe, pri ktorom je jeden prijímač GPS umiestnený na referenčnom bode (známom bode, t.j. sú známe jeho 3D súradnice) (*RP*) a ostatné prijímače GPS na určovaných bodoch, t.j. na bodoch, ktorých 3D súradnice zisťujeme z GPS meraní. V prípade, že využívame *SKPOS*, vtedy referenčný bod *RP* z meraní vypadá. Pri statickej metóde prijímače GPS prijímajú signály aspoň zo štyroch satelitov (4S) (obr. 2.39).



Obr. 2.39: Statická metóda.

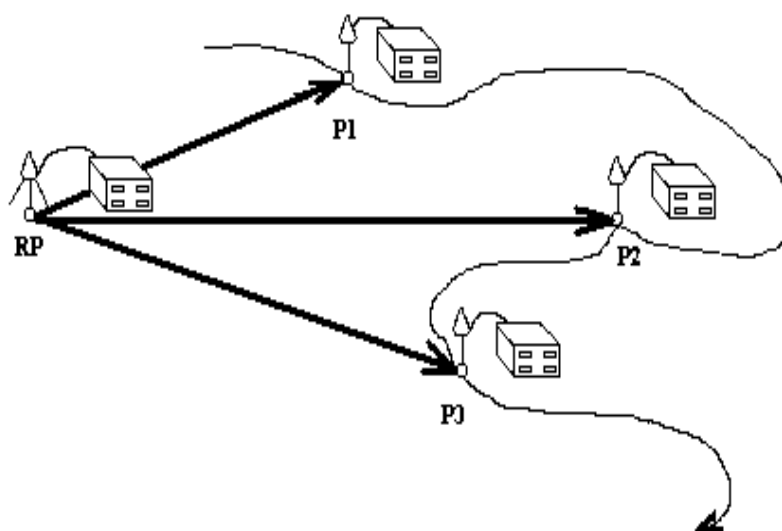
S cieľom získať presné výsledky je doba merania 45 až 60 min. Po tomto meraní sa určované body môžu stať východiskom pre určovanie ďalších bodov (v prípade, že nevyužívame SKPOS). Určované vzdialenosti môžu byť od niekoľko metrov až po niekoľko 100 km. Pre základnice nad 500 km je nutné počítať s pozorovaniami 24 hodín a viac. Základnou a prakticky jedinou podmienkou vykonania GPS pozorovaní je, aby vo výške vyše 15° až 20° nad horizontom neboli žiadne prekážky, ktoré by bránili príjmu priamočiara sa šíriacemu satelitnému signálu.

Statické určovanie polohy je založené na meraní fázy nosnej vlny $L1$, prípadne obidvoch vln. Pri spracovaní sa vychádza z trojnásobných alebo dvojnásobných diferencií (podľa výberu presnosti). Namerané údaje zo všetkých prijímačov GPS sa prehrávajú do počítača, kde sa spracujú príslušným software, resp. pri aplikácii SKPOS získavame 3D súradnice určovaných bodov in situ (v teréne) v reálnom čase.

Kinematická metóda

Kinematická metóda GPS určuje priestorový vektor od známeho bodu k určeným s presnosťou takmer rovnakou ako pri statickej metóde pri dobe merania na jednom bode cca 2 min. Princíp merania je obdobný statickej metóde s nutnosťou inicializácie merania. Inicializáciu merania v prípade využívania SKPOS nie je potrebné realizovať.

Jeden prijímač GPS je na referenčnom bode (RP) o známych 3D súradniciach. Ďalší (ďalšie) prijímače GPS sa presúvajú nad určené body (P). Prijímače GPS sledujú aspoň 4S (vždy tie isté satelity) (obr. 2.40). Z dôvodu možného výpadku jedného satelitu tzv. *zatienením antény* (angl. *cycle slip*) odporúča sa sledovať vždy 5S. V prípade využívania SKPOS potreba referenčnej stanice (prijímača GPS na referenčnom bode) odpadá. Nevýhodou kinematickej metódy je nutnosť neustáleho kontaktu satelit-prijímač i počas presunu medzi jednotlivými určenými bodmi. Ak počet satelitov klesne pod štyri, je potrebné vrátiť sa na predchádzajúci bod so známymi súradnicami, alebo na známu základnicu a opakovať inicializáciu.



Obr. 2.40: Kinematická metóda.

Inicializácia merania sa dá vykonať tromi spôsobmi:

- *Meraním na známej základnici:* Vychádzame zo známej základnice (známe sú súradnicové zložky Δx , Δy , Δz so strednou chybou $m_o \leq 0,05$).
- *Statickou metódou:* Určíme súradnicové zložky Δx , Δy , Δz známej základnice napr. statickou metódou.
- *Vymieňaním antén na krátkej základnici*, tzv. anténa swap. Najrýchlejší spôsob určenia súradnicových zložiek Δx , Δy , Δz výmenou antén prijímačov (maximálna vzdialenosť do 10 m v závislosti od dĺžky káblov).

Vo vhodnom teréne je táto metóda najrýchlejšia a pritom takmer rovnako presná ako ostatné metódy. Za jednu hodinu je možné kinematickou metódou zmerať 20 až 25 bodov. Rýchlosť pozorovania závisí od terénnych podmienok, ktoré ovplyvňujú presun meračských skupín, od počtu a druhu prekážok medzi stanicou i trajektóriou s prijímačmi a satelitmi, od efektívnosti plánovania meračských prác a pod

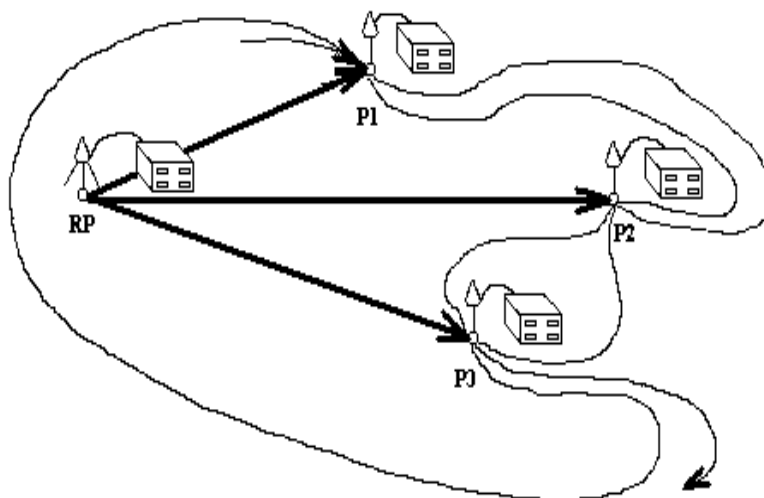
V aplikáciách GPS, kde sa nepožaduje vysoká presnosť v určení 3D polohy objektu, resp. bodu v teréne, dáva sa prednosť kinematickým metódam z viacerých dôvodov, no najmä z dôvodov výhodných operatívnych meračských (pozorovacích) postupov. Zvyčajne sa uplatňuje len v malom okruhu do 10 km.

Pseudokinematická metóda

Pseudokinematická metóda GPS, niekedy označovaná aj ako pseudostatická metóda, je kompromisom medzi statickou a kinematickou metódou. Používa sa v nepriaznivom teréne, kde pri prechode medzi jednotlivými bodmi nie je možné udržiavať príjem zo satelitov. Je rovnako presná ako statická metóda, no vyžaduje kratší čas merania na jednom bode, t.j. 5 až 10 min. Oproti kinematickej metóde táto nevyžaduje stály príjem zo satelitov.

Aj tu rozlišujeme referenčný príjem, ktorý počas celého merania zostáva na známom bode (referenčnom bode *RP*) a pohyblivý, ktorým určujeme neznáme dátumy bodov *P* (obr. 2.41). V prípade využívania *SKPOS* potreba referenčnej stanice (prijímača *GPS* na referenčnom bode *RP*) odpadá. Každý určovaný bod musí byť zameraný aspoň dvakrát, pričom medzi jednotlivými meraniami (pozorovaniami) musí uplynúť aspoň jedna hodina, aby sa výrazne zmenila konštelácia satelitov.

Z pôvodného hodinového merania sa vyberú len najvhodnejšie úseky. Sú to tie, ktoré najviac prispievajú k presnému stanoveniu polohy, t.j. prvých a posledných 10 min. pozorovania. Tým je umožnené získanie údajov o zmene geometrie usporiadania satelitov. Prvé a druhé pozorovanie nemusí byť zamerané na rovnakú skupinu satelitov.



Obr. 2.41: Pseudokinematická metóda.

Zber meraných (pozorovaných) dát je potrebný z minimálne 4S. V priebehu presunu nie je potrebné spojenie prijímačov so satelitmi. Nevýhodou je potreba opakovania pozorovaní na tom istom bode. Preto je táto technológia vhodná pre relatívne malé oblasti.

Rýchla statická metóda

Meračský postup pri *rýchlej statickej metóde GPS* je v zásade podobný statickej metóde, avšak pri výrazne skrátenom čase potrebnom na pozorovanie. Záleží však od geometrie a počtu satelitov, ako aj od dĺžky meraného priestorového vektora.

Presnosť tejto metódy je porovnateľná so statickou. Prednosťou tejto metódy je, že nevyžaduje neprerušovaný príjem signálu medzi meraniami na jednotlivých bodoch, teda počas presunu. Ďalšou výhodou je, že na určovanom bode stačí jedno postavenie prijímača.

Pri optimálnej dĺžke pozorovacích sérií (10 až 20 min.) sa výsledky rýchlej statickej metódy nelíšia od klasickej statickej metódy o viac než 1 až 2 cm. Uplatňuje sa najmä pri

určovaní kratších priestorových vektorov (do 20 km). Pri dlhších zámerach sa rozdiel medzi statickou a rýchlou statickou metódou stráca. Pre priestorové vektory do 20 km platí tab. 2.6.

Tab.2.6: Doba merania (pozorovania) u rýchlej statickej metódy GPS v závislosti od počtu satelitov.

Počet satelitov	Čas pozorovania v minútach
4	20 a viac
5	10 – 20
6 a viac	5 - 10

Podmienkou pozorovania sú dvojfrekvenčné prijímače GPS vybavené *P*-kódmi na druhej frekvencii *L2* a výhodná konfigurácia satelitov (5 až 6S s výškou 15° nad horizontom) a rovnako prijímače GPS musia mať nainštalované príslušné programové vybavenie. Na spracovanie nameraných údajov musí byť použitý špeciálny softvér.

STOP and GO metóda

STOP and GO metóda GPS má názov aj ako polokinematická metóda. Princíp je obdobný ako u predošlých dvoch metód. Metóda spočíva v postupnom pozorovaní na všetkých určených bodoch *P* jedným prijímačom GPS, kým referenčný prijímač zostáva stále na východiskovom (referenčnom) bode *RP*. V prípade využívania SKPOS potreba prijímača GPS na referenčnom bode odpadá. Doba pozorovania je 1 až 2 min. bez nutnosti opakovania merania. Vyžadovaná je inicializácia merania a znalosť Δx , Δy , Δz známej základnice. Inicializáciu merania v prípade využívania SKPOS nie je žiadúce realizovať. Vyžaduje sa nepretržité napojenie prijímačov na minimálne 4S po celú dobu merania i v priebehu presunu. V prípade straty signálu je metóda nepoužiteľná. Mobilný prijímač musí byť spustený v kinematickom režime a referenčný prijímač bude v statickom alebo kinematickom režime. Metóda prichádza do úvahy len v otvorenom teréne bez akýchkoľvek prekážok, ktoré môžu zatieniť príjem satelitných signálov.

Kontinuálna metóda

Pri kontinuálnej metóde GPS jeden prijímač GPS je na referenčnom bode *RP* a druhý, resp. ostatné prijímače (aparátory) GPS sú v nepretržitom pohybe bez možnosti zastavenia nad určenými bodmi *P*. V prípade využívania SKPOS potreba prijímača GPS na referenčnom bode odpadá. Určované body tvoria body trajektórie pohybu prijímača GPS danej epochami záznamu (napr. každú sekundu). Metóda si vyžaduje inicializáciu merania a nepretržité sledovanie minimálne 4S. Inicializáciu merania v prípade využívania SKPOS nie je žiadúce realizovať. Doba pozorovania je závislá od epochy záznamu.

RTK metóda

RTK metóda GPS (z angl. *Real Time Kinematic Method*), tiež *GPS-RTK metóda*, je v podstate kinematická metóda určovania polohy v reálnom čase. To znamená, že prijímač *GPS* na určovanom bode musí byť nejakým komunikačným kanálom priamo napojený na referenčnú stanicu, resp. využíva sa *SKPOS*. Princíp je podobný predošlým metódam, avšak táto metóda spadá svojím princípom do kinematickej, kedy ide o neprerušovaný kontakt počas transportu. Jeden prijímač *GPS* je na referenčnom bode *RP* (alebo sú to najbližšie permanentné stanice *GNSS* v rámci *SKPOS*), druhý prijímač *GPS* sa pohybuje po určených bodoch *P*. Významnou prednosťou je, že sú k dispozícii okamžité výsledky merania a tým je známa i presnosť, s ktorou sa určujú výsledky merania na daných bodoch. Metóda vyžaduje inicializáciu merania (v prípade, že sa nevyužíva *SKPOS*, inicializácia merania nie je potrebná) a neustále sledovanie minimálne 4S a musí byť vybavená softwarom a *PC* aparátúrou (v prípade, že sa nevyužíva *SKPOS*). Metóda umožňuje tiež navigáciu užívateľa do bodu, ktorý je objektom jeho záujmu, čo je výhodné pre vyhľadávanie bodov, vytyčovací práce a podobné práce v stavebníctve, doprave a inom odvetví priemyslu, či iných ľudských činnostiach.

Metóda si vyžaduje rádiomodémy pre príjem a prenos korekcií z referenčného prijímača *GPS* do participujúceho prijímača *GPS* (v prípade využívania *SKPOS* a súčasných prijímačov *GNSS* táto požiadavka je bezpredmetná). Táto metóda výrazne šetrí čas, pretože nevyžaduje následné spracovanie dát⁷¹ (*postprocessing*). Ak sa stratí rádiový kontakt, prijímač *GPS* signalizuje kódové polohy a po obnovení kontaktu sú opäť vysielané presné fázové korekcie.

OTF metóda

OTF metóda (z angl. *On The Fly*) je kinematická metóda *GPS*, ktorá umožňuje okamžité riešenie ambiguit za pohybu prijímača *GPS*. Má veľmi vysoké nároky na hardwarovú a softwarovú podporu a vyžaduje vhodný výpočtový software pre rýchle numerické riešenie ambiguit.

2.1.10 Presnosť GPS

Určenie 3D polohy objektu (bodu) pomocou *GPS* sa dá vysvetliť tak, že sa nachádza v priesečníku guľových plôch, ktorých polomer je daný meranými vzdialenosťami. K dosiahnutiu vysokej presnosti určenia polohy je teda dôležité, aby sme využívali čo najväčšieho počtu viditeľných satelitov, ktoré musia byť vhodne rozložené na horizonte. Celý kozmický segment je navrhnutý tak, aby z jedného stanoviska bolo vždy viditeľných najmenej 5 až 8 satelitov (Leick et al., 2015; Sedláček, 2012).

⁷¹ V prípade využívania *SKPOS* u žiadnej metódy *GPS* nie je potrebný *postprocessing*

Uvádzané metódy merania s technikami GPS (kap. 2.1.9) poskytujú vysokú presnosť výstupných veličín. Výrobcovia veľmi presných geodetických aparatúr GPS udávajú presnosť v určení šikmej vzdialenosti $5 \div 10 \text{ mm} \pm (1 \div 5) \text{ ppm}$, v určení prevýšenia $10 \div 20 \text{ mm} \pm (1 \div 2) \text{ ppm}$ a v určení azimutu $1 \div 5''$ na 1 km vzdialenosti. Dosiahnutá presnosť je závislá od doby pozorovania, od rozloženia a počtu satelitov nad horizontom a od použitého softwaru. Kvôli atmosférickým vplyvom nie je vhodné pozorovať satelity, ktoré sú nižšie ako $10 \div 15^\circ$ nad horizontom.

Geometrickú konfiguráciu satelitov a staníc (prijímačov) GPS popisuje tzv. *faktor zníženia presnosti (DOP)* (z angl. *Dilution Of Precision*). Je definovaný ako pomer (Leick et al., 2015; Sedlák, 2003, 2012; Sedlák et al., 2009; Sedlák a Lošonczi, 2011)

$$DOP = \frac{\sigma}{\sigma_0}, \quad (2.27)$$

kde: σ je stredná chyba súradnice, času, polohy a pod.,
 σ_0 je stredná chyba meraných pseudovzdialeností.

Pre hodnotenie presnosti aplikovanej metódy GPS a konfigurácie prijímačov satelitnej techniky sa používa DOP v rôznych modifikáciách podľa nasledujúcich vzťahov:

$$\begin{aligned} PDOP &= \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2} - \text{polohový DOP}, \\ HDOP &= \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2} - \text{horizontálny DOP}, \\ VDOP &= \sigma_Z - \text{vertikálny DOP}, \\ TDOP &= c \sigma_t - \text{časový DOP}, \\ GDOP &= \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2 + c^2 \sigma_t^2} - \text{geometrický DOP}. \end{aligned} \quad (2.28)$$

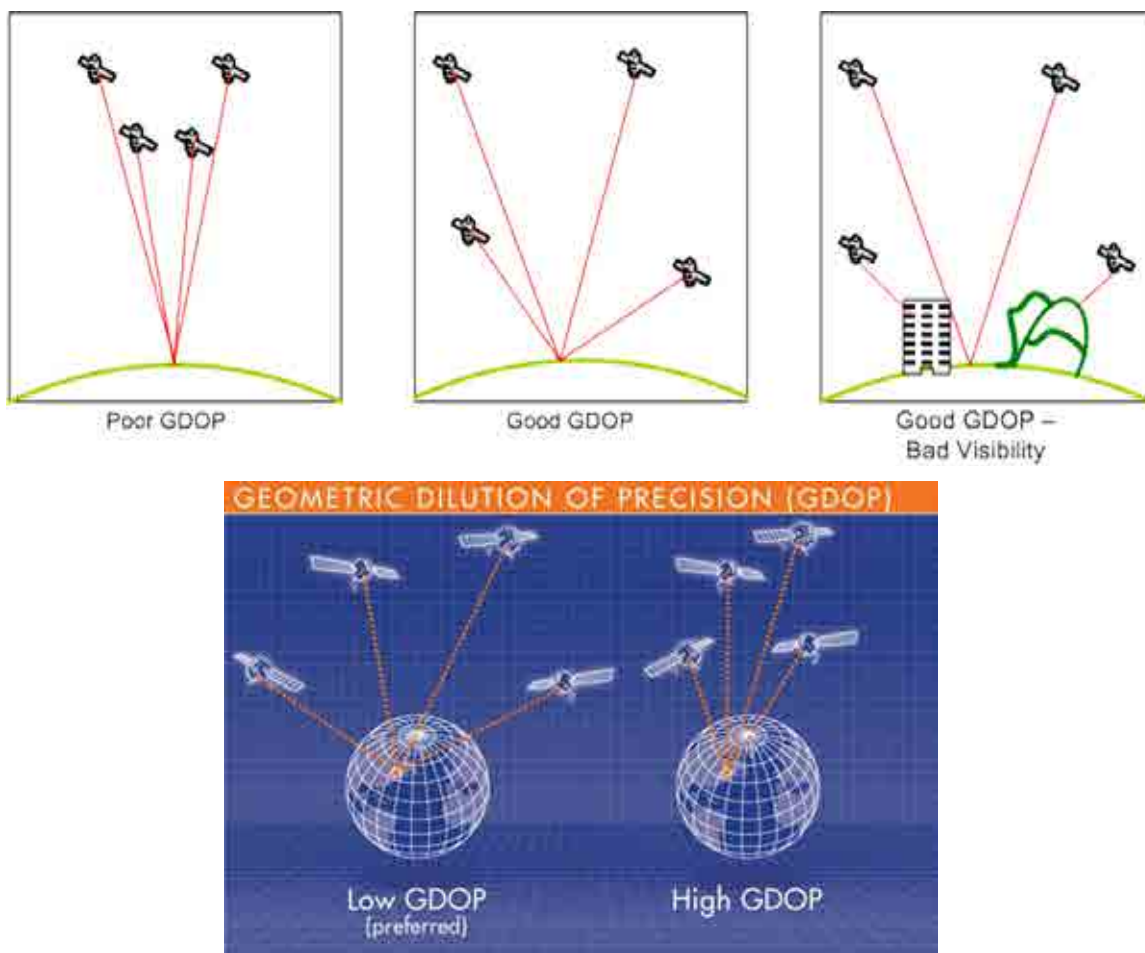
Polohový DOP (PDOP) je taktiež recipročnou hodnotou objemu V polyédra⁷² (Leick et al., 2015; Sedlák, 2012; Seeber, 2003)

$$PDOP = \frac{1}{V}, \quad (2.29)$$

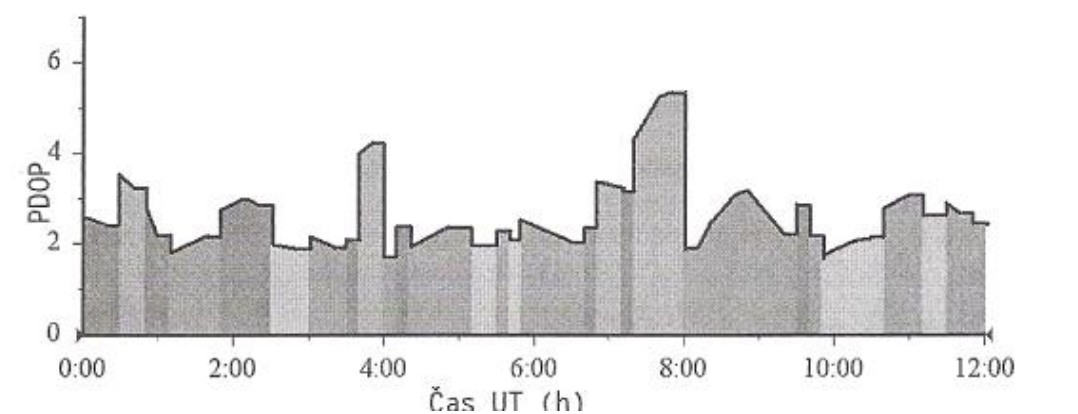
Všeobecne platí, že čím je menší DOP, tým je možné dosiahnuť lepšie výsledky. K posúdeniu vplyvu zmeny konštelácie satelitov na riešenie základnice sa používa faktor RDOP, t.j. relatívny DOP. Ak je hodnota PDOP rovná 4 a menej, znamená, že usporiadanie satelitov je vhodné a zaručuje presné meranie. Pri hodnote PDOP rovnej 5 až 7 je usporiadanie ešte akceptovateľné, ale hodnota väčšia než 7 už znamená zlé usporiadanie (obr. 2.42, angl.) (Sedlák, 2003, 2013; Sedlák et al., 2009; Sedlák a Lošonczi, 2011).

Priebeh PDOP je možné vypočítať pred samotným GPS meraním z údajov o približných súradniciach satelitov z almanachu a približných súradníc stanoviska, ktoré je postačujúce poznať s presnosťou niekoľkých km (obr. 2.43).

⁷² Mnohosten.



Obr. 2.42: Ukážky konfigurácie štyroch satelitov s rôznymi faktormi GDOP (geometrický faktor zníženia presnosti).



Obr. 2.43: Priebeh PDOP pre interval 12 hod.; B (latitude-zemepisná šírka)=49°, L (longitude-zemepisná šírka)=20°, 15.11.2001, výškový filter 15°, 24 satelitov.

Faktory ovplyvňujúce presnosť GPS

Presnosť polohy stanovená z GPS meraní sa môže pohybovať od 100 m do niekoľko mm v závislosti od použitého prístroja GPS, spôsobu merania a spracovania výsledkov merania. V tab. 2.7 je uvedený prehľad zdrojov chýb GPS a ich veľkosti.

Tab. 2.7: Zdroje a veľkosti chýb.

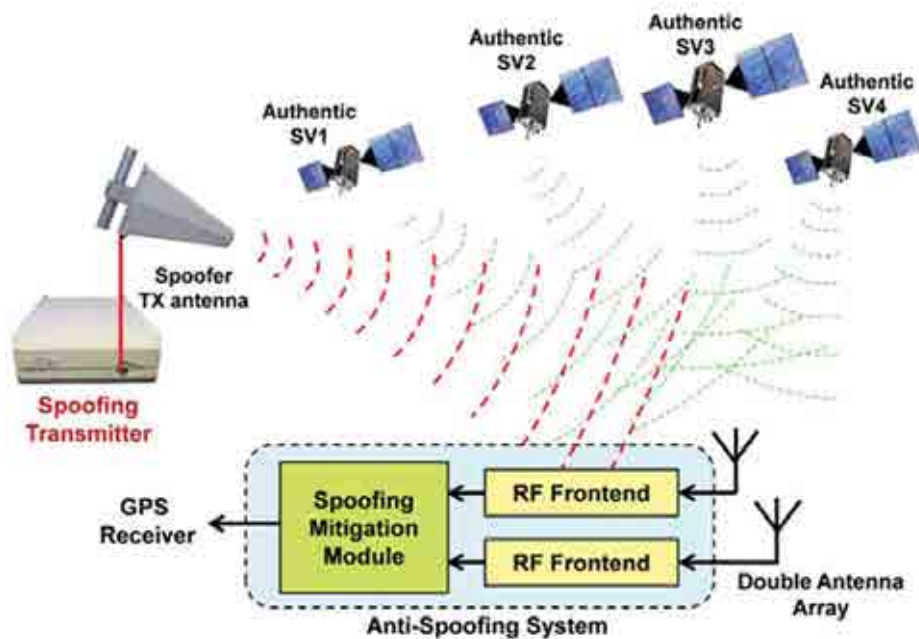
Zdroj chýb	Max. veľkosť chyby
satelitné hodiny	40 m
efemeridy satelitov	15 m
obežná dráha	5 m
SA	10 m
vplyv ionosféry	12 m
vplyv troposféry	3 m
PRN šum	1 m
šum prijímača	2 m
odrazené signály	

GPS bol pôvodne vyvinutý ako vojenský navigačný satelitný systém, a preto bolo už od začiatku rozhodnuté, že v ňom musí byť zabudovaný mechanizmus umožňujúci jeho znepřístupnenie neautorizovaným užívateľom. Takéto mechanizmy (systémy) boli vytvorené dva a nazývajú sa: mechanizmus *selektívna dostupnosť* (SA) (kap. 2.1.5 a 2.1.9) a tzv. mechanizmus „proti falšovaniu“ (AS) (z angl. *Anti-Spoofing*).

SA bola zrušená 2. mája 2000 (kap. 2.1.9). Odpoveď na otázku, aká je presnosť GPS bez SA a či bude ďalej užitočné DGPS, nie je jednoduchá. Najväčšie chyby totiž vznikajú ohybom dráhy signálu v ionosfére, ktorý nie je stály a mení sa v priebehu jedenásťročného slnečného cyklu. Dôsledkom zrušenia zavedenia chyby SA do merania neautorizovaných užívateľov ďalej umocní rast v oblasti obchodu a vývoja aplikácií GPS. Ohromnú výhodu vďaka zrušeniu SA je možné očakávať v doprave, telekomunikáciách a zbere polohových dát. Presnosť navigačného GPS s SA pre bežných užívateľov sa pohybovala v 95 % prípadov do 100 m a v 60 % prípadov do 30 m. Zrušením SA klesli hodnoty na 1/3, čo je v 95 % prípadov do 30 m a v 60 % prípadov do 10 m.

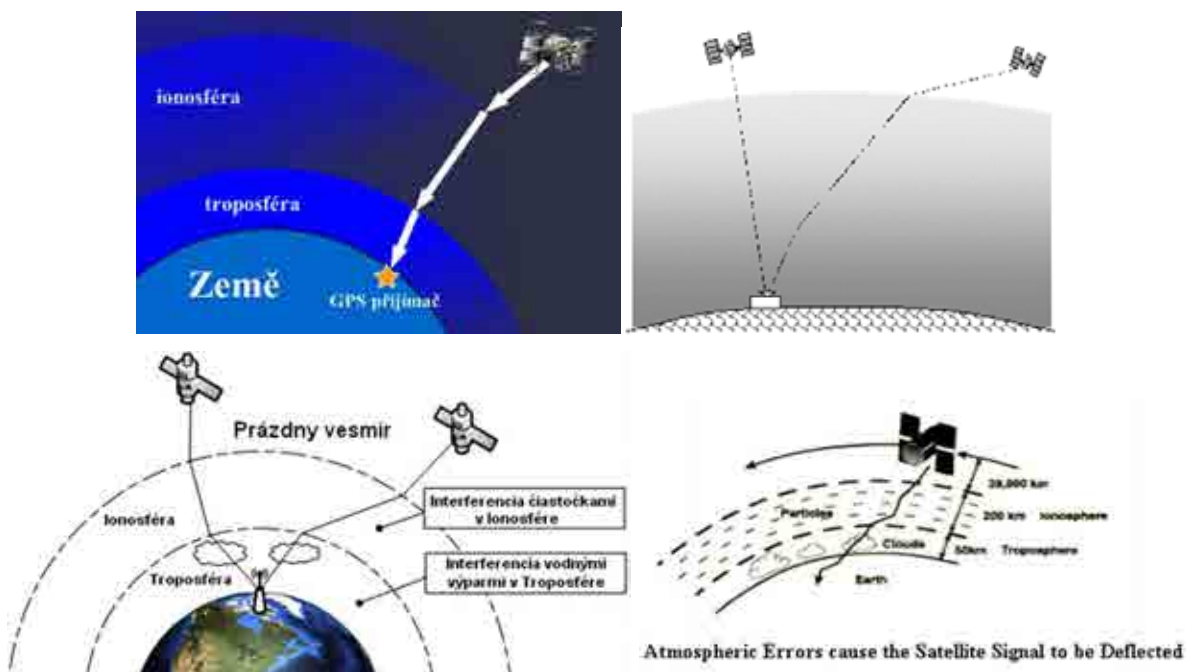
Aktivácia AS znamená, že je priebežne šifrovaný P-kód. K zníženiu presnosti dochádza v dôsledku tohto opatrenia preto, že v rámci civilných aplikácií GPS v podstate odpadne možnosť využitia P-kódu. V reálnom čase tak nemožno stanovovať oneskorenie signálu pri prechode ionosférou. Navyše P-kód nie je náchylný na šumy a je odolnejší proti interferenciám, čím je jeho strata citelnejšia. Obr. 2.44 (angl.) prezentuje schému začlenenia AS systému do signálov satelitov GPS.

Ďalšími faktormi, ktoré vplyvajú na presnosť GPS sú: vplyv atmosféry, stav satelitov, viaccestné (multipath) šírenie signálu, tiež šírenie odrazeného (reflected) signálu, vplyv elektromagnetického poľa a vplyv kovových objektov, tzv. „tienenie“ šírenia signálu vo vysokom porastu, resp. tzv. „šum“ signálu, chyba hodín a typ prijímača.



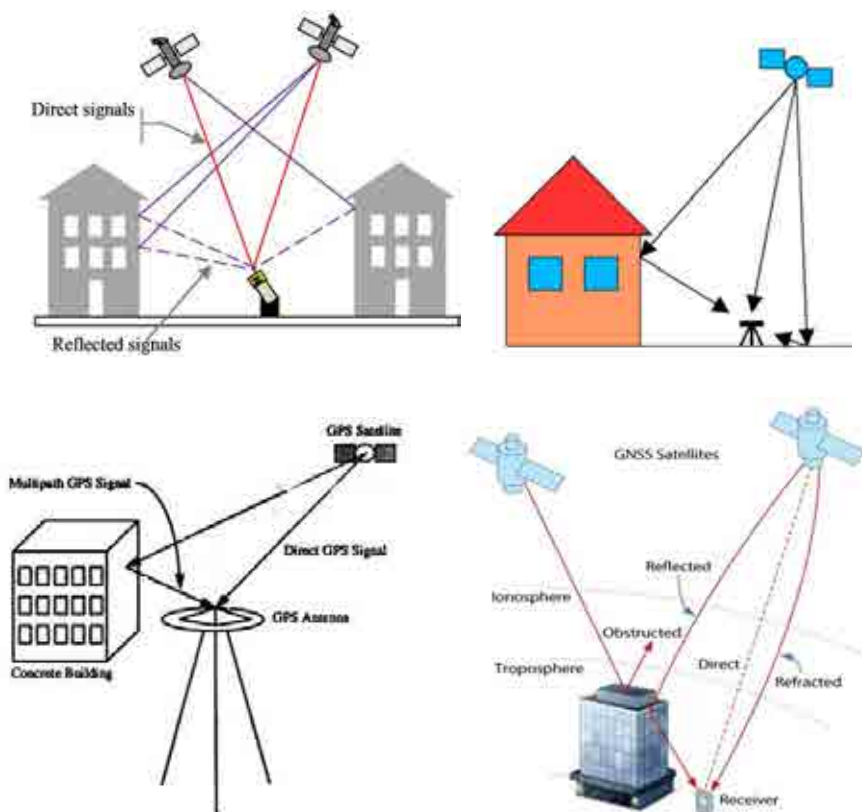
Obr. 2.44: AS systém a GPS.

- Vplyv atmosféry:* Jedno z najväčších obmedzení presnosti *GPS* plynie z prechodu signálu atmosférou, najmä ionosférou (chyba až 30 m) a troposférou (chyba až 3 m) (obr. 2.45 čes., angl.). Vplyv troposféry sa dá vhodne matematicky odstrániť a vplyv ionosféry sa v prípade fázových meraní odstraňuje meraním na dvoch frekvenciách. Bežný užívateľ navigačného prístroja *GPS* neurobí s chybami z vplyvu atmosféry nič, jednoducho sú, ale navigačná správa obsahuje dáta o aktuálnom stave ionosféry a pri výpočte tak dochádza k istej eliminácii.

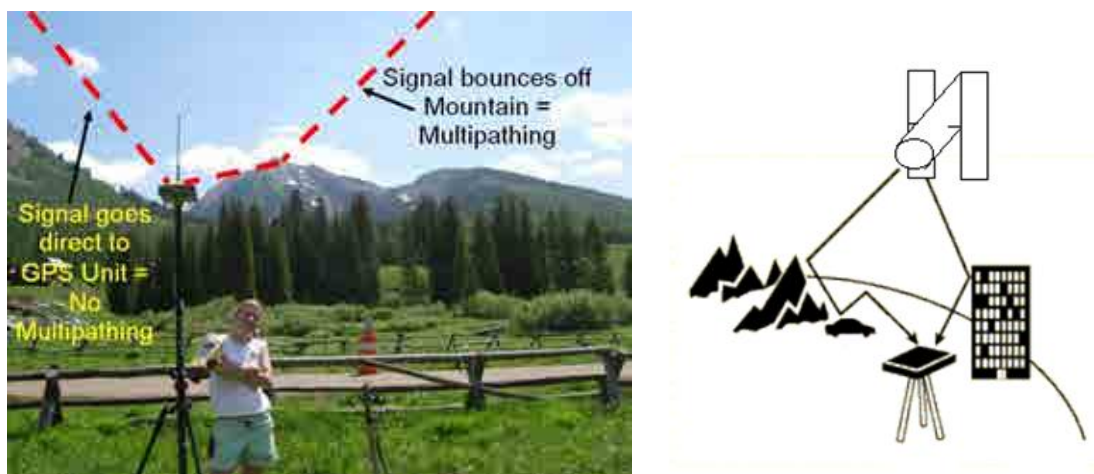


Obr. 2.45: Vplyv atmosféry.

- **Stav satelitov:** V navigačnej správe, ktorá putuje spolu so signálom od každého satelitu GPS, je vysielaná správa o tom, či je možné satelit zahrnúť do výpočtu alebo nie, t.j. či je satelit „zdravý“ alebo „chorý“, teda akýsi „zdravotný“ stav satelitu. Typický príklad je údržba satelitov, korekcia dráh či testovanie, kedy satelit neposkytuje kvalitné dáta. Vtedy prijímač GPS satelit z výpočtu vylúči. Ihneď po vypustení satelitu na obežnú dráhu až do doby, než je satelit umiestnený na svoje miesto, je dostatočne otestovaný a sú získané dostatočné údaje o jeho správaní na obežnej dráhe a tiež o chovaní jeho hodín, aby bolo možné modelovať jeho dráhu. Neustále v MS prebieha periodická služba, akou sú korekcie obežnej dráhy alebo korekcie hodín. Existuje aj tzv. špeciálne testovacie obdobie, napr. pred tým, než je GPS deklarovaný ako plne funkčný, kedy môže použitie signálov satelitu viesť k chybám. Údržba satelitov je náprava abnormálneho správania sa satelitu, kedy začne satelit „poskakovať“ a musí byť stabilizovaný. Našťastie majú prijímače GPS zabudovanú automatickú kontrolu, ktorá im znemožní použitie signálov „nezdravého“ satelitu. Pokiaľ je satelit označený ako „nezdravý“, tak ho prijímač GPS nepoužíva k žiadnym výpočtom až do doby, než zo satelitnej navigačnej správy nezíska signál o jeho „uzdravení“.
- **Viaccestné (angl. *multipath*) šírenie signálu, tiež šírenie odrazeného (angl. *reflected*) signálu:** Signál putujúci zo satelitu do prijímača GPS sa cestou odrazí od iných prekážok a tranzitný čas je potom skreslený, t.j. do prijímača GPS sa dostávajú tzv. *viaccestné*, resp. *odrazené* signály. Najviac sa prejavuje u satelitov letiacich nízko nad horizontom a veľmi ťažko sa táto chyba detekuje. Pri GPS meraní je potrebné vyvarovať sa stanoviskám prijímačov GPS blízko vysokých budov (obr. 2.46, angl.) a vysokých terénnych útvarov (kopce, hory a pod.) (obr. 2.47, angl.).

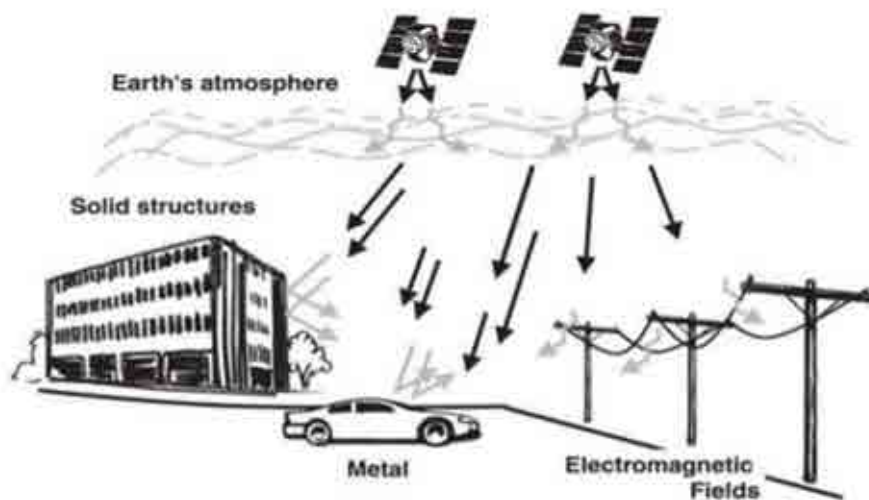


Obr. 2.46: Viaccestné, odrazené signály od budov.



Obr. 2.47: Viaccestné, odrazené signály od terénu.

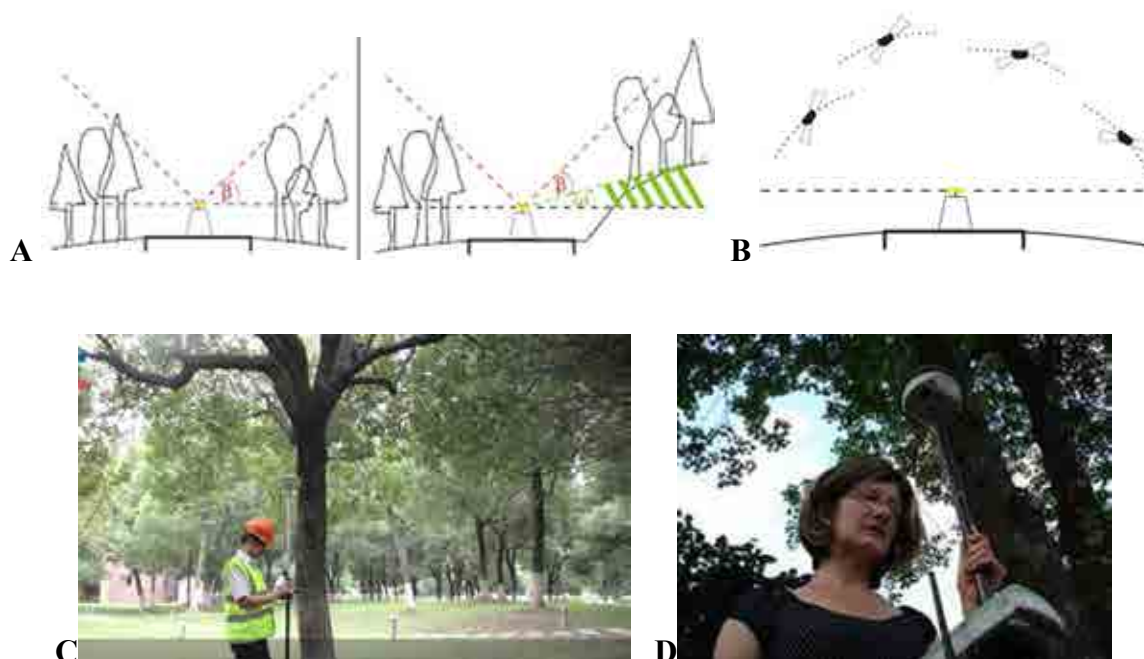
- *Vplyv elektromagnetického poľa a vplyv kovových objektov:* Sínál šíriaci sa zo satelitu je rádiový sínál, čiže elektromagnetické vlnenie. Je preto logické, že na jeho kvalitu a intenzitu vplýva iné elektromagnetické pole a taktiež kovové objekty v okolí aparatury (prijímača) GPS (obr. 2.48, angl.). Z tohto dôvodu je potrebné vyvarovať sa GPS meraniam v blízkosti zdrojov elektromagnetického poľa, napr. elektrické vedenia, elektrické spotrebiče a pod. a v blízkosti kovových objektov, ktorými sú napr. automobily.



Obr. 2.48: Vplyv elektromagnetického poľa a kovového objektu.

- *Tienenie šírenia sínálu vo vysokom poraste (šum sínálu):* Sínál putujúci zo satelitu do prijímača GPS môže byť tienený, resp. zaniká v okolitom lesnom a vysokom krovitom poraste, t.j. dochádza k jeho tzv. „šumu“ (obr. 2.49). Satelity obiehajú na dráhach približne 20 200 km nad rovníkom a sínál putujúci do prijímača GPS je teda veľmi slabý a nie je problém, aby bol rušený. Typický príklad šumu je v prostredí zarastenom vegetáciou či pri nízkej polohe satelitu nad horizontom. Tranzitný čas je potom skreslený a zašumený sínál v prijímači GPS má vplyv aj na nižšiu presnosť v určení polohy jeho antény. Pomer

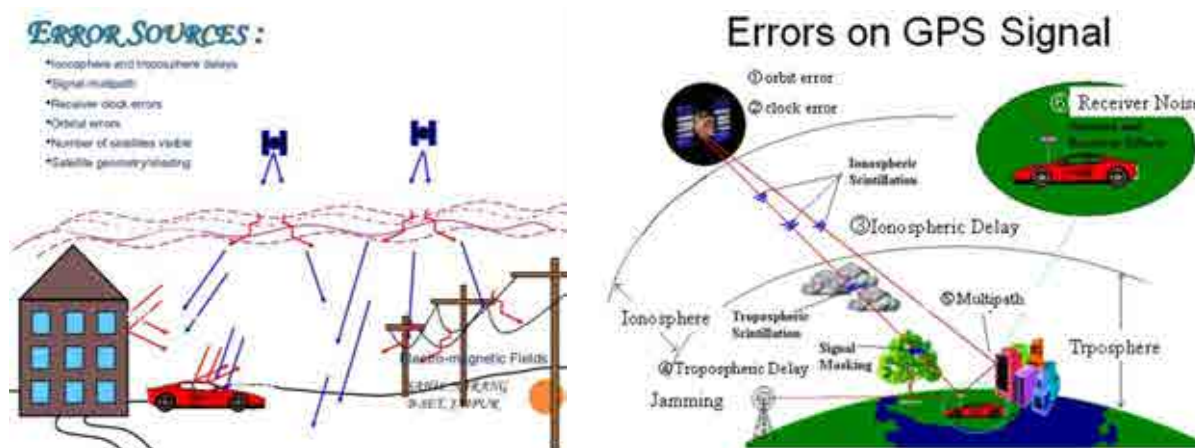
signál/šum je mierou obsahu užitočných informácií v signáli a jeho šumu. Pokiaľ tento pomer klesá, znamená to, že sa užitočné informácie postupne strácajú v šume. Signály zo satelitov sú pomerne slabé a pokiaľ je šum okolitého prostredia príliš veľký, tak sa GPS meranie stáva menej presné. Oslabenie signálu môže byť spôsobené rôznymi vplyvmi, napr. prechod korunami stromov alebo aj nízka pozícia satelitu nad horizontom.



Obr. 2.49: Tienenie (zašumenie) signálu porastom (A, C, D); bez tienenia signálu (B).

- *Chyba hodín:* Satelity GPS sú vybavené vysoko presnými hodinami (štvoro hodín, kap. 2.1.5), no i napriek tejto skutočnosti v rámci efemeríd sú vysielané i opravy týchto hodín. Prijímače GPS majú hodiny o niekoľko rádov menej presné, než majú satelity, a preto sa ako štvrtá neznáma pri určení polohy zavádza práve oprava chyby z chodu hodín prijímača GPS.
- *Typ prijímača:* Ak je požiadavka na dosiahnutie vyššej presnosti v určení 3D polohy bodu alebo objektu v teréne, je potrebné použiť k tejto požiadavke aj relevantný prijímač (aparáturu, prístroj, navigátor) GPS. K dosiahnutiu vyššej presnosti v určení polohy slúžia vysoko presné geodetické aparátury GPS a vsúčasnosti aj GNSS, ktoré pracujú na princípe fázového merania pseudovzdialeností medzi satelitom a prijímačom GPS/GNSS a ktoré dokážu stanoviť presnosť polohy aj s presnosťou na niekoľko ilimetrov. Na práce, ktoré nevyžadujú vysokú presnosť (napr. niekoľko metrov), postačia jednoduchšie prijímače GPS. Je prirodzené, že od požiadavky na presnosť aparátury GPS/GNSS sa odvíja aj jeho cena, teda čím je požiadavka na vyššiu presnosť, tým aj cena prístroja je vyššia. O prístrojovom vybavení k GPS meraniam pojednáva kap. 2.1.5 v časti *Užívateľský segment*.

Súhrnný prehľad o vyššie uvedených vplyvoch na signál GPS a tým na presnosť v určení 3D polohy podávajú názorné schémy na obr. 2.50.



Obr. 2.50: Zdroje chýb a ich vplyv na signál GPS.

2.1.11 GPS a slnečné žiarenie

Hoci je slnečné žiarenie pre život na Zemi životne dôležité, zároveň je vo väčšom rozsahu nebezpečné. Príkladom sú aj rôzne slnečné erupcie, ktoré so sebou prinášajú celé spektrum uvoľnenej energie a emisií z povrchu Slnka. Tie sa rozširujú do vesmíru a občas poriadne „obliznú“ aj našu Zem. I napriek skutočnosti, že GPS, resp. GNSS je v súčasnosti technicky najrozpracovanejší a najrozšírenejší navigačný satelitný a tiež informačný systém na určovanie 3D polohy objektu, až v období posledných niekoľkých rokov sa začína apelovať na rušiaci vplyv silných slnečných erupcií v rámci tzv. „extrémneho vesmírneho počasia“ na jeho funkčnosť. Slnečné erupcie priamo rušia signál satelitného polohovacieho GPS a môžu spôsobiť aj plošnú nefunkčnosť prijímačov GPS.

Solárne žiarenie a erupcie po prvý raz spozorovali v roku 1859 *Richard Christopher Carrington* a *Richard Hodgson*⁷³ ako viditeľné zosvetlenia na povrchu Slnka. Vyslaný mrak elektrónov, iónov a atómov dosiahne zvyčajne vzdialenosť k Zemi za hruba dva dni.

Výskumy na Cornell University v USA potvrdili vďaka pozorovaniam neobvykle silných slnečných erupcií počas decembra 2006, že vysokoenergetické slnečné rádiové impulzy vznikajúce počas erupcií na povrchu Slnka majú vážny dopad na GPS ako aj na ďalšie komunikačné technológie využívajúce rádiové vlny.

Slnečné rádiové impulzy vznikajú pri erupciách v hornej atmosfére Slnka, ktoré do priestoru vychrlia veľké množstvá vysokoenergetických častíc. Tieto častice pri kontakte s rádiovými vlnami v okolí Zeme využívanými človekom spôsobujú rozsiahly šum, ktorý tieto rádiové vlny ruší a degeneruje. Napr. 6. decembra 2006 masívne slnečné erupcie vygenerovali neobvyklé množstvo vysokoenergetických rádiových signálov, ktoré spôsobili, že veľké množstvo prijímačov GPS prestalo zachytávať signály zo satelitov GPS. GPS merania v rámci

⁷³ *Richard Christopher Carrington* (* 26. máj 1826, Londýn – † 27. november 1875, Churt) bol anglický astronóm. Venoval sa štúdiu Slnka a pozíčnej astronómii. Zistil, že Slnko nerotuje ako tuhé teleso, ale že najrýchlejšie rotujú rovníkové oblasti. Roku 1856 prvý pozoroval chromosferickú erupciu na Slnku. *Richard Hodgson* (* 1804, Londýn – 4 May 1872, Chingford) was an English publisher and amateur astronomer.

výskumu na Cornell University v čase silných slnečných erupcií v septembri 2005 a decembri 2006 potvrdili skutočnosť, že veľké množstvá vysokoenergetických častíc vychrľených počas vrcholiacich solárnych erupcií môžu spôsobovať rušenie prijímačov GPS niektorých užívateľov. Solárne erupcie spôsobili najskôr 40 % degradáciu úrovne signálu GPS na 70 sek., o 40 min. neskôr druhá vlna 15-minútovú degradáciu signálu o 50 %. K takémuto zníženiu úrovne signálu GPS pritom prišlo v tom čase na celej severnej pologuli.

S odvolaním sa na amerických predstaviteľov to uviedla agentúra AFP (z fran. *Agence France-Presse*, slov. *Francúzka tlačová agentúra*). Odborníci americkej *Národnej služby predpovedania počasia* (NWS) (z angl. *National Weather Service*) označili očakávanú slnečnú erupciu v roku 2011 za neobyčajnú a upozornili, že by 8. júna 2011 v čase približne od 20:00 hod. SELČ (*Stredoeurópsky letný čas*) mohla vyvolať geomagnetickú búrku. Zároveň však uistili, že účinky tejto búrky by na Zemi mali byť „relatívne slabé“, pretože erupcie nesmerovali priamo k našej planéte. Geomagnetická búrka s množstvom vysokoenergetických protónov by mohla narušiť napr. elektrické siete a signály zo satelitov GPS a tiež prinútiť lietadlá k zmene trás nad polárnymi oblasťami, ako to uviedol podľa AFP hovorca NWS.

Na Slnku došlo v priebehu augusta 2011 k trom erupciám, ktoré sa začali v utorok 2. augusta 2011. Americkí vedci NASA (z angl. *National Aeronautics and Space Administration*, slov. *Národná správa letectva a vesmíru*) koncom júla 2011 oznámili, že účinky série erupcií na Slnku už začínajú dosahovať Zem a mohli by približne deň ovplyvňovať niektoré komunikačné zariadenia. Americký Národný úrad pre oceány a atmosféru (NOAA) (z angl. *United States National Oceanic and Atmospheric Administration*) však vyhlásil, že problémy môžu postihnúť niektoré satelitné komunikačné systémy a navigačné satelitné systémy GPS.

K trom erupciám na Slnku došlo v auguste 2011. Erupcie sa začali v utorok 2. augusta 2011 a najsilnejšie elektromagnetické šoky cítil satelit pod označením ACE systému RTSWS (z angl. *Real Time Solar Wind System*, slov. voľný preklad: *systém slnečného vetra v reálnom čase*), systém ktorý ako jediný v súčasnom vesmírom výskume dokáže zistiť návaly slnečného žiarenia niekoľko minút pred tým, ako zasiahnu Zem. Veľmi silnú erupciu zažilo Slnko 7. júna 2006 a následný veľký mrak častíc pokryl oblasť o veľkosti takmer polovice slnečného povrchu, uviedla americká *Národná meteorologická služba USA* (USNMS) (z angl. *US National Meteorological Service*, slov. *US (americká) národná meteorologická služba*), ktorá pre NASA sleduje slnečnú činnosť.

Z výskumov zároveň vyplýva, že v roku 2011 a 2012, keď sa očakávalo najbližšie maximum slnečnej aktivity, malo prísť k degradácii úrovne signálu GPS až o 90 % na niekoľko hodín. GPS tak malo byť pravdepodobne efektívne vyradený z prevádzky. Žiaľ žiadne svetové vedecké výskumy v tomto smere vážnejší výpadok signálu GPS⁷⁴ v spomínaných rokoch 2011 a 2012 neboli a tak ani hypotetické predpoklady vplyvu silnej slnečnej aktivity na GPS sa nepotvrdili, ale ani nevyvrátili.

Naposledy najsilnejšia slnečná erupcia bola 6. septembra 2017, kedy Slnko uvoľnilo dve silné dávky radiácie. Klasifikovali sa ako najsilnejšie žiarenie, ktoré predstavuje trieda X. Podarilo sa im zablokovat' vysokofrekvenčné vlny a zasiahli aj systémy GPS/GNSS. Problém sa týkal strany Zeme smerujúcej k Slnku a trval zhruba hodinu. Mimochodom, išlo o najsilnejšie žiarenie za posledných 12 rokov. V roku 2003 však Zem čelila najväčšiemu

⁷⁴ Vážnejší výpadok signálu GPS sa myslí výpadok signálu GPS na niekoľko minút až hodín.

zaznamenanému žiareniu, ktoré dokonca vyradilo zo služby zariadenia NASA merajúce slnečné žiarenia.

I napriek vyššie uvedenému konštatovaniu dá sa očakávať, že globálne vyradenie funkčnosti GPS/GNSS vplyvom očakávaných silných slnečných erupcií aj v najbližších rokoch vyradí z prevádzky všetkých užívateľov tohto systému vrátane cestnej automobilovej dopravy a logistiky. Zatiaľ neobjasneným problémom zostáva najmä fakt, že nedokážeme predpovedať solárne erupcie väčších rozmerov. Náčrt modelu predpovedania tzv. „slnečného vetra“ bol riešený na *Geofyzikálnom ústave SAV* (Valach and Prigancová, 2006).

Z vyššie uvedeného zrejme, že narušenie vysielaných signálov zo satelitov vplyvom neočakávaných slnečných erupcií môže spôsobiť zlyhanie celého GPS/GNSS na dobu od niekoľkých sekúnd či minút až po dobu aj niekoľkých hodín, prípadne aj dní. V prípade, ak GPS sa používa ako informačný systém s prvkami bezpečnosti (napr. pri navigovaní dopravných prostriedkov, napr. automobilov a lietadiel), takýto výpadok funkčnosti GPS/GNSS vplyvom silného slnečného žiarenia („extrémneho vesmírneho počasia“) môže mať za následok havárie takýchto dopravných prostriedkov využívajúcich navigáciu GPS/GNSS s nedorozumeniami škodami na majetku, zraneniami, prípadne smrťou vodičov, pilotov a iných účastníkov cestnej a leteckej dopravy. Z tohto dôvodu je vedecký výskum vplyvu „extrémneho vesmírneho počasia“ na funkčnosť GPS a GNSS nevyhnutný.

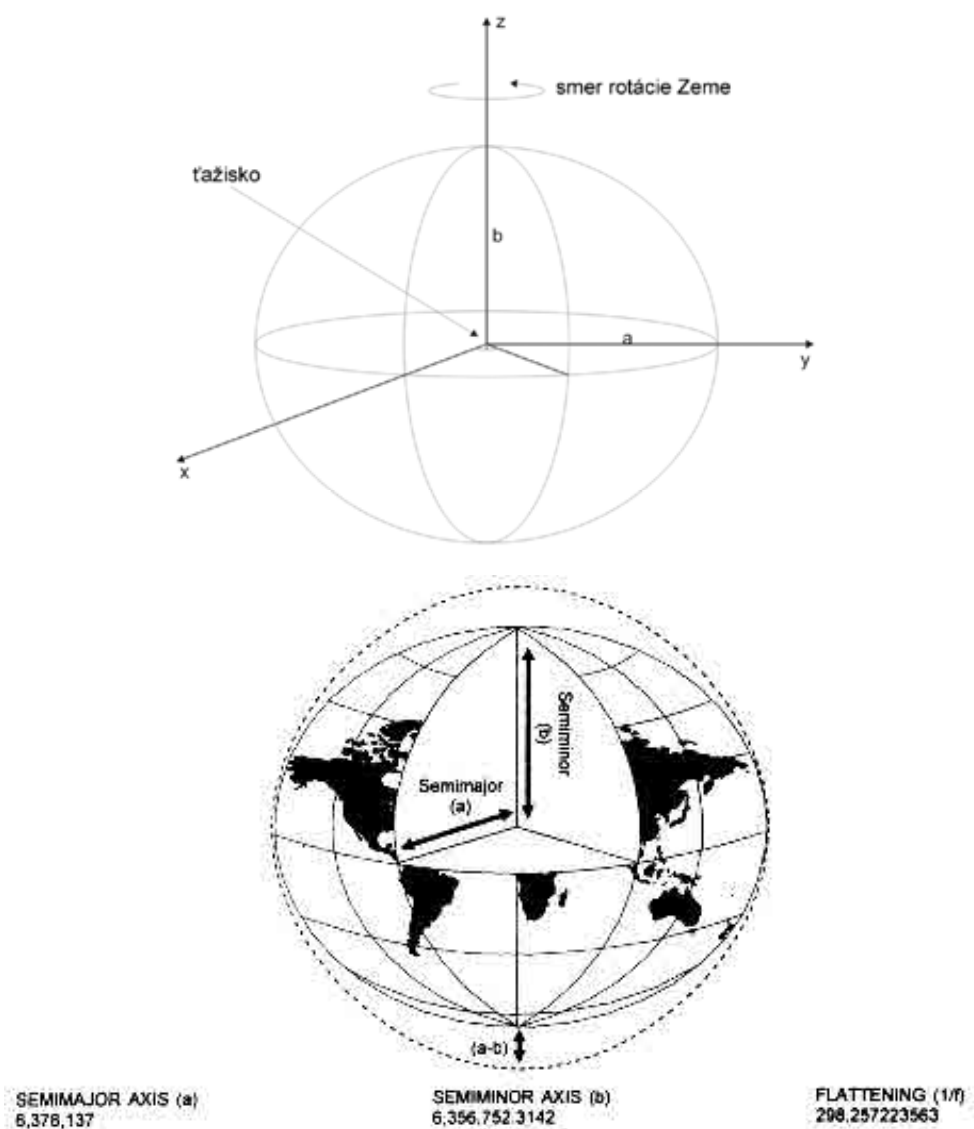
2.1.12 WGS 84

Svetový geodetický systém 1984 (WGS 84) (z angl. *World Geodetic System 1984*) je svetovo uznávaný geodetický štandard vydaný Ministerstvom obrany USA v roku 1984, ktorý definuje súradnicový systém, referenčný elipsoid a geoid pre geodéziu a navigáciu. V roku 1996 bol rozšírený o spresnenú definíciu geoidu EGM96⁷⁵. Bol vytvorený na základe meraní pozemných staníc satelitného polohového systému TRANSIT a nahrádza predchádzajúce systémy WGS 60, WGS 66 a WGS 72. Súradnicový systém WGS 84 je pravotočivá karteziánska sústava súradníc so stredom v ťažisku Zeme (vrátane morí a atmosféry). Kladná os x smeruje ku priesečníku nultého (greenwichského) poludníka a rovníka, kladná os z k severnému pólu a kladná os y je na obe predchádzajúce kolmá v smere doľava (90° východnej dĺžky a 0° šírky) a tvorí tak pravotočivú sústavu súradníc (obr. 2.51).

Parametre definujúce referenčný elipsoid WGS 84 sú (Leick et.al., 2015; Sedlák, 2012):

- dĺžka hlavnej polosi: $a = 6\,378\,137$ m,
- prevrátená hodnota sploštenia ($f = 1 - b/a$): $1/f = 298,257223563$,
- uhlová rýchlosť Zeme: $\omega = 7\,292\,115 \times 10^{-11}$ rad.sek.⁻¹,
- súčin hmotnosti Zeme (vrátane atmosféry) a gravitačnej konštanty: $GM = (3986000,9 \pm 0,1) \times 10^8$ m³.sek.⁻²,
- zonálny geopotenciálny koeficient druhého stupňa $J_2 = 108263 \times 10^{-8} = 7292115 \times 10^{-11}$ rad.sek.⁻¹,
- súbor súradníc bodov, ktoré určujú dráhy satelitov GPS.

⁷⁵EGM96 (*Zemský gravitačný model 1996*, angl. *Earth Gravitational Model 1996*) je geopotenciálny model Zeme pozostávajúci zo sférických harmonických koeficientov, ktoré sú úplné do stupňa a poriadku 360.



Obr. 2.51: WGS 84.

Ďalšie odvodené parametre:

- dĺžka vedľajšej polosi: $b = 6\,356\,752,3142\text{ m}$,
- prvá excentricita: $e = 8,1819190842622 \times 10^{-2}$.

Niektoré parametre geoidu⁷⁶ EGM96:

1. je tvorený pravidelným rastrom bodov vzdialených 15' (t.j. 130 317 sférických expanzií oproti 32 757 expanziám definovaným vo WGS 84).

⁷⁶ Geoid je fyzikálny model povrchu Zeme pri strednej (odporozovaná „nulová“ hladina) hladine svetových oceánov a morí. Je definovaný ako ekvipotenciálna plocha kolmá voči gravitácii, to jest plocha s rovnakou (konštantnou) hodnotou tiažového potenciálu ($W_0 = \text{konšt.}$), na ktorú je vektor tiažového zrýchlenia kolmý. Hodnota W_0 geopotenciálu, ktorú prijala IAU (z angl. *International Astronomical Union*, slov. *Medzinárodná astronómická únia*), je $62636856\text{ m}^2\text{s}^{-2}$.

2.2 GLONASS – GLOBÁLNY NAVIGAČNÝ SATELITNÝ SYSTÉM

GLONASS (z rus. *ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система*/*GLO*balnaja *NA*vigacionnaja *S*putnikovaja *S*ystema, slov. *Globálny navigačný satelitný systém*) je ruský navigačný satelitný systém. *GLONASS* rovnako ako *GPS* umožňuje určovanie 3D polohy, rýchlosti a času, t.j. lokalizácie a navigácie kdekoľvek a kedykoľvek na Zemi. *GLONASS* je globálny navigačný systém založený na podobnom princípe ako *GPS*. Vyvíja ho Rusko (RF-Ruská federácia, predtým ZSSR), aby získalo nezávislosť práve na americkom *GPS*. *GLONASS* je spravovaný Ministerstvom obrany Ruskej federácie, konkrétne pod novovytvorený rezort ministerstva, ktorým sú Vzdušno-kozmicke sily⁷⁷ a je k dispozícii aj pre civilných užívateľov.

2.2.1 Z histórie GLONASS

Predchodcom satelitného navigačného systému *GLONASS*, ako to bolo už uvedené v kap. 1.3.2, bol projekt *Cyklon*, označovaný taktiež *Cikada-M*. Bol sovietskou obdobou americkému systému *TRANSIT*. V roku 1976, t.j. o tri roky neskôr, kedy USA začali budovať projekt *GPS*, začína bývalý Sovietsky zväz (ZSSR) výstavbu svojho globálneho navigačného satelitného systému. Budovaný systém bol nazvaný *GLONASS* (Úvod, kap. 2.2).

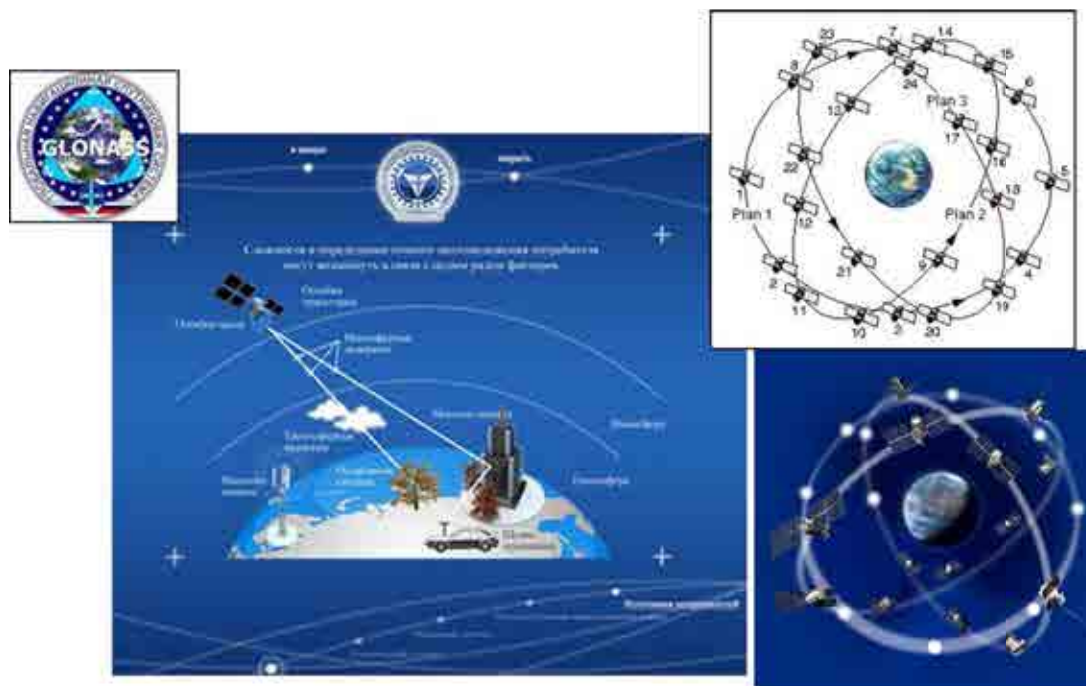
Kým USA dokončuje svoj navigačný satelitný systém - *GPS* v roku 1994 a nasledujúci rok je deklarované, že systém *GPS* dosiahol plnej operačnej spôsobilosti (*FOC*), dokončenie budovania systému *GLONASS* bolo narušené zmenou štátneho usporiadania a rozpadom bývalého Sovietskeho zväzu. Pokračovanie budovania projektu *GLONASS* po rozpade ZSSR (21. december 1991) je pod gesciou Ministerstva obrany RF. I napriek týmto politickým nestabilitám spojených aj s ekonomickými problémami v budovaní *GLONASS*, svoju *FOC* systém dosiahol taktiež v roku 1995 ako *GPS* (aspoň na krátku dobu).

2.2.2 Štruktúra, princíp činnosti, zásady a osobitosti GLONASS

GLONASS podobne ako *GPS* sa skladá z troch častí (segmentov, podsystémov, subsystémov) (Leick et al., 2015; Sedlák, 2012) (obr. 2.52, rus.):

- *kozmickeý (vesmírny) segment*,
- *riadiaci (pozemný) segment*,
- *užívateľský segment*.

⁷⁷ Vzdušno-kozmicke sily RF vznikli v decembri 2015 spojením Vzdušnej a kozmickej obrany a Vojenských vzdušných síl Ministerstva obrany RF.



Obr. 2.52: GLONASS; projektovaná konštelácia satelitov GLONASS na obežnej dráhe (vpravo hore).

Kozmický segment

Nosným prvkom systému *GLONASS* je 24 satelitov krúžiacich nad povrchom Zeme na troch orbitálnych dráhach so sklonom $64,8^\circ$ k rovníku a výškou 19 100 km. Satelity sa pohybujú po orbitách s obežnou dobou 11 hod. a 15 min. Pri aktivácii jestvujúcich 18 satelitov na obežnej dráhe, systém *GLONASS* zabezpečuje plnú navigačnú dostupnosť na celom území Ruska so 100 %-ným pokrytím. Na ostatných častiach Zeme pri tomto pokrytí je možná dostupnosť polovičná. Plná dostupnosť na celej Zemi je s 21 aktívnymi a 3 záložnými satelitmi. Takéto usporiadanie satelitov zaisťuje viditeľnosť minimálne 6 a maximálne 11 satelitov kdekoľvek na zemskom povrchu. Satelity systému *GLONASS* (obr. 2.53) sú vynášané na orbity z kozmodrómu Bajkonur (Kazachstan). Prvé satelity *GLONASS* pod názvom *Uragan* boli na obežnú dráhu vynesené roku 1982 ako *blok 1*. Doposiaľ bolo vynesených celkom 73 satelitov v 27 *blokoch*. V rámci 2. a 7. *bloku* boli vynášané vždy dva satelity, počínajúc 8. *blokom* vždy tri satelity.

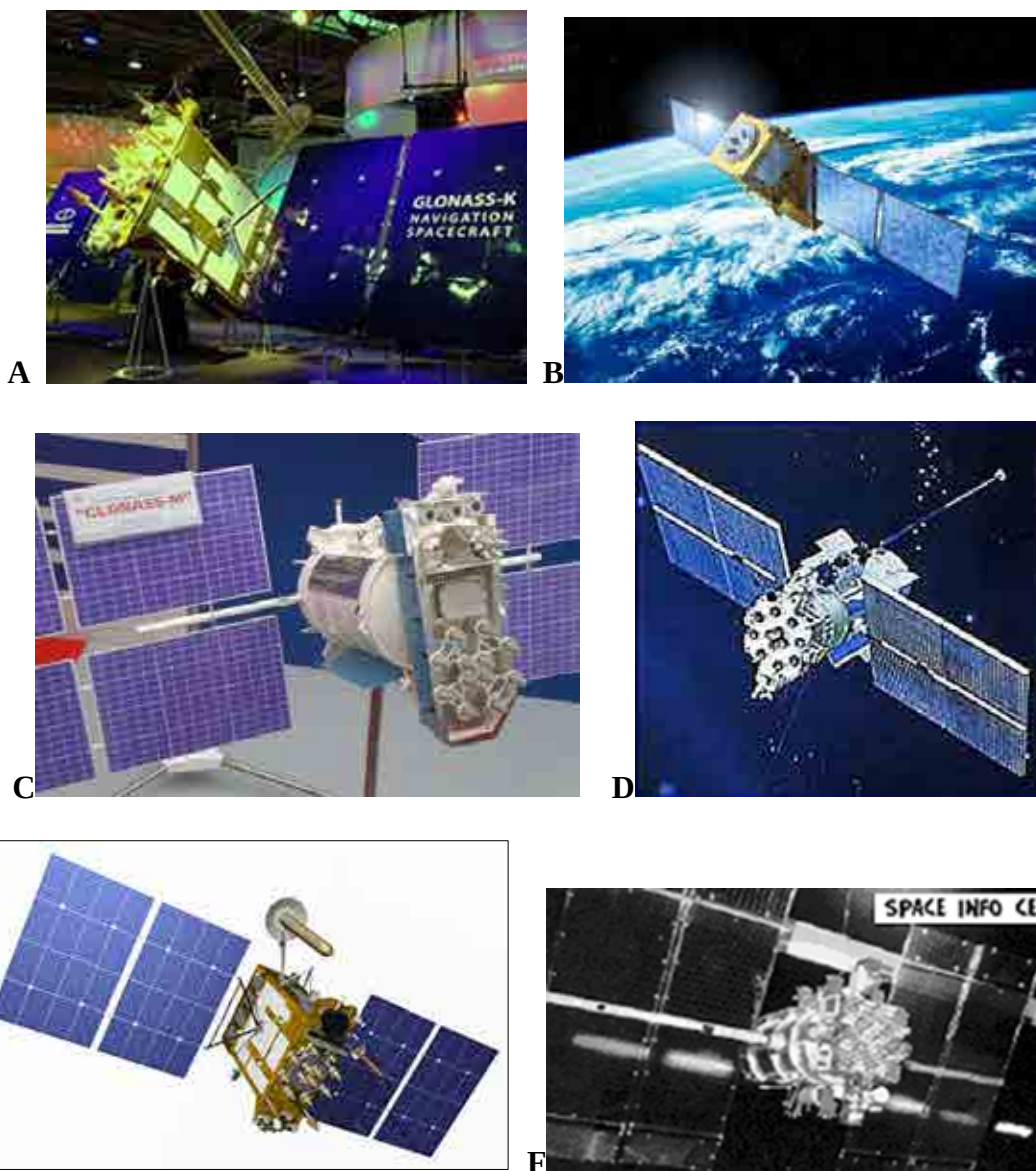
Kozmický segment *GLONASS* mal aj niekoľko technických problémov. Niektoré takéto problémy boli aj medializované, z ktorých je nasledovný výber.

Z TASR⁷⁸: Po zmene kurzu raketa dopadla do Tichého oceánu. Vyšetrowanie zistilo, že pre chybu vo výpočtoch došlo k nadmernému načerpaniu paliva do hornej časti rakety. Okrem toho vedenie spoločnosti podľa expertnej komisie nedodržalo pred štartom všetky bezpečnostné opatrenia. 29. decembra 2010 prezident ruskej federácie Dmitrij Medvedev odvolal dvoch vysokých predstaviteľov kozmického programu - zástupcu riaditeľa

⁷⁸ TASR – Tlačová agentúra Slovenskej republiky.

Ruskej vesmírnej agentúry (Roskosmos) Viktora Remiševského a viceprezidenta štátom kontrolovanej spoločnosti na konštrukciu rakiet RKK Energija⁷⁹ Viačeslava Filina.

Z TAČR⁸⁰: Tři nové přírůstky do ruské rodiny satelitního navigačního systému GLONASS za potáhnutí slzy dojetí svých tvůrců dle plánu opustily startovací rampu kosmodromu Bajkonur na samé špici rakety Proton v úterý 2. července 2013 v 04:38 ráno SELČ⁸¹. Nadšení však nemělo dlouhého trvání: během půlminutové „mise“ se nosná raketa vymkla kontrole, explodovala a její trosky završily havárii, ze které běhá mráz po zádech, dopadem zpět na území kosmodromu Bajkonur. Havárie si údajně nevyžádala žádné životy či zranění personálu kosmodromu.



Obr. 2.53: Satelit GLONASS-K model (A) a na orbite vo vesmíre (B); satelit GLONASS Uragan-M model (C) a na orbite (D) satelit GLONASS Uragan-K1 (E); satelit GLONASS dnes už nepoužívanej prvej série Uragan (fotografia NASA) (F).

⁷⁹ RKK Energija: Raketno-kosmičeskaja korporacija Energija im. S. P. Koroľova (slov. doslova: Otvorená akciová spoločnosť Raketovo-kozmičská korporácia Enegia S. P. Koroľova; rus. Открытое акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация „Энергия“ имени С. П. Королёва»).

⁸⁰ TAČR – Tlačová agentúra Českej republiky.

⁸¹ SELČ: stredoeurópsky letný čas.

V súčasnej dobe najstaršie satelity systému *GLONASS Uragan* boli v prevádzke až do roku 2005 a výrazne tak prekračovali plánovanú životnosť troch rokov. Od roku 2001 bola vyvinutá vylepšená verzia satelitov *GLONASS-M* s operačnou životnosťou 7 rokov. Dva satelity tohto typu boli vypustené v roku 2005. K dispozícii sú ešte novšie satelity *GLONASS-K* (verzia 1 a 2) so zníženou hmotnosťou a predĺženou životnosťou na 10 až 12 rokov. Satelity *GLONASS-KM* sú t.č. vo vývoji.

Rusko tiež pre dokončenie systému využíva dohody s indickou vládou, ktorá sľúbila vypustiť dva satelity *GLONASS Uragan-M* pomocou svojich rakiet. Dohoda bola uzavretá počas decembrového summitu v roku 2005 medzi indickým ministerským predsedom *Manmohan Singhom* a ruským *Vladimirom Putinom*. Jej hlavným účelom je zdieľania nákladov na vývoj satelitov *GLONASS Uragan-K* a následné vypúšťanie týchto satelitov z indických odpaľovacích rámp.

Manévrovacía schopnosť satelitov *GLONASS* v porovnaní so satelitmi *GPS* je nesmierne vysoká. Oficiálne *GLONASS* bol uvedený do plnej operačnej schopnosti (*FOC*) 24. septembra 1995 dekrétom prezidenta RF *Borisa Jelčina*⁸². Satelity *GLONASS-M* sú používané v systéme *GNSS*. Prehľad o kozmickom segmente *GLONASS* podáva tab. 2.8 (čes.). Konšteláciu satelitov *GLONASS-M* k 3. februáru 2012 o 9:48 hod. *GMT*⁸³ podáva obr. 2.54 (angl.).

Tab. 2.8: Prehľad o kozmickom segmente *GLONASS*.

Blok (životnost [#])	Období	Vypuštěno	Ve službě	Signály ⁵
Uragan(1)	1982–1985	10	0	3+0
UraganA(1)	1985–1986	6	0	3+0
UraganB(2)	1987–1988	6+6 ¹	0	3+0
UraganV(3)	1988–2005	59	0	3+0
GLONASS-M(7)	2001–2017	38+6 ¹ +8 ²	23+3 ³	4+0
GLONASS-K1(10)	2011–2020	2+11 ²	0+2 ³	4+1
GLONASS-K2(10)	2017+	0+3 ²	0	4+5
GLONASS-KM(?)	?	?	?	0
Celkem		121+12¹+32²	23+5³	

¹Ztracen při startu nebo selhalo oživení

²V přípravě

³Zavádění do provozu, testy nebo v záloze, údržbě

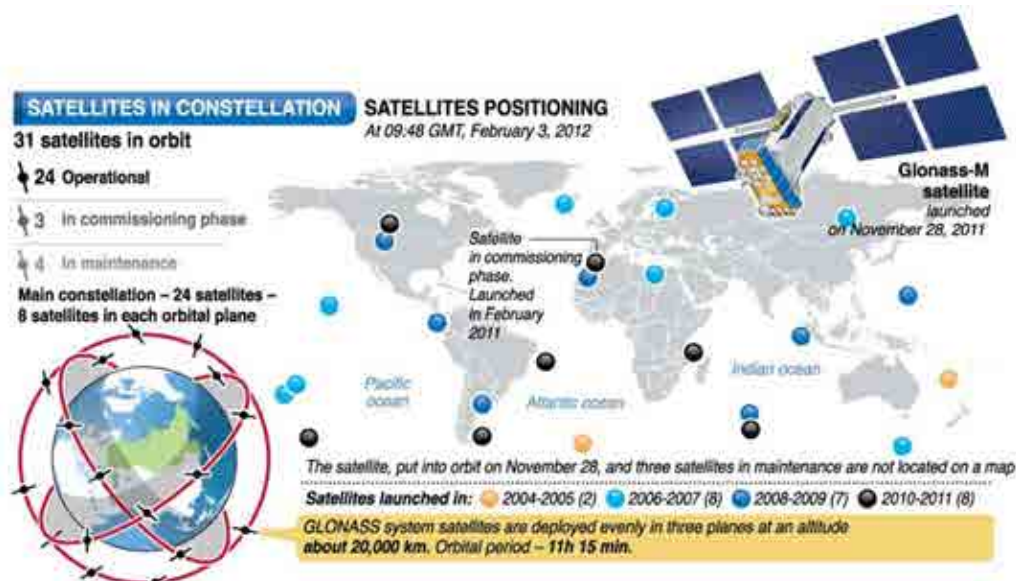
⁵ Frekvenční + kódová modulace

[#] Plánovaná životnost v letech

(Poslední změna: 10. února 2016)

⁸² *Boris Nikolajevič Jelčin* (rus. Борис Николаевич Ельцин; * 1. február 1931, Butka, Sverdlovská oblasť, ZSSR – † 23. apríl 2007, Moskva, Rusko) bol prezidentom Ruskej federácie v rokoch 1991–1999.

⁸³ *GMT*: Greenwich Mean Time (slov. Greenwichský stredný čas).



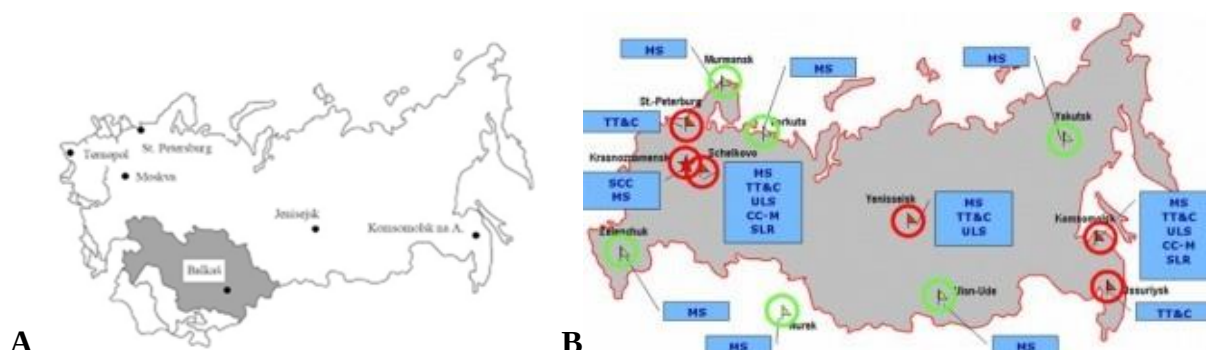
Obr. 2.54: Konštelácia satelitov GLONASS-M 3. februára 2012 o 09:48 GMT.

Riadiaci segment

Pozemný *riadiaci segment* GLONASS je kompletne situovaný v RF a Kazachstane (kozmodrom) (kap. 1.3.2) (obr. 2.55). Riadiaci a zároveň kontrolný segment pozostáva z:

- riadiaceho strediska v Krasnoznamensku (neďaleko Moskvy),
- troch rozšírených staníc – Šelmovo, Jenisejsk, Konsomolsk na Amure,
- piatich povelových staníc – Petrohrad, Ussurijsk, Šelmovo, Jenisejsk, Konsomolsk na Amure,
- desiatich monitorovacích staníc - Murmansk, Vorkuta, Jakutsk, Ulan-Ude, Nurek, Zelenčuk, Šelmovo, Jenisejsk, Konsomolsk na Amure.

Pozemný riadiaci segment sa takmer celý nachádza na území RF, z čoho vyplýva časové obmedzenie, kedy môže byť monitorovaný kozmický segment (obr. 2.55).



Obr. 2.55: Riadiaci segment GLONASS; mapa s lokalizáciou kozmodrómu v Bajkonure (Kazachstan) (A); mapa RF s lokalizáciou piatich povelových staníc (B).

Pozemné stanice *GLONASS* obdobne ako u *GPS* nepretržite monitorujú signály všetkých viditeľných satelitov. Uskutočňujú laserové merania vzdialeností medzi stanicami a satelitmi (každý satelit je pre tieto účely vybavený laserovými odrazákmi, čo je odlišnosť od *GPS*). Získané dáta prenášajú do hlavného riadiaceho centra v Krasnoznamensku pri Moskve. Takto usporiadaný pozemný riadiaci a kontrolný segment *GLONASS* (nerozložený rovnomerne po celom obvode zemegule ako je to u *GPS*) je istou nevýhodou, pretože každý satelit je zhruba 16 hod. denne mimo dosahu kontrolného a riadiaceho segmentu. Tým je sťažené monitorovanie stavu satelitov a znížená je i presnosť určovania efemeríd. Z tohto dôvodu sa u budúcich generácií satelitov *GLONASS* plánuje stav, keď satelity budú schopné vzájomne komunikovať a zároveň aj monitorovať sa, čo umožní zaistiť kontrolu integrity systému i počas doby, kedy sú satelity mimo priameho dosahu pozemného riadiaceho komplexu.

Užívateľský segment

Užívateľský segment je tvorený prístrojmi (prijímačmi *GLONASS*) ich užívateľmi a meracími postupmi. Vzhľadom k tomu, že budúcnosť *GLONASS* je nejasná, je počet dostupných prijímačov *GLONASS* veľmi obmedzená a počet výrobcov sa počíta rádovo na niekoľko jedincov. I napriek skutočnosti, že súčasné prijímače *GNSS* prijímajú signály zo satelitov *GPS* a *GLONASS*, po prípadnom zániku *GLONASS* tieto prijímače budú pracovať na základe príjmu signálov od *GPS* a v blízkej budúcnosti aj od navigačného systému *Galileo* prípadne aj *Compass*.

2.2.3 Činnosť *GLONASS*

Navigačný satelitný systém *GLONASS* nepretržite vysiela navigačné signály dvoch typov:

1. Navigačný signál *štandardnej presnosti* (rus. *стандартной точности* - *ST*) v prenosovom pásme *L1* (frekvencia 1,6 GHz). Táto informácia je dostupná všetkým používateľom na miestnej aj svetovej úrovni a zabezpečuje pri prevádzke prijímačov systému *GLONASS* možnosti prijímania:
 - horizontálne súradnice s presnosťou 50-70 m (pravdepodobnosť 99,7 %),
 - vertikálnych súradníc s presnosťou 70 m (pravdepodobnosť 99,7 %),
 - výpočet vektora rýchlosti s presnosťou 0,15 m.sek.⁻¹ (pravdepodobnosť 99,7 %),
 - časového signálu s presnosťou 0,7 μsek (pravdepodobnosť 99,7 %).

Tieto presnosti je prirodzene možno zlepšiť použitím diferenciálnej metódy merania súradníc alebo doplnením špeciálnymi metódami merania polohy v priestore.

2. Navigačný signál *vysokej presnosti* (rus. *высокой точности* – *VT*) v prenosovom pásme *L1* a *L2* (frekvencia 1,2GHz). Navigačný signál *VT* je hlavne určený pre potreby Ministerstva obrany RF a jeho neobmedzovaná prevádzka nie je v súčasnosti uvoľnená. Uvoľnenia signálu *VT* pre oblasť civilného využitia je v súčasnosti v štádiu rokovaní.

2.2.4 Systémový čas GLONASS

Satelity *GLONASS* sú vybavené céziiovými atómovými hodinami, ktorých denná chyba neprekračuje $5 \cdot 10^{-13}$ sek. Táto stabilita umožňuje zaistiť synchronizáciu so systémovým časom *GLONASS*. Systémový čas *GLONASS* (*GLONASST*), (z angl. *GLONASS Time*) je generovaný centrálnou synchronizačnou jednotkou realizovanou vodíkovými atómovými hodinami, ktorých denná chyba podobne ako u céziových atómových hodín nepresahuje $5 \cdot 10^{-13}$ sek. Na rozdiel od *GPS* je do systémového času *GLONASS* zavedený mechanizmus prestupných sekúnd, čo znamená, že tu nevzniká časový posun o celé sekundy. Tieto opatrenia zo začiatku komplikovali prevádzku *GLONASS*. Napr. tri prestupné sekundy zavedené k dátumu 31. december 1995, 30. jún 1990 a 30. jún 1993 viedli vždy ku vzniku problémov, ktoré spôsobili následné vyradenie systému z prevádzky na tri minúty. *GLONASST* vo vzťahu k *UTC* je vo vyjadrení: $GLONASST = UTC + 3 \text{ hod.}$

2.2.5 Súradnicový systém pre GLONASS

Polohy satelitov *GLONASS* sú udávané v geocentrickom referenčnom systéme *PZ 90* (z rus. *Parametri Zemli 1990*, slov. *Parametre Zemi 1990*). Parametre transformácie medzi súradnicovým systémom *PZ 90* a *WGS 84* doposiaľ neboli definitívne určené. Z experimentálnych meraní bolo zistené, že súradnice určovaných bodov v oboch systémoch (*WGS 84* a *PZ 90*) sa od seba nelíšia viac než 15 m (v priemere 5 m). Rotácia osí z oboch súradnicových systémov navzájom je okolo 0,4" a posun počiatkov je o 2,5 m pozdĺž osi y.

2.2.6 Základné princípy merania pseudovzdialenosti u GLONASS

Princíp určenia polohy (lokalizácie) a navigácie u *GLONASS* je analogický s americkým systémom *GPS*. *GLONASS* meria pseudovzdialenosti medzi prijímačom *GLONASS*⁸⁴ a okamžitou polohou satelitu.

Spôsoby merania pseudovzdialenosti medzi satelitmi a prijímačom *GLONASS* sú v zhode s *GPS* nasledujúce:

- meranie pseudovzdialenosti pomocou pseudonáhodných kódov (kódové, resp. časové meranie),
- meranie pseudovzdialenosti pomocou fázy nosnej vlny a meranie rozdielov fáz (fázové meranie).

⁸⁴ Prijímače *GLONASS*, ako to bolo už spomenuté v kap. 2.2.1 v podkapitole *Užívateľský segment*, sú na trhu ojedinelé, resp. na území SR (Slovenská republika) absolútne nedostupné (nepredávané), takže v prípade prijímania signálu od satelitov *GLONASS* môžeme hovoriť len v prípadoch súčasných prijímačov *GNSS*, ktoré sú schopné prijímať okrem signálov od satelitov *GPS* aj signály od satelitov *GLONASS*.

Kódové (časové) meranie pseudovzdialenosti (t.j. absolútne určenie polohy) sa používa pre navigáciu, pre presnú lokalizáciu 3D polohy sa používa podobne ako u *GPS* aj u *GLONASS* fázové meranie pseudovzdialenosti medzi satelitmi a prijímačom *GLONASS*. Kódové merania sa používajú pre absolútne určenie polohy s presnosťou rádovo niekoľko desiatok metrov až niekoľko metrov. Keďže signály systému *GLONASS* nie sú zámerne znepresňované a ani šifrované, takže absolútne určovanie polohy bolo za čias aktívnej SA⁸⁵ v systéme *GLONASS* omnoho presnejšie, než v prípade *GPS*.

Metódy určovania polohy bodu u *GLONASS* pre *fázové merania* (t.j. reálné určovanie 3D polohy) sú identické s metódami pre podobný spôsob merania (fázové meranie *GPS*) a určovania polohy (relatívne určovanie 3D polohy bodu alebo objektu) ako u *GPS*. Fázové merania sa realizujú u *GLONASS* v prípade požiadaviek na vyššiu presnosť v určení 3D polohy bodu alebo objektu a je to rádovo centimetre alebo aj menej, avšak je nevyhnutné použiť fázové merania na nosnej vlne *L1*. Civilné využitie *GLONASS*, ktorého riadenie patrí pod Ministerstvo obrany RF, je v súčasnosti jedine v rámci *GNSS*. Súčasné prijímače *GNSS* umožňujú príjem signálov od satelitov *GPS* aj *GLONASS*.

2.3 GPS VERSUS GLONASS

Hlavný rozdiel medzi *GPS* a *GLONASS* je v tom, že satelity *GLONASS* nemajú dráhovú (orbitálnu) rezonanciu⁸⁶ s rotáciou Zeme, čo im poskytuje vysokú stabilitu. To znamená, že satelity nevyžadujú žiadne dodatočné korekcie v priebehu celého aktívneho života. Naopak nevýhodou ruského systému je výrazne kratšia životnosť satelitov. Už prvý pohľad na kozmické segmenty *GLONASSu* a *GPS* napovedá o výraznej odlišnosti v konštelácii satelitov u oboch systémov (obr. 2.56, rus.).



Obr. 2.56: Odlišnosť v konštelácii satelitov *GLONASS* (vľavo) a *GPS* (vpravo).

⁸⁵ SA bolo u *GLONASS* zrušené podobne ako u *GPS*.

⁸⁶ Dráhová rezonancia (iné názvy: orbitálna rezonancia, Laplaceova rezonancia alebo komezurabilita) je vlastnosť pohybu dvoch telies v slnečnej sústave, pri ktorej sú ich obežné doby v pomere malých celých čísel. V takom prípade nastávajú medzi telesami gravitačné väzby (rezonancie), ktoré ovplyvňujú stabilitu tohto usporiadania. Obežné dráhy, po ktorých sa tieto telesá pohybujú, nazývame komezurabilné.

Tab. 2.9 (angl.) a obr. 2.57 (angl.) podávajú porovnanie *GLONASS* a *GPS* v dátach. Obr. 2.57 prezentuje porovnanie *GPS* a *GLONASS* všeobecne, bez konkretizácie dátumu porovnávania.

Tab. 2.9: Porovnanie GLONASS vs GPS v dátach (január 2015).

Specification	GLONASS	GPS
Owner	Russian Federation	United States
Number of satellites	At least 24	31*
Orbital Height	19 500 km	20 190 km
Accuracy	Position: 5–10 m	Position: 3,5–7,8 m
Orbital plane inclination	64,8 degree	55 degree
Orbital period	11 hours and 16 minutes	11 hours and 58 minutes
Frequency	Around 1.602 GHz (L1 signal) Around 1.246 GHz (L2 signal)	1.57542 GHz (L1 signal) 1.2276 GHz (L2 signal)
Status	Operational	Operational



Obr. 2.57: Porovnanie GLONASS vs GPS v dátach.

2.4 GALILEO

2.4.1 Z histórie systému Galileo

NAVSTAR GPS a GLONASS sú systémy financované a kontrolované vojenskými zložkami. Je reálna obava, že vojenské zložky (Ministerstvá obrany USA a RF) môžu kedykoľvek civilných užívateľov „odstaviť“ od ich používania, t.j. zakódujú signály vysielané zo satelitov. Preto EÚ sa rozhodla budovať svoj vlastný globálny navigačný satelitný systém, ktorý by vlastnil, spravoval a financoval výlučne civilný sektor EÚ, t.j. *Európska komisia*⁸⁷ (EK). V projekte navigačného systému *Galileo* bolo plánovaný navigačný satelitný systém, ktorý bude pozostávať z 30 satelitov a na rozdiel od svojich náprotivkov z USA a RF bude navrhnutý špeciálne len na civilné a komerčné účely. Rovnako bude riadený a kontrolovaný civilným manažmentom (Komisia európskych spoločností, 2006).

Ako to už bolo vyššie uvedené v týchto vysokoškolských skriptách (úvod, kap. 1 a 2), pokiaľ navigačné satelitné systémy zabezpečujú celosvetové pokrytie signálom, potom sa označujú ako globálne navigačné satelitné systémy (GNSS). Ich prioritnou výhodou je schopnosť určovať 3D polohu ľubovoľného miesta na Zemi i mimo Zeme s vysokou presnosťou a navyše pre celú Zem poskytujú jednotný referenčný súradnicový systém (WGS 84). V tomto zmysle sa rozumie hlavne navigačný satelitný systém americký GPS, ruský GLONASS a veľmi očakávaný európsky systém *Galileo*. Na rozdiel od systému TRANSIT, ktorý fungoval na princípe *Dopplerovho javu*, všetky doterajšie navigačné satelitné systémy vrátane budovaného navigačného systému *Galileo* využívajú princíp pasívnej dĺžkomernej metódy určovania 3D polohy a pracujú na stredných kruhových dráhach MEO (Blair and EJR-Quartz, 2011; Sedlák, 2012; Šebesta, 2012).

EK od roku 2001 stavia globálny navigačný satelitný systém *Galileo*, ktorý spolu s navigačnými satelitnými systémami - americkým GPS, ruským GLONASS, čínskym *Compass* a regionálnymi podporujúcimi satelitnými navigačnými systémami SBAS budú tvoriť nové GNSS (Blair and EJR-Quartz, 2011; Leick et al., 2015; Sedlák a Lošonczi, 2011; Sedlák, 2012).

Navigačný satelitný systém *Galileo* je pomenovaný podľa známeho stredovekého vedca *Galileo Galilei*⁸⁸, ktorý ako prvý na svete navrhol pre námorníkov v stredoveku navigáciu podľa nebeských telies (astronomická navigácia).

EK po prvý raz predstavila svoje plány na vybudovanie európskeho systému satelitnej navigácie *Galileo* 10. februára 1999. Predpokladala rozvoj projektu v štyroch fázach a zmiešanú formu financovania, teda na jednej strane z verejných financií a súčasne istá časť prostriedkov mala prísť zo súkromného sektora. Systém *Galileo* na rozdiel od svojich náprotivkov z USA a Ruska (GPS a GLONASS) je navrhnutý špeciálne pre civilné a komerčné účely. Rovnako bude riadený a kontrolovaný civilným manažmentom. Prvotná fáza

⁸⁷ Európska komisia (EK) je najvyšší výkonný orgán EÚ, ktorý má v mnohých otázkach rozhodovaciu právomoc. Navrhuje legislatívu EÚ, kontroluje dodržiavanie tejto legislatívy v členských krajinách EÚ a zastupuje EÚ voči členským štátom aj navonok. Z prevažnej časti spravuje rozpočet EÚ.

⁸⁸ *Galileo Galilei* (* 15. február 1564, Pisa, Taliansko – † 8. január 1642, Arcetri, Taliansko) bol taliansky filozof, fyzik, astronóm, matematik obdobia renesancie, jeden zo zakladateľov súčasnej experimentálno-teoretickej prírodovedy. Je mu pripisované autorstvo výroku „Eppur si muove!“ *A predsa sa točí!* (Zem sa krúti okolo svojej osi).

(obdobie rokov 2001 až 2005) programu, teda rozvoj projektu *Galileo*, mala byť financovaná výlučne z jedného zdroja a mal na ňu dohliadať jeden manažérsky tím. Preto EK navrhla ustanovenie tzv. *Spoločný podnik Galileo (GJU)* (z angl. *Galileo Joint Undertaking*⁸⁹), ktorého zakladajúcimi členmi by sa stali EK a *Európska vesmírna agentúra (ESA)*⁹⁰. Európska investičná banka (*EIB*) a súkromné spoločnosti by boli pozvané pripojiť sa k projektu až neskôr. 26. mája 2003. EK a ESA dospeli k dohode o legislatívnej identite a financovaní navigačného satelitného systému *Galileo*.

Pôvodne systém *Galileo* mal byť prevádzkyschopný od roku 2010, no z dôvodu technických, ekonomických a iných príčin sa tento termín presunul na roky 2014 až 2015. Ani tieto termíny neboli však splnené a prvé signály od satelitov systému *Galileo* bolo možné prijímať v obmedzenom režime až od 15. decembra 2016. Komplexné dobudovanie a plná funkčná schopnosť (*FOC*) *Galilea* sa predpokladá koncom roka 2019.

Tab. 2.10 predkladá odsúhlasený pôvodný harmonogram programu budovania systému *Galileo*, ktorý bol aktualizovaný ešte v júni 2006.

Tab. 2.10: Pôvodný harmonogram programu *Galileo*.

Fáza	Aktivity	Financovanie
Fáza rozvoja a validácie. Pokračuje až do začiatku roka 2009.	Fáza výskumu: vývoj družíc a základných systémových komponentov. Validácia obežných dráh družíc.	1,5 mld. eur. 50% z rozpočtu EÚ a 50 % z rozpočtu ESA.
Fáza inštalácie (2009 - 2011).	Výroba a vypustenie družíc, ich rozmiestnenie vo vesmíre a nastavenie. Nastavenie iných systémových komponentov.	2,1 mld. eur. 1/3 by mala pochádzať z rozpočtu EÚ, zvyšné 2/3 zo súkromného sektora (teda ako sa pôvodne plánovalo od roku 2003).
Fáza komerčnej prevádzky <i>Galilea</i> (od roku 2014).	Komerčná prevádzka a využitie kompletného systému.	Projekt by mal byť ziskový, preto by nemali byť potrebné žiadne ďalšie dotácie.

Vzhľadom na začínajúcu celosvetovú hospodársku krízu od roku 2009 z tohto uvedeného plánu sa realizovala len malá projektová časť (Komisia európskych spoločností, 2006).

Systém *Galileo* patrí v súčasnosti z vedeckého pohľadu k najprepracovanejšiemu navigačnému satelitnému systému pre zisťovanie polohy na zemskom povrchu. *Galileo* je vlajkovou loďou tzv. *Európskej kozmickej politiky*. Medzi jej ciele patrí okrem iného odpovedať na potreby občanov, slúžiť iným politikám EÚ, zameriavať sa na kozmické aplikácie a zlepšovať európsku konkurencieschopnosť. Systém *Galileo* je vynikajúcim nástrojom na dosiahnutie týchto výsledkov. Systém *Galileo* je taktiež potrebné vnímať v širokom kontexte programu EK zameraného na podporu inovácií a lisabonskej stratégie⁹¹, v ktorej môžu byť činnosti verejného sektora kľúčovými prvkami podpory rozvoja svetových konkurencieschopných spoločností.

⁸⁹ *Galileo Joint Undertaking (GJU)* je názov spoločného podniku pôvodne zodpovedného za satelitný systém určovania polohy *Galileo*. *Európska vesmírna agentúra (ESA)* a EK vytvorili *GJU* v júli 2003 na obdobie štyroch rokov. Sídlo *GJU* bolo v Bruseli v Belgicku. *GJU* zanikla 31. decembra 2006.

⁹⁰ *Európska vesmírna agentúra alebo Európska kozmická agentúra (ESA, z angl. European Space Agency)* je medzivládna organizácia na výskum vesmíru založená v roku 1974, ktorá má v súčasnosti 22 členských štátov. Sídlo jej riaditeľstva je v Paríži a jej jednotlivé centrá sú vo zvyšných členských štátoch.

⁹¹ V marci 2000 sa najvyšší predstavitelia štátov a vlád členských štátov EÚ na rokovaní v Lisabone dohodli na ambicióznom ciele - urobiť z EÚ do roku 2010 najkonkurencieschopnejšiu a najdynamickjšiu poznatkovo orientovanú ekonomiku sveta schopnú trvalo udržateľného rastu, s väčším množstvom pracovných miest a väčšou sociálnou súdržnosťou. Podľa miesta, v ktorom Európska rada sformulovala tento zámer, vznikol názov Lisabonská stratégia.

2.4.2 Štruktúra, princíp činnosti, zásady a osobitosti systému Galileo

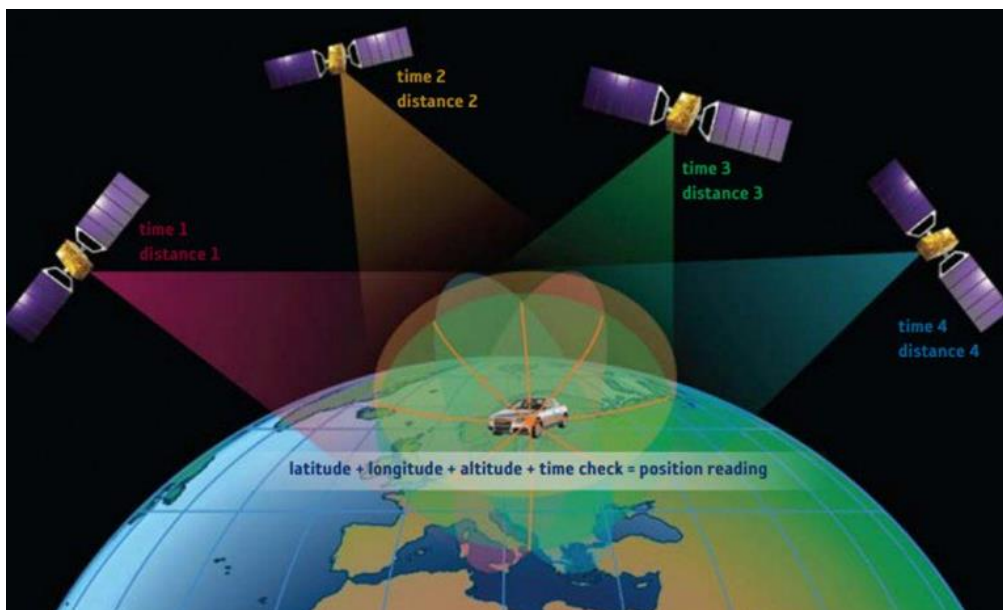
Navigačný satelitný systém *Galileo* je založený na plánovanom umiestnení 30 satelitov nad zemskú atmosféru. Popri tom budú súčasťou systému aj dodatočné pozemské stanice. Technológia umožní zistiť aktuálnu geografickú polohu mnohým užívateľom, najmä v sektoroch dopravy (lokalizácia vozidiel, vyhľadávanie cestných spojení, kontrola rýchlosti, navigácia v priestore a pod.), sociálnych služieb (sprostredkovanie pomoci starým alebo postihnutým ľuďom), v systéme spravodlivosti a colných služieb (vyhľadávanie podozrivých, kontrola a monitoring hraníc) a vo verejnej sfére (geografické informačné systémy, geodézia, stavebníctvo, pôdohospodárstvo, lesné a vodné hosp., atď.). *Galileo* by mal rovnako pomôcť pátracím a záchranným službám a taktiež bežným užívateľom pri ich voľnočasových aktivitách (turistika, skialpinizmus a pod.). Nateraz sa neplánuje s vojenským využívaním *Galilea*, aj keď zrejme nájde využitie aj v inštitúciách zodpovedajúcich za európsku bezpečnosť a obranu. Satelitná navigácia *Galileo* môže napr. pomôcť pri lokalizácii nášľapných mín alebo raketových striel. Signál zo satelitov *Galilea* sa dostane aj do najvzdialenejších regiónov EÚ a taktiež do celého sveta. Prednosťou systému *Galileo* oproti *GPS* je dosah kvalitných a plnohodnotných signálov aj za polárne kruhy, čo *GPS* neposkytuje.

Infraštruktúra systému *Galileo*: V decembri 2005 bolo rozhodnuté, že administratívne centrum *Galilea* sa bude nachádzať v Prahe, zatiaľ čo jeho operačné riaditeľstvo bude sídliť v Londýne. EÚ a USA podpísali v júni 2004 dohodu o zabezpečení kompatibility medzi oboma konkurujúcimi si navigačnými systémami (*GPS* a *Galileo*). Dohoda znamená, že obe strany súhlasili so spoločnými štandardmi pre americký *GPS* a európsky *Galileo*, ktorý je momentálne v štádiu vývoja.

Princíp činnosti systému *Galileo* je rovnaký ako u *GPS* alebo *GLONASS*. 3D poloha bodu či objektu na zemskom povrchu alebo aj mimo neho sa určí na základe vyhodnotených vzdialeností satelit-prijímač, t.j. ako priesečník guľových plôch o polomeroch vzdialenosti satelit-prijímač. Podmienka je príjem signálov z minimálne štyroch satelitov (obr. 2.58, angl.). Prijímače na zemskom povrchu spracovávajú signály, ktoré vysielajú satelity a na základe tohto spracovania stanovujú svoju 3D polohu. Všetky ostatné funkcie, akými sú presné zistenie polohy na digitálnej mape alebo prenos informácií o polohe pre iné účely, sa vykonávajú v užívateľskom zariadení. Navigačná satelitná infraštruktúra je sama o sebe „pasívnou“ koncepciou, t.j. nepozná polohu užívateľa (Blair and EJ-Quartz, 2011; Leick et al., 2015; Sedlák a Lošonczy, 2011; Sedlák, 2012; Šebesta, 2012).

Systém *Galileo* bude poskytovať veľmi presné 3D polohovacie a časové služby po celom svete pre civilné aplikácie, predovšetkým pre pozemskú dopravu. Vďaka spoľahlivosti bude možné ľahko vyvíjať technológie prijímačov a aplikácií. *EGNOS*⁹² (z angl. *European Geostationary Navigation Overlay Service*, slov. *Európska geostacionárna navigačná prekryvná služba*), t.j. európsky SBAS systém, ktorý bude využívať satelity systému *Galileo* a ktorý dopĺňa a zlepšuje výkon *GPS* najmä nad Európou, už poskytuje služby v skúšobnej prevádzke.

⁹² *EGNOS* (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) je aplikácia systému SBAS (*Satellite Based Augmentation System*), ktorý dopĺňa a vylepšuje vlastnosti *GPS* v Európe. Považuje sa ako predstupeň pre GNSS, resp. *Galilea*, a preto je časť satelitov *EGNOS* v testovacej prevádzke a nemá žiadnu garantovanú dostupnosť. Prevádzkovateľom systému je ESA za pomoci 34 pozemných monitorovacích staníc a niekoľkých geostacionárnych satelitov komerčných subjektov.

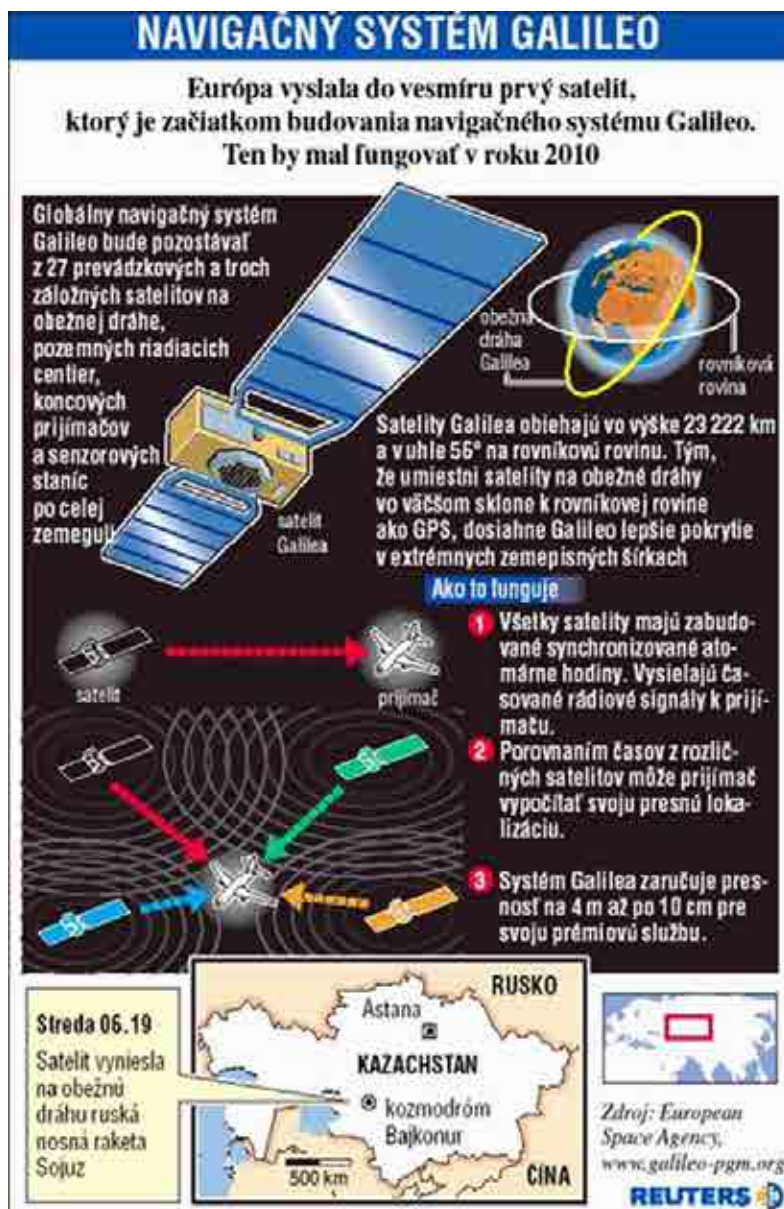


Obr. 2.58: Princíp satelitného navigačného systému Galileo pri určovaní 3D polohy.

Vypustenie prvého skúšobného (testovacieho) satelitu systému *Galileo* sa konalo v roku 2005. Dňa 28. decembra 2005 bol do vesmíru vyslaný prvý technologický navigačný satelit pre testovanie vesmírneho segmentu tohto systému, pomenovaný *GIOVE-A* (*GIOVE* - z angl. *Galileo In-Orbit Validation Element*, slov. voľný preklad: *Prvok validácie Galilea na orbite*) (obr. 2.59). Vyniesla ho z kazašského kozmodrómu Bajkonur (obr. 2.60) ruská raketa Sojuz-FG/Fregat. Satelit *GIOVE-A*, vážiaci 600 kg, bol vyslaný na 23 222 km vzdialenú obežnú dráhu okolo Zeme. Satelit vyrobila britská spoločnosť *Surrey Satellite Technology, Ltd.* 27. apríla 2008 bol vypustený na obežnú dráhu druhý experimentálny satelit *GIOVE-B* (obr. 2.61). Podľa *ESA* nesie satelit *GIOVE-B* zatiaľ najpresnejšie atómové hodiny, aké boli použité vo vesmíre. Podobne, ako satelit *GIOVE-A*, aj satelit *GIOVE-B* bol vypustený z kozmodrómu Bajkonur v Kazachstane.



Obr. 2.59: Satelit GIOVE-A.



Obr. 2.60: Navigačný satelitný systém Galileo v dátach; mapa Kazachstanu s lokalizáciou kozmodrómu Bajkonur.



Obr. 2.61: Satelit GIOVE-B.

Podľa pôvodného projektu prvé štyri operačné satelity prevádzkovej konštelácie systému *Galileo* mali byť vypustené v roku 2008. V skutočnosti sa tak nestalo. Ako to už bolo vyššie konštatované, systém *Galileo* v roku 2009 začal naberať ekonomické problémy. Ešte koncom roka 2009 vyšla správa SITA/AFP⁹³, že prvé štyri operačné satelity z celkového počtu tridsať by mali byť ruskými raketami typu Sojuz (menom Protón K/M, obr. 2.62, angl., rus.) vynesené na obežnú dráhu v prvom štvrtroku 2010. Súkromné konzorcium potom malo rozmiestniť celú konšteláciu satelitov prostredníctvom služieb tzv. *Verejno-súkromnej partnerskej zmluvy*. Tieto služby mali byť sprístupnené v roku 2010. Vzhľadom na začínajúcu celosvetovú hospodársku krízu od roku 2009 z tohto uvedeného plánu sa realizovala len malá projektová časť.



Obr. 2.62: Ruská raketa Proton-K/M na odpaľovacej rampe.

V druhej polovici roka 2011 boli vypustené prvé dva operačné satelity systému *Galileo*. Na jeseň 2012 sa k nim pridali ďalšie dva satelity. Ďalšie satelity sa na obežnú dráhu dostali až v roku 2015. Posledná správa o počte satelitov 10 systému *Galileo* je zo septembra 2015. Komerčná prevádzka *Galilea* s 18 satelitmi je od polovice decembra 2016 (15. december 2016). Dokončenie celého projektu *Galileo* s 30 satelitmi sa očakáva koncom roka 2019.

TAČR priniesla v novembri 2012 správu o prvých úkonoch (operáciách) nových satelitov *Galileo* vo vesmíre: 5.11.2012 *Zpráva o prvních úkonech nových satelitů Galileo ve vesmíru. Týden po startu z evropského kosmodromu v Kourou (Francouzská Guayana)*⁹⁴ dokončily dva

⁹³ SITA - Slovenská tlačová agentúra. AFP - Agence France-Presse.

⁹⁴ *Francúzska Guyana* (-normovaný názov) (po francúzsky *Guyane (française)*), staršie *Zámorský departmán Francúzskej Guyany*, je francúzske územie - zámorský departement a zámorský región Francúzska v Južnej Amerike.

nejnovější satelity systému Galileo fázi LEOP (z angl. *Launch and Early Orbit Phase*; čes. *vypuštění a počáteční činnost ve vesmíru*). Stalo se tak 19. a 20. října 2012.

Satelity systému Galileo (všetky okrem testovacích satelitov GIOVE-A a GIOVE-B) sú vypúšťané do vesmíru z európskeho kozmodrómu v Kourou (Francúzska Guayana) (obr. 2.63).



Obr. 2.63: Francúzska Guayana (mapa dole); pohľad do riadiaceho strediska kozmodrómu v Kourou (fotografia hore).

Vynášanie satelitov systému Galileo zasiahli aj niektoré technické nedostatky či neúspechy. Napr. agentúra AFP priniesla 24. augusta 2014 správu: *Dva satelity európskeho navigačného systému Galileo, ktoré v piatok vyniesla do vesmíru ruská raketa Sojuz, nedosiahli predpokladané obežné dráhy. Oznámila to dnes agentúra AFP s odvolaním sa na spoločnosť Arianespace, ktorá má let na starosti.*

Galileo teda začal oficiálne fungovať v obmedzenom režime v polovici decembra 2016. Na obežnej dráhe je 18 satelitov v tzv. *skorej operačnej schopnosti (EOC)* (z angl. *Early Operational Capability*). Jedná sa o komerčnú, obmedzenú sféru využívania systému Galileo. Presnosť systému Galileo mala byť najväčšou konkurenčnou výhodou oproti iným satelitným systémom, najmä americkému GPS. S presnosťou sú však nateraz problémy. Totiž už v januári 2017 ESA konštatovala, že niektoré satelity systému Galileo majú problematické hodiny. Uplynulo len čosi viac ako mesiac (15. december 2016), kedy bol európsky navigačný systém Galileo spustený do čiastočnej prevádzky a už sa objavili neprijemné problémy.

Momentálne je na obežnej dráhe 18 satelitov Galileo (z plánovaných 30). Systém je funkčný, ale na viacerých satelitoch sa objavili závady - zlyhávajú atómové hodiny. Extrémne presné atómové hodiny sú pritom kľúčom k presnej navigácii. Aby sme ilustrovali potrebnú

presnosť, predstavme si, že pri rýchlosti svetla urazí signál za milióntinu sekundy asi 300 m. Ak by hodiny pracovali s takouto chybou, navigácia by bola vysoko nepresná a systém by bol prakticky nepoužiteľný. A systém *Galileo* k dosiahnutiu čo najvyššej presnosti v 3D lokalizácii a navigácii s presnosťou niekoľkých milimetrov si zakladal na spoľahlivých a presných hodinách. Každý satelit má na palube hneď štvoro atomových hodín, ktoré merajú čas na základe rezonančnej frekvencie atómov. Dvoje rubídiové hodiny pracujú s atómami rubídia v plynnej forme, druhú dvojicu tvoria ešte presnejšie hodiny s vodíkovým maserom (obr. 2.64, angl.). Z činnosti bolo vyradených deväť atómových hodín - troje rubídiových a šesť presnejších hodín s vodíkovými masermi. Niektoré hodiny sa podarilo sfunkčnúť ich reštartovaním. Celkovo by podľa ESA plánované a prípadne potrebné úpravy hodín na ďalších nových satelitoch nemali ohroziť termín vypustenia ďalších štyroch satelitov, ktoré bolo plánované na druhý polrok 2017.



Obr. 2.64: Ukážka atómových - vodíkových hodín navigačného systému Galileo.

Vývoj projektu *Galileo* v sumárnom prehľade je nasledovný:

- 7. decembra 1999 – EÚ odsúhlasila začatie štyroch výskumných štúdií, ktoré umožnia vytvorenie Galilea, ktorý má zefektívniť komunikačné spojenie na Zemi.
- 28. decembra 2005 a 27. apríla 2008 – Do vesmíru vypustili dva prieskumné satelity Galilea.
- 8. decembra 2010 – Ministri dopravy EÚ potvrdili, že administratívna časť Galilea bude sídliť v Prahe.
- 21. októbra 2011 – Na obežnú dráhu boli vynesené prvé dve družice Galilea. Ďalšia dvojica nasledovala 12. októbra 2012.
- 12. marca 2013 – Galileo zameral svoj prvý cieľ s presnosťou na desať až 15 metrov, čo bolo v súlade s očakávaním.
- 22. augusta 2014 – Ďalšia dvojica vyslaných satelitov najskôr nedosiahla predpokladanú obežnú dráhu, neskôr museli byť pre nich uskutočnené nápravné manévry.
- V septembri 2015 už bolo na obežnej dráhe celkom desať satelitov.
- 24. mája 2016 – Galileo rozšíril svoju sieť satelitov na obežnej dráhe na 14.
- 17. novembra 2016 – Sieť satelitov na obežnej dráhe rozšírená na 18, teda takmer dve tretiny z plánovaného počtu 30.
- 15. decembra 2016 – Galileo začal poskytovať prvé služby.

Navigačný satelitný systém *Galileo* je zaujímavý a prítlačlivý aj pre deti. Satelity systému *Galileo* sú pomenované podľa mien detí, ktoré vyhrali a budú vyhrávať národné časti detskej maliarskej súťaže EK pod názvom: „*Galileo - navigácia očami detí*“. Napr. dvojica satelitov vypustených v roku 2011 sa nazýva Doresa a Milena po deťoch z Nemecka a z Estónska, ktoré vyhrali národnú časť detskej súťaže EK o najkrajšie obrázky systému *Galileo*. Od októbra 2012 je na obežnej dráhe satelit David, ktorý je pomenovaný po českom výhercovi a satelit Samuel pomenovaný po slovenskom výhercovi Samkovi, vtedy 12-ročnom chlapcovi z Prievdize.

Navigačný satelitný systém *Galileo* sa bude skladať z globálnej, regionálnej a niekoľkých lokálnych zložiek (Komisia európskych spoločenstiev, 2006; Sedlák a Lošonczi, 2011; Sedlák; 2012).

- *Globálna zložka* systému *Galileo* bude jadrom celého systému a bude tvorená satelitmi a nevyhnutným pozemným segmentom.
- *Regionálna zložka* systému *Galileo* by sa mala skladať z mnohých *externých regionálnych integrovaných systémov (ERIS)* (z angl. *External Region Integrity Systems*), vytvorených a prevádzkovaných súkromnými spoločnosťami, štátmi alebo skupinami štátov mimo územia EÚ. ERIS budú zaisťovať hlásenia o integrite systému nezávisle na hláseniach systému *Galileo*, aby napr. uspokojili požiadavky vzťahujúce sa ku garanciám systému daných štátov alebo inštitúcií zoskupených v ERIS.
- *Lokálne zložky* by mali slúžiť pre vylepšenie lokálneho príjmu signálu *Galileo*, ako napr. zaistenie navigačného signálu v oblastiach, kde signály zo satelitov nemôžu byť prijaté. Tieto lokálne zložky budú vytvorené a prevádzkované súkromnými spoločnosťami.

Globálna zložka systému *Galileo* sa skladá z:

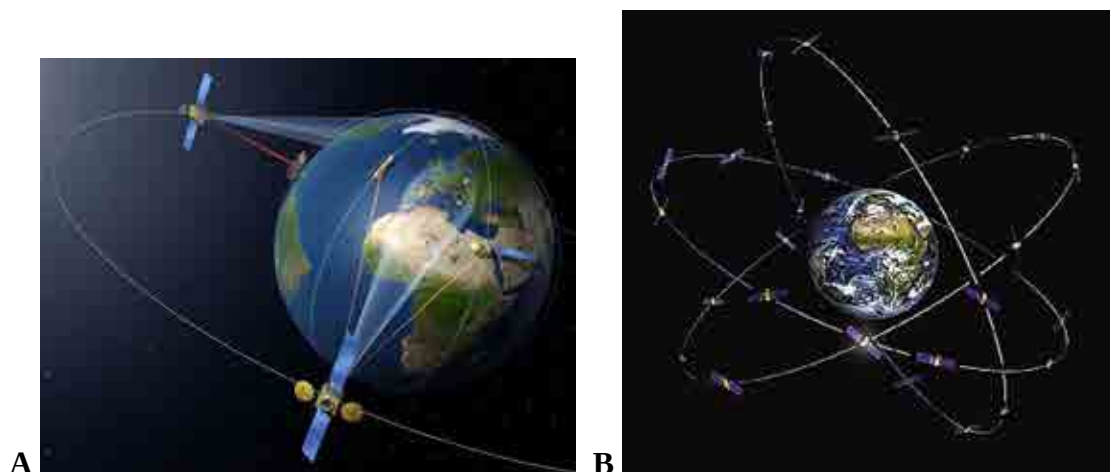
- *kozmickeho (vesmírneho) segmentu*,
- *pozemného segmentu*.

Kozmický segment

Kozmický segment systému *Galileo* bude tvorený 30 satelitmi v troch obežných dráhach so sklonom 56° k rovine rovníka (obr. 2.65). Každá rovina bude obsahovať 9 aktívnych satelitov, ktoré budú v obežnej rovine (dráhe) rovnomerne rozdelené po 40° a jeden neaktívny (náhradný, záložný) satelit, ktorý nahradí ktorýkoľvek aktívny satelit v tejto obežnej dráhe v prípade jeho zlyhania. Výška obežnej dráhy satelitov 23 222 km bude mať tú vlastnosť, že vždy po desiatich dňoch sa opakuje rovnaké rozmiestnenie satelitov okolo Zeme. V priebehu týchto desiatich dní každý satelit obehne sedemkrát Zem. Výška obežnej dráhy satelitov bola zvolená tak, aby sa čo najviac eliminovali vplyvy poruchového tiažového poľa Zeme. Verí sa, že po začiatkovej optimalizácii obežnej dráhy nebude po celú dobu životnosti satelitu treba žiadnych usmerňovacích manévrov. Zvolená výška obežnej dráhy taktiež zaisťuje vysokú „viditeľnosť“ satelitov (nerušený príjem signálov z množstva geometricky optimálneho rozloženia satelitov).

Tolerancia odklonenia jednotlivých satelitov od „ideálnych“ obežných dráh je podmienená potrebou udržať ich nemennú konšteláciu. Povolené odchýlky sú také, že každý satelit by sa

mal pohybovať vo vzdialenosti $\pm 2^\circ$ vzhľadom k susedným satelitom v rovnakej obežnej rovine a taktiež nie viac ako $\pm 2^\circ$ ďaleko od roviny dráhy. V prípade poruchy jedného zo satelitov môže byť problém vyriešený tak, že sa náhradný „čakajúci“ satelit premiestni na miesto pokazeného satelitu. Tento manéver môže byť uskutočnený v priebehu niekoľkých dní, čo je podstatne rýchlejšie, než vypustenie nového satelitu (rádovo niekoľko mesiacov). Satelity boli navrhnuté tak, aby boli kompatibilné s množstvom kozmických dopravných systémov a taktiež aby sa dali vypúšťať po dvoch a viacej kusoch.



Obr. 2.65: Kozmický segment Galileo; dva prieskumné satelity GIOVE-A a GIOVE-B (A); konštelácia 30 satelitov (obrazový kredit ESA) (B).

Pozemný segment

Jadrom *pozemného segmentu* budú dve riadiace centrá. Každé riadiace centrum sa bude starať o kontrolné a riadiace funkcie, podporované špecializovaným *pozemným kontrolným systémom* (GCS) (z angl. *Ground Control Segment*), ďalej o „letové“ funkcie, podporované špecializovaným tzv. *pozemným misijným segmentom* (GMS) (z angl. *Ground Mission Segment*). GCS sa bude zaoberať údržbou polohy satelitov, kým GMS bude mať na starosť kontrolu navigačnej funkcie celého navigačného systému Galileo. GCS bude využívať globálnu sieť piatich staníc (TT&C) (z angl. *Tracing, Telemetry and Command*, slov. *Sledovacie, telemetrické a príkazové stanice*) staníc ku komunikácii s každým satelitom a to podľa schémy kombinujúcej pravidelné a plánované kontakty spolu s dlhotrvajúcimi testami a náhodnými kontaktmi (obr. 2.66).

GMS bude využívať globálnu sieť tridsiatich *Snímacích staníc Galileo* (GSS) (z angl. *Galileo Sensor Stations*) pre kontinuálne monitorovanie navigačných signálov všetkých satelitov. Toto monitorovanie bude umožnené taktiež vďaka komunikačným sieťam, používajúcich komerčné satelity a káblové spoje, v ktorých bude každé vedenie pre istotu zdvojené. Hlavným prvkom GMS bude referenčný prijímač.

GMS bude so satelitmi komunikovať pomocou globálnej siete „prenosových staníc“ *MULS* (z angl. *Mission Up-Link Stations*, slov. voľný preklad: *Misijné stanice priameho spojenia*), inštalovaných na piatich miestach po celom svete (každá stanica bude mať k dispozícii

niekoľko trojmetrových antén). *MULS* bude vysielat' na frekvencii 5 GHz v systéme *RSESB* (z angl. *Radionavigation Satellite Earth-to-Space Band*, slov. voľný preklad: *Radionavigačný satelit v spojení Zem-vesmír*). *GMS* bude používať *GCS* sieť pre dve na sebe nezávislé úlohy. Prvou úlohou bude určovanie polohy satelitu a synchronizácia času *OD&TS* (z angl. *Orbitography Determination and Time Synchronisation*, slov. *Určovanie orbitografie a synchronizácia času*), čo bude znamenať každých desať minút zaisťovať dávkové spracovanie pozorovaní všetkých satelitov a počítať presné dráhové a hodinové korekcie pre každý satelit spolu s prognózou očakávaných variácií, tzv. *SISA* (z angl. *Signal-in-Space Accuracy*, slov. voľný preklad: *Presnosť signálu v priestore*), platných pre niekoľko hodín dopredu. Výsledky týchto výpočtov budú prenesené do konkrétného satelitu každých 100 min. pomocou signálu z *MULS*.



Obr. 2.66: Ukážka antény TT&C.

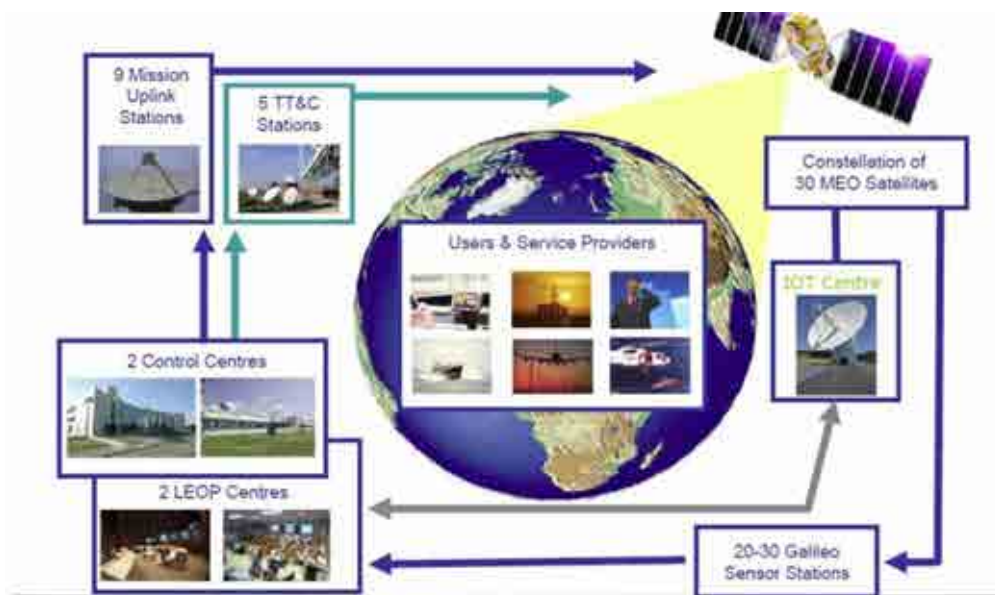
Druhé využitie *GCS* siete je pre prenášanie dát o stave integrity systému *IPF* (z angl. *Integrity Processing Function*, slov. *Funkcia spracovania integrity*). Táto služba bude zaisťovať okamžité observácie všetkých satelitov *GCS* stanicami pre overovanie integrity signálov satelitov. Výsledky týchto výpočtov (pre celkovú konšteláciu) budú vysielané do vybraných satelitov a nimi taktiež vysielané, takže užívateľ (platiaci si službu *SSS* - z angl. *Solar System Service*, slov. *Služba Slnecnej sústavy*) vždy dostane aspoň dve správy o integrite (*IM*) (z angl. *Integrity Messages*, slov. *Správy o integrite*).

IM sa budú skladať z dvoch častí. Prvá časť je tzv. *integrovaná vlajka* (*IF*) (z angl. *Integrity Flag*), ktorá iba varuje, že satelitný signál pravdepodobne presahuje nastavený maximálny prah presnosti. *IF* bude generovaná a viackrát vysielaná s krajnou naliehavosťou tak, že čas medzi výskytom zlého stavu ovplyvňujúceho presnosť vysielateľa (*TA*) (z angl. tzv. *Time-to-Alert*, slov. *Čas upozornenia*) a *IF* nebude viac než 6 sekúnd.

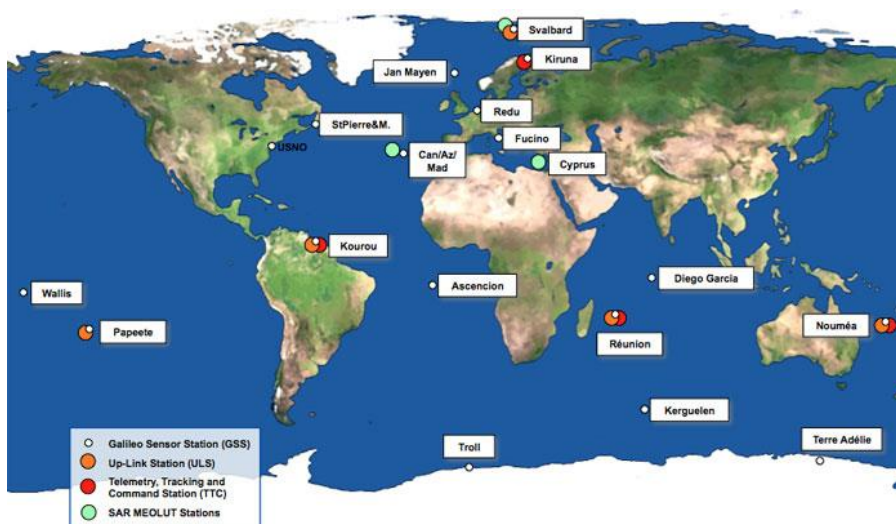
Druhou časťou *IM* budú tzv. *integrované tabuľky* (*IT*) (z angl. *Integrity Tables*), t.j. tabuľky o štatúte integrity jednotlivých satelitov, ktoré budú pravidelne vysielané, aby „noví“ užívatelia alebo užívatelia, ktorí boli dočasne mimo signálu (napr. prechádzali tunelom), vedeli o správnom štatúte všetkých satelitov.

OD&TS teda monitoruje dlhodobejšie zmeny orbitálnych parametrov satelitov (meniace sa vďaka gravitačným a iným vplyvom vo vesmíre), zatiaľ čo *IPF* monitoruje krátkodobé „defekty“ systému *Galileo* spôsobené náhlymi poruchami.

Z rozhodnutia EK v decembri 2009 sa Praha stala administratívnym sídlom európskej agentúry (GSA) (z angl. *Galileo Supervising Authority*, slov. *Dozorný orgán programu Galileo*) pre navigačný satelitný systém *Galileo*. Poslaním GSA bude zaisťovať prevádzku európskeho navigačného satelitného systému *Galileo*. Túto významnú prestíž v novom budovanom satelitnom navigačnom systéme *Galileo* Česká republika získala prednosť pred dvoma silnými kandidátmi, akými boli Malta a Slovinsko. Celková architektúra satelitného navigačného systému *Galileo* je znázornená na obr. 2.67 (angl.)⁹⁵ a architektúra pozemného segmentu systému *Galileo* je prezentovaná na obr. 2.68 (angl.)⁹⁶.



Obr. 2.67: Architektúra systému Galileo.



Obr. 2.68: Architektúra pozemného segmentu systému Galileo.

⁹⁵ LEOP: Launch and Early Orbit Phase centrum; IOT: In-Orbit Testing centrum.

⁹⁶ SAR Meolut Stations: Galileo Search & Rescue, Medium-Earth Orbit Local User Terminal stations; ULS: Up-Link Stations.

2.4.3 Aplikácia Galilea a obchodné možnosti

Rozvoj všetkej satelitnej navigácie sa týka predovšetkým sektorov moderného hospodárstva. Trh výrobkov a služieb rastie každoročne o 25 %. V roku 2002 bolo v prevádzke približne 3 miliardy satelitných prijímačov. Satelitná navigácia sa stáva v čoraz vyššej miere súčasťou každoročného života európskych občanov nielen v ich automobiloch a mobilných telefónoch, ale tiež v distribučných energetických sieťach alebo bankových systémoch (Sedlák, 2012).

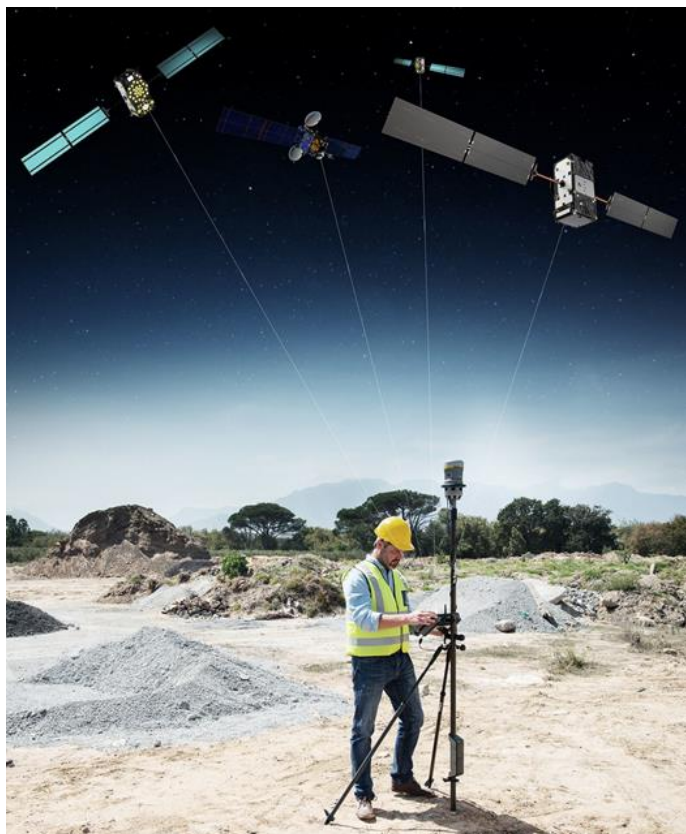
Navigačný satelitný systém *Galileo* by mal poskytovať:

- Vyššiu presnosť (v porovnaní s existujúcimi navigačnými systémami) dostupnú všetkým používateľom.
- Väčšie pokrytie signálom satelitov obiehajúcich na vyšších obežných dráhach. Z tejto výhody bude ťažiť napr. Škandinávia ako najsevernejšia európska oblasť, ktorá má problém s príjmom signálov od satelitov *GPS*.

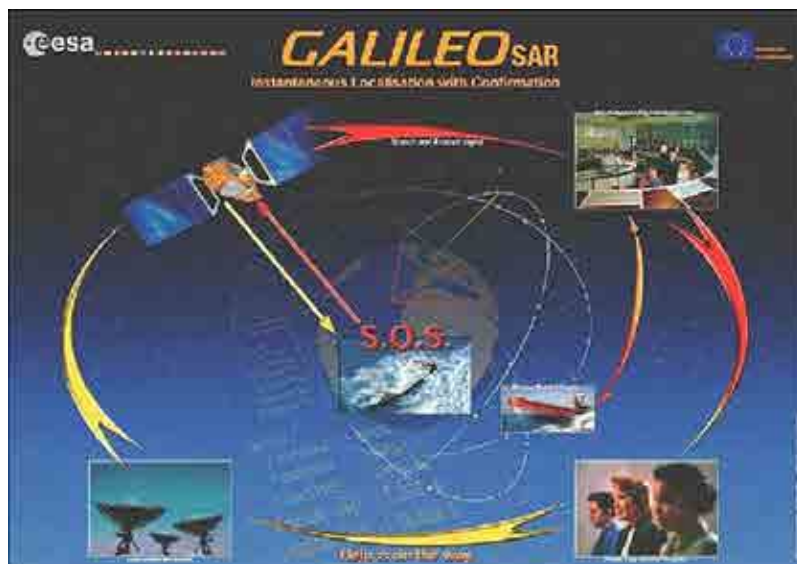
Galileo by sa mal stať spoľahlivým, verejnosti celosvetovo dostupným satelitným navigačným systémom, využiteľným súčasne európskymi štátmi aj pre prípadné vojenské účely.

Galileo prinesie tri druhy kvality služieb (Komisia európskych spoločenstiev, 2006; Sedlák et al., 2009; Sedlák a Lošonczi, 2011; Sedlák, 2012):

- *Open Service (OS)*, t.j. *otvorená služba*, bude pre každého zdarma. Jeho signály budú využívať dve pásma: 1164 až 1214 MHz a 1563 až 1591 MHz. Prijímače budú mať horizontálnu presnosť lepšiu ako 4 m a vertikálnu lepšiu ako 8 m (alebo horizontálne pod 15 m a vertikálne pod 35 m pri použití jedného pásma). Pretože bolo dosiahnutej dohody o kompatibilite s americkým systémom, budúce prijímače navyše budú zároveň využívať aj *GPS*.
- Šifrovaný *Commercial Service (CS)*, t.j. *obchodná služba*, bude spoplatnený a poskytne presnosť lepšiu ako 1 m. V kombinácii s pozemnými stanicami môže dosiahnuť presnosť až 10 cm a menej, t.j. až subcentimetrová, resp. milimetrová presnosť, čo umožní určiť 3D polohu s vysokou presnosťou a čo ocenia najmä geodeti, geografi, stavební inžinieri a iní (obr. 2.69). Táto služba bude využívať až tri pásma - dve použité *OS* a navyše 1260 až 1300 MHz
- Šifrované *Public Regulated Service (PRS)*, t.j. *verejne regulovaná služba* a *Safety of Life Service (SoLS)*, t.j. *služba na záchranu života*, poskytnú presnosť podobnú *OS* (obr. 2.70, angl.). Budú však odolnejšie proti rušeniu a budú schopné detekovať problémy do 10 sek. Využívať ich budú ozbrojené zložky a dopravcovia, pre ktorých by strata presnosti mohla ohroziť ľudské životy (napr. riadenie letovej prevádzky).



Obr. 2.69: Pre geodetov bude Galileo neoceniteľným pomocníkom.



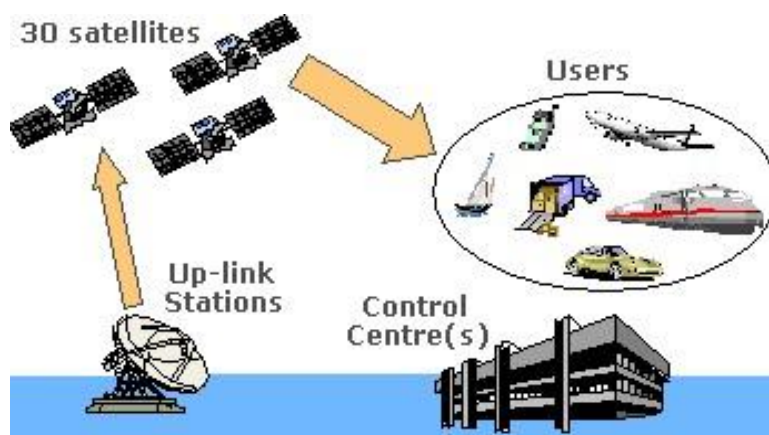
Obr. 2.70: Galileo a SoLS.

Okrem uvedených navigačných služieb budú satelity systému *Galileo* poskytovať aj služby núdzovej lokalizácie v rámci celosvetovej satelitnej záchranej služby *KOSPAS-SARSAT*⁹⁷.

⁹⁷ *KOSPAS-SARSAT* (*Kosmického spasenie-Search and Rescue Satellite Aided Tracking*) je medzinárodný satelitný záchranný systém, ktorý začal činnosť 29. júna 1982 vypustením satelitu *KOSPAS 1* - *Kozmos 1383* s hmotnosťou asi 700 kg na dráhu s perigeom 991 km,

Oproti nej satelity oznámia stroskotancovi, že jeho signály boli zachytené a lokalizované. Nájst' dolámaného turistu či zatúlané dieťa nebude pre policajtov alebo záchranárov žiadny problém. Všetci budeme akosi jednoduchšie „nájdiťelní“. To znamená, že prijímače *Galileo* sa budú montovať do mobilných telefónov, áut, *PDA*⁹⁸, supermoderných hodín, jednoducho do všetkého čo má zdroj energie a môžete to nosiť zo sebou. Takto vybavení potom dokážeme s presnosťou 1 m lokalizovať napr. najbližšiu dobrú reštauráciu, bankomat a pod.

Ako je z vyššie uvedeného zrejmé, aplikácie systému *Galileo* sa týkajú širokého rozsahu sektorov nielen v oblasti prepravy (obr. 2.71, angl.) a komunikácie, ale tiež v iných sektoroch, ako napr. geodézia, pôdohospodárstvo, vedecký výskum, turistika a iné. Prijímače systému *Galileo* sa nachádzajú dnes takmer vo všetkých druhoch elektronických zariadení určených na každodenné používanie, akými sú napr. mobilné telefóny, osobní digitálni asistenti, fotoaparáty, prenosné počítače alebo náramkové hodinky. Oblasť mobilných telefónov predstavujú nádejný trh s viac ako 2 miliardami používateľov mobilných telefónov. Podľa štatistiky v roku 2002 sa predalo približne 50 miliónov vozidiel, ktoré sú vo väčšej miere vybavené navigačnými zariadeniami (vrátane systému *Galileo*).



Obr. 2.71: Galileo pre spektrum dopravy.

Riadenie dopravy je v súčasnosti na pokraji revolúcie, keď už niekoľko stoviek tisícov kontajnerov je už vybavených zariadením na monitorovanie a sledovanie pomocou GNSS. Vďaka týmto zariadeniam môžu logistické spoločnosti ponúkať svojim zákazníkom rýchlejšie a lepšie služby. Pre navigáciu po mori a vodných tokoch je satelitná technológia prirodzeným výberom. Toto rovnako potvrdzuje objem predaja námorných prijímačov (viac ako 1 miliarda

apogeom 1 029 km, sklonom 82,9° a obežnou dobou 105,4 minút. KOSPAS 2 - Kosmos 1447 štartoval 24. marca 1983 (961-1 015 km, 83°, 104,9 min), SARSAT 1 - NOAA 8 štartoval 28. marca 1983 (808-830 km, 98,8°, 101,3 min). Satelity zachytávajú signál SOS (SOS je medzinárodné volanie o pomoc na mori v medzinárodnej Morseovej abecede), určujú polohu havarovanej lode alebo lietadla a odovzdávajú signál riadiacemu stredisku a pozemným stanicám. Do februára 1984 sa satelitom systému KOSPAS-SARSAT podarilo lokalizovať 69 havárií lodí, resp. lietadiel a zachrániť 138 osôb. Dobudovaný systém KOSPAS-SARSAT obsahuje štyri aktívne satelity, zapojenie niekoľkých stacionárnych satelitov a deviatich pozemných staníc, z toho tri v RF (Moskva, Vladivostok, Archangelsk), tri v USA, po jednej vo Francúzsku, v Kanade a v Nórsku.

⁹⁸ PDA: z angl. *Personal Digital Assistant*, na Slovensku často nazývaný *osobný digitálny asistent*, zjednodušene *vreckový počítač*, je to prístroj, ktorý zväčša nemá klávesnicu a ovláda sa pomocou dotykového displeja a pera nazývaného stylus. Operačné systémy v PDA podporujú formáty ako bežné PC napr. MS Word a MS Excel documenty.

Eur) a prijímanie príslušných predpisov. To isté platí aj pre leteckú navigáciu, ktorá vyžaduje spoľahlivý prostriedok na zvýšenie systémovej kapacity prepravy miliónov občanov.

Zhrnutie aplikácií systému Galileo:

Galileo bude poskytovať päť služieb, ktoré bude možné použiť v rôznych sektoroch:

- Služba s otvoreným prístupom, ktorá bude určená najmä pre masový trh.
- Obchodná služba pre profesionálnych užívateľov, ktorý vyžadujú vysoký výkon a záruky.
- Bezpečnostná služba, ktorá bude určená na použitie v situáciách ohrozenia ľudského života, a preto si bude vyžadovať neporušiteľnosť informácií.
- Vyhľadávacia a záchranná služba, určená na lokalizáciu núdzových udalostí a začatie záchranných operácií.
- Tzv. „verejná regulovaná služba“ pre bezpečnostné aplikácie priamo s vládami a komunitárnymi subjektmi.

Praktické využitie systému Galileo v doprave

▪ **Galileo a cestná doprava:** Aplikácie systému Galileo v cestnom sektore zahŕňajú široký rozsah funkcií, od telematických služieb a navigačných zariadení až po elektronický výber poplatkov (*EFC*) (z angl. *Electronic Facture Cauting*, slov. *elektronická analýza faktov*) na diaľnici alebo mestského mýtného, ako aj bezpečnostné aplikácie a úhradu poistného podľa vzdialenosti. Prakticky všetkých 240 miliónov vozidiel, ktoré jazdia v EÚ by mohlo využívať najmodernejšie navigačné systémy a očakáva sa, že mnohé obmedzenia iniciatív tzv. „inteligentného prepravného systému“ bude možné prekonať vďaka systému Galileo.

V posledných rokoch sa rýchlo vyvíjajú cestné mýtné systémy. Niektoré krajiny už zaviedli systémy účtujúce na základe kilometrovej sadzby pomocou GNSS najmä pre vozidlá ťažkej nákladnej dopravy na medzinárodných diaľniciach. V smernici 2004/52 sa vyžaduje, aby všetky nové *EFC* systémy používali jednu alebo viaceré z týchto technológií: satelitnú navigáciu, mobilný telefón, určenú komunikáciu s krátkym dosahom, alebo akúkoľvek kombináciu týchto systémov (Smernica 2004/52/ES, 2004). Odporúča sa satelitná navigácia, pretože je flexibilná a najvhodnejšia pre európsku politiku spoplatňovania, taktiež si nevyžaduje žiadnu infraštruktúru a je možné ju prirodzene ľahko rozširovať⁹⁹.

Iniciatíva „eSafety“, ktorá obsahuje veľký počet aplikácií, ktoré môžu využívať presné určovanie polohy vozidla, pripúšťa vytvorenie celoeurópskeho štandardu pre núdzové hovory z vozidla^{100,101} ako prioritu pre zníženie času núdzového zásahu o 40 % až 50 %, vďaka čomu by sa mohlo potenciálne zachrániť 2 500 životov. Poskytovanie smerových údajov a umožnenie identifikácie strany diaľnice, na ktorej sa nehoda stala, predstavujúce najdôležitejšie informácie pre ambulancie a záchranné tímy, sú jasným prínosom dodatočného využitia systému Galileo.

⁹⁹ Akčný plán pre energetickú účinnosť: Využitie potenciálu Komisie europských spoločenstiev (KOM) (2006)05045.

¹⁰⁰ Odporúčanie KOM, 2003/558/ES.

¹⁰¹ Oznámenie KOM (2005) 431.

▪ **Galileo a železničná doprava:** Železničné infraštruktúry vždy používali signalizačné systémy a systémy na určovanie polohy vlakov, ktoré sú nainštalované najmä na koľajniciach. S cieľom zlepšiť interoperabilitu a znížiť náklady sa tieto systémy nahrádzajú novými štandardami: *Európsky systém riadenia železničnej dopravy* a *Európsky železničný kontrolný systém*. Bola dokázaná realizovateľnosť železničných kontrolných systémov spĺňajúcich železničné bezpečnostné štandardy pomocou GNSS. Satelitná navigácia bola už zavedená v rôznych aplikáciách týkajúcich sa bezpečnosti v železničnej doprave, ako napr. pomocný systém kontroly dopravy, riadenie železničných zdrojov alebo zákaznícka podpora alebo tiež pre tzv. „pozitívnu vlakovú kontrolu“, ako to dokazuje príklad v USA. Pomocou systému *Galileo* je možné dosiahnuť zvýšenie bezpečnosti pre automatické vlakové ochranné a kontrolné systémy.

▪ **Galileo a vodná doprava:** Vodné cesty na otvorenom mori alebo vo vnútrozemí sa na celom svete najčastejšie používajú na prepravu tovarov. Účinnosť, bezpečnosť a optimalizácia námornej dopravy sú kľúčovými otázkami, ku ktorým môže prispieť GNSS. *Medzinárodná námorná organizácia (IMO)* (z angl. *International Marine Organization*) stanovuje požiadavky pre zariadenia určujúce polohu pre celosvetové rádiové navigačné systémy pokiaľ ide o presnosť, celistvosť, súvislosť, dostupnosť a pokrytie pre rôzne fázy navigácie. Pre oceánsku a pobrežnú navigáciu *IMO* stanovuje navigačné požiadavky a štandardy pre palubné vybavenie. Systém *Galileo* môže poskytnúť využitie pri aplikáciách zameraných na ochranu ľudského života počas námornej alebo inej vodnej plavby. *IMO* zdôrazňuje používanie GNSS na približovanie lodí k prístavom, pre prístavy a pre obmedzené vody. GNSS sa tiež považuje za kľúčový nástroj tzv. „Globálneho námorného núdzového a bezpečnostného systému“, ktorý stanovila *IMO* ako integrovaný komunikačný systém používajúci satelitnú a pozemnú rádiovú komunikáciu, ktorého cieľom je zabezpečiť rozosielenie pomoci na akékoľvek miesto, kde by mohla akákoľvek loď čeliť núdzovej situácii. V blízkej budúcnosti bude námorná bezpečnosť posilnená pomocou „*Identifikačného a monitorovacieho systému s ďalekým dosahom*“, ktorý bol prijatý v roku 2006. Ten umožní pomocou identifikácie lodí, ich polohy, dátumu a času polohy prenášanej v pravidelných intervaloch alebo na požiadanie monitorovanie lodí mimo pokrytia pobrežných rádiových komunikačných staníc.

▪ **Galileo a letecká doprava:** V leteckej oblasti predstavujú služby GNSS už dlhý čas doplnkový spôsob navigácie. Poskytujú tiež dodatočné služby pre mnohé letové fázy, počas tzv. „oddychového“ lietania, ako aj v obchodnej leteckej doprave. Analytici predpokladajú silný rast špecifického vybavenia lietadiel, umožňujúce využívanie satelitného navigačného systému GNSS až do roku 2025 s potrebou viac ako 17 300 nových a nákladných lietadiel vďaka trojnásobnému rastu osobnej dopravy a ešte vyššiemu rastu nákladnej leteckej prepravy. Presnosť a celistvosť služieb, ktoré poskytuje systém *Galileo*, umožní väčšie využitie existujúcich letísk, ktoré sa v súčasnosti nevyužívajú počas nepriaznivého počasia a zlých podmienkach viditeľnosti. V Európe na princípoch GNSS bude tiež spočívať spoločný záväzok *SESAR*¹⁰², ktorým sa zavádza právny rámec na poskytovanie leteckých navigačných služieb definovaných v štyroch „*Jednotných európskych leteckých nariadeniach*“.

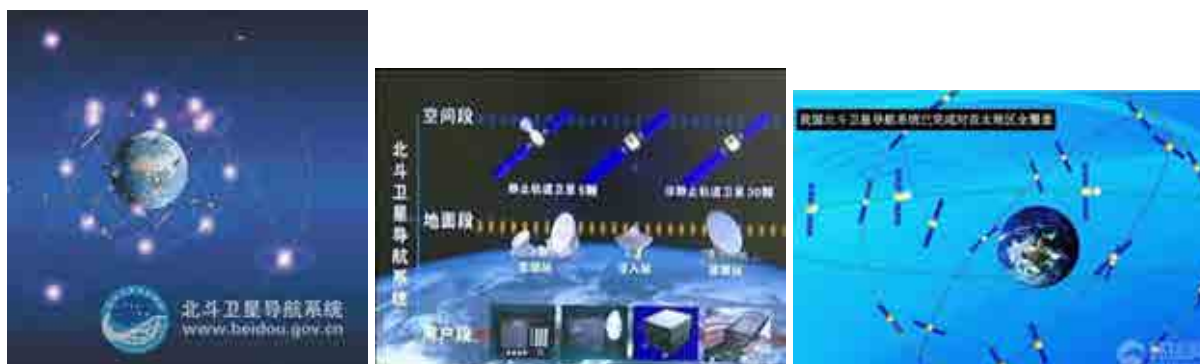
Systém *Galileo* má významný medzinárodný rozmer. Na základe záujmu, ktorý prejavili ostatné národy sveta, boli vypracované dohody o spolupráci s cieľom podporiť a rozvinúť

¹⁰² Výskum v oblasti riadenia letovej prevádzky v rámci tzv. *jednotného európskeho neba (SESAR)* (z angl. *Single European Sky ATM Research*) je spoločný projekt na úplné prepracovanie európskeho vzdušného priestoru a jeho riadenia letovej prevádzky (ATM). Aktuálny program spravuje spoločný podnik *SESAR* ako verejno-súkromné partnerstvo (PPP).

používanie systému *Galileo* na celom svete. Taktiež je zabezpečená kompatibilita s americkým systémom *GPS*, čím sa umožní kombinované používanie oboch systémov. V súčasnosti prebieha príprava „Európskeho rádionavigačného plánu“, ktorého cieľom je koordinovať rôzne navigačné infraštruktúry v Európe.

2.5 COMPASS

Navigačný satelitný systém *BeiDou* (*BeiDou-1*) [(zjednodušená čínština: 北斗导航系统; fonetický prepis z mandarínčiny (pinyin): *běidǒu dǎoháng xìtǒng*) alebo tiež *navigačný satelitný a polohový systém BeiDou*¹⁰³ (angl. *Beidou Satellite Navigation and Positioning System*, fonetický prepis z mandarínčiny (pinyin): *beidou wèixīng daoháng dìngwèi xìtǒng*)] je projekt Čínskej ľudovej republiky (ďalej len Čína) na budovanie autonómneho regionálneho satelitného polohového systému (obr. 2.72, čin.). Nástupcom projektu *BeiDou-1* sa v rámci GNSS má stať čínsky navigačný satelitný systém nazvaný *Compass*, niekedy označovaný ako *BeiDou-2*, pokračovateľ systému *BeiDou-1*.



Obr. 2.72: BeiDou.

2.5.1 Z histórie systému Compass

V roku 1997 sa Čína rozhoduje o vybudovaní svojho vlastného globálneho navigačného satelitného systému s názvom *BeiDou-1*. Jeho budovanie je rozdelené na dvoch etáp. V prvej etape mala byť do roku 2012 dobudovaná prvá generácia lokálneho satelitného navigačného systému *Compass*, označovaný tiež ako *BeiDou-2*. Dokončenie systému *Compass* ako súčasť

¹⁰³ Navigačný systém *BeiDou 1* je pomenovaný po súhvezdí, ktorého meno v čínštine znie *BeiDou*. *BeiDou* doslova znamená "Severná Dou" (dou = nádoba) a je tak pomenovaný podľa svojho tvaru. Dou je totiž druh tradičnej čínskej nádoby používanej na meranie množstva zrna. *BeiDou* je ekvivalentom súhvezdia v slovenskej astronómii známeho ako *Veľký voz* alebo *Veľká medvedica* (*Ursa Major*). V minulosti bola táto konštelácia využívaná v navigácii pre vyhľadanie "Severnej hviezdy" *Polárky* (*Polaris*, nesprávne nazývanej Severka). Názov *BeiDou* pre satelitný navigačný systém je preto v tomto prípade viac než výstižný.

GNSS je plánované na koniec druhej dekády 21. stor. Nástupcom projektu *BeiDou-1* sa v rámci GNSS stal GNSS *Compass* (*BeiDou-2*), ktorý začal svoje prvé služby na území Číny poskytovať v decembri 2011. Zmena v názve satelitného navigačného systému *BeiDou-2* na anglický názov *Compass* vyšla z rozhodnutia číny pretransformovať regionálny navigačný systém (*BeiDou-1/BeiDou-2*) na systém globálny.

30. októbra 2000 bol na obežnú dráhu vynesенý satelit pod označením *BeiDou-1A*. Satelit *BeiDou-1B* nasledoval 20. decembra 2000 a následne satelit *BeiDou-2A* prišiel na rad 24. mája 2003 (obr. 2.73).



Obr. 2.73: Geostacionárny satelit BeiDou-2A.

V septembri 2003 sa Čína stala spolupracujúcim štátom na projekte *Galileo*. Čína prisľúbila do tohto projektu v priebehu nadchádzajúcich rokov investovať niečo cez 200 miliónov Eur. Umiestenie týchto investícií je (a aj bolo) však pomerne sporné. Čína 2. novembra 2006 oznámila, že od roku 2008 bude *BeiDou-1* zdarma poskytovať určenie polohy s presnosťou 10 m v rámci "základnej služby" (*Open service*). Toto oznámenie vyjadrilo nielen čínske budúce plány s *BeiDou-2* (*Compass*), ale taktiež môže byť určitým znamením pre ostatných investorov projektu *Galileo*.

2.5.2 Štruktúra, princíp činnosti, zásady a osobitosti systému Compass

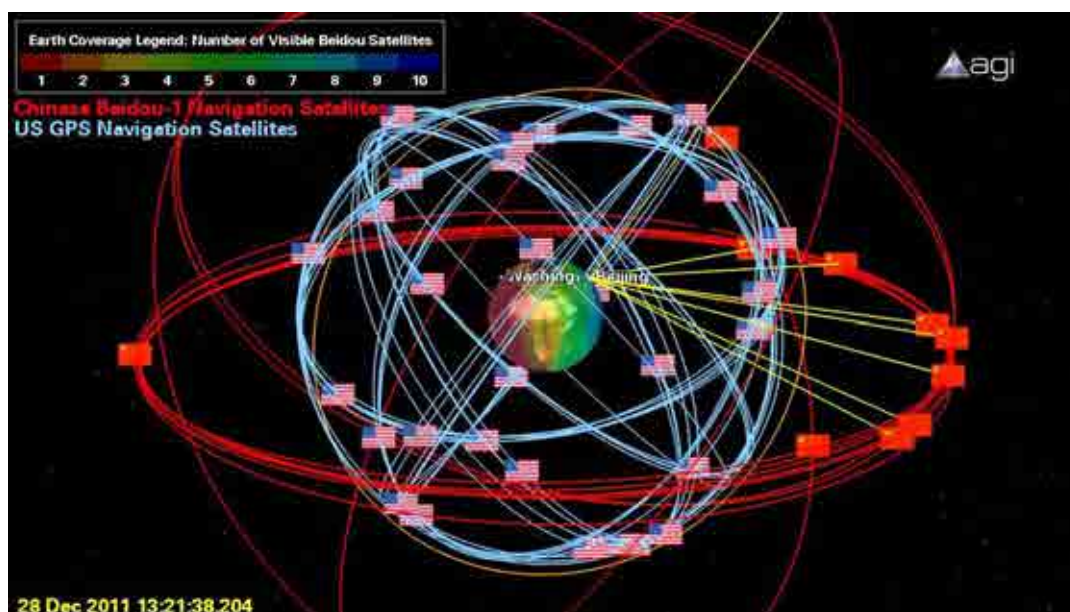
Na rozdiel od systémov *GPS*, *GLONASS* a *Galileo*, ktoré využívajú satelity pohybujúce sa vzhľadom k zemskému povrchu na strednej obežnej dráhe (*MEO*, kap. 2.1.5), *BeiDou-1* používa geostacionárne satelity. To znamená, že systém *BeiDou-1* nepotrebuje toľko satelitov, koľko ich potrebuje napr. *GPS*, ale taktiež to znamená, že signálom je pokrytá iba oblasť, nad ktorou je satelit nastalo umiestnený. *BeiDou-1* je teda v súčasnej dobe funkčný v oblasti vymedzenej súradnicami: 70° až 140° východnej dĺžky a 5° až 55° severnej šírky. Podrobné dáta *BeiDou-1* sú uvedené v tab. 2.11 (angl.). Porovnanie architektúry kozických segmentov amerického navigačného satelitného systému *GPS* a projektovaného čínskeho *Compass* podáva obr. 2.74 (angl.).

Tab. 2.11: Charakteristiky signálov satelitov BeiDou-1.

Signal Characteristics

◆ CP II: B1, B2, and B3 as below

Component	Carrier Frequency (MHz)	Chip Rate (cps)	Bandwidth (MHz)	Modulation Type	Service Type
B1(I)	1561.098	2.046	4.092	QPSK	Open
B1(Q)		2.046			Authorized
B2(I)	1207.14	2.046	24	QPSK	Open
B2(Q)		10.23			Authorized
B3	1268.52	10.23	24	QPSK	Authorized

**Obr. 2.74:** Architektúra GPS a Compass.

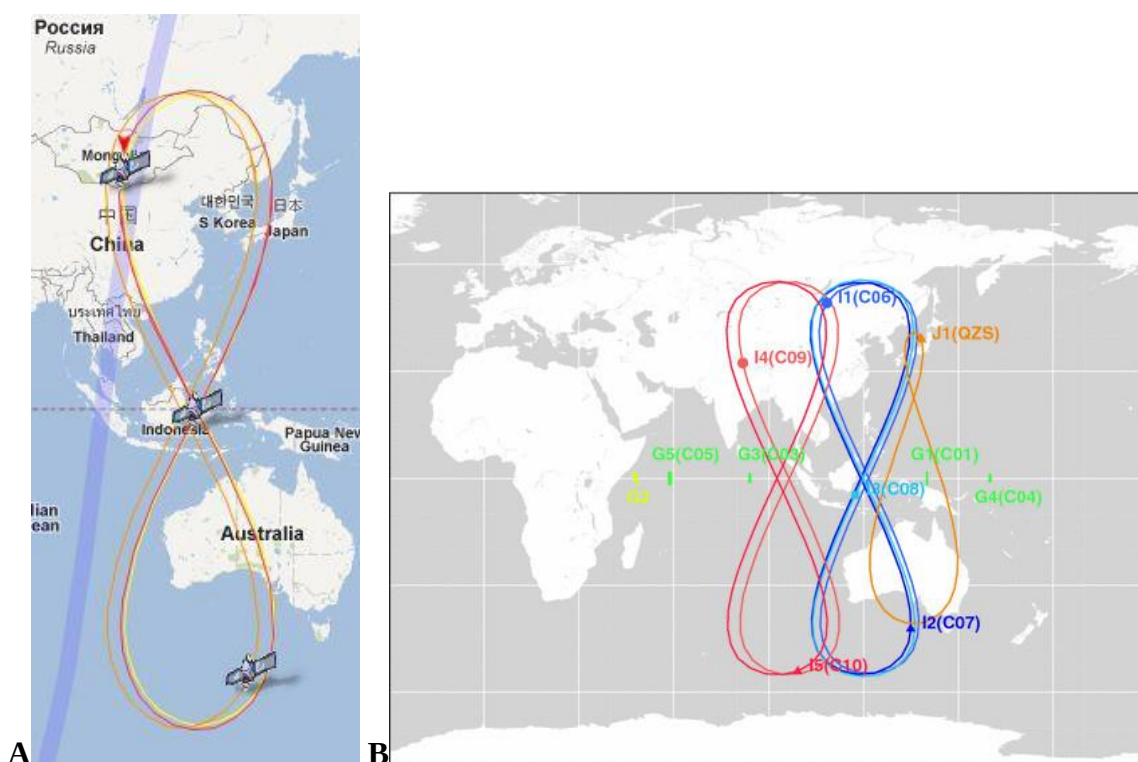
Súčasná technológia BeiDou-1

Pokiaľ chce užívateľ vedieť svoju pozíciu (3D polohu) na základe *BeiDou-1* (podobný princíp je aj u *BeiDou-2* a *Compass*), procedúra je zjednodušená nasledovná (Montenbruck et al., 2013; Sedláček, 2012):

1. Zariadenie užívateľa vyšle signál smerom k satelitom.

2. Satelity prijímu signál.
3. Satelity vyšlú informáciu pozemnej stanici. Informácia má
4. Podobu presného času, kedy satelity prijali signál od užívateľa.
5. Pozemná stanica vypočíta zemepisnú šírku a dĺžku užívateľa.
6. Nadmorská výška je vypočítaná z digitálneho modelu terénu.
6. Pozemná stanica vyšle 3D pozíciu satelitu.
7. Satelit pošle informáciu o pozícii užívateľovi.

Užívateľské zariadenie môže posilať i prijímať krátke správy od pozemnej stanice. Trajektórie geostacionárnych satelitov systému *BeiDou-1* v určitom časovom okamihu a taktiež trajektórie satelitov *BeiDou-2/Compass* a *QZSS*¹⁰⁴ dňa 1. marca 2012 o polnoci sú znázornené na obr. 2.75, rus., angl.



Obr. 2.75: Trajektórie navigačných satelitov BeiDou-1 (A) a BeiDou-2/Compass a QZSS (B).

2.5.3 Perspektívy systému Compass

Satelity *BeiDou-1A* a *BeiDou-1B* boli navrhnuté ako experimentálne satelity. Čína plánuje postaviť zostávajúce satelity tak, aby sa *BeiDou-2/Compass* stal globálnym navigačným systémom. Nový systém *BeiDou-2*, resp. *Compass* bude tvorený 35 satelitmi vrátane 5

¹⁰⁴ QZSS: Quasi-Zenith Satellite System, japonský SBAS (kap. 3.1).

geostacionárnych, ktoré budú svojím signálom pokrývať celú zemeguľu. Zaistované budú dva druhy služieb: *bezplatná služba* pre bežných užívateľov a *koncesovaná služba* pre vojenské účely. Plán priprav na spustenie uvedených služieb je do roku 2020.

- *Bezplatná služba* bude určovať polohu s presnosťou približne 10 m, satelitné hodiny budú synchronizované s presnosťou 50 nsek., rýchlosť bude meraná s presnosťou $0,2 \text{ m.sek}^{-1}$.
- *Koncesovaná služba* bude presnejšia než bezplatná služba, bude môcť byť využitá taktiež pre komunikáciu a bude užívateľom poskytovať informáciu o stavu (statutu) systému.

Satelity *BeiDou-2A* sú v súčasnej dobe záložnými k satelitom *BeiDou-1A* alebo *BeiDou-1B*, ale v budúcnosti budú geostacionárnym kozmickým segmentom systému *BeiDou-2/Compass*. Ďalšie dva satelity systému *BeiDou-2* boli vypustené v prvej polovici roka 2007 z kosmodrómu Xichang. Čína v nasledujúcich rokoch plánuje pokračovať v experimentálnych a prípravných prácach na systéme *BeiDou-2/Compass*. Plne funkčný navigačný satelitný systém *Compass* by mal byť v roku 2020.

Otázky a úlohy z kap. 2

K overeniu získaných vedomostí z obsahu kap. 2 zodpovedajte na nasledujúce otázky a riešte úlohy. Správne odpovede a riešenia nájdete na konci skrípt.

Otázky a úlohy:

1. GNSS sa začali budovaním GPS a GLONASS začiatkom:
 - a) 50-tych rokov minulého storočia
 - b) 60-tych rokov 20. storočia
 - c) 70-tych rokov minulého storočia
 - d) 80-tych rokov minulého storočia
2. Z koľkých segmentov sa skladá GPS (segmenty vymenujte)?
3. V súčasnosti v GPS pracuje:
 - a) 21 satelitov (18 aktívne + 3 záložné) na 4 orbitách
 - b) 28 satelitov (24 aktívne + 4 záložné) na 6 orbitách
 - c) 24 satelitov (21 aktívne + 3 záložné) na 6 orbitách
4. Hlavná riadiaca stanica GPS (MCS - Master Control Station) je umiestnená v opevnenom bunkri v Skalistých horách na Schrieverovej vojenskej leteckej základni (bývalej Falcon vojenskej leteckej základni) v:
 - a) Cape Canaveral (Florida, USA)
 - b) Colorado Springs (Colorado, USA)
 - c) Havaj (v Tichom oceáne, USA)
5. Efemeridy sú:
 - a) dáta o polohe satelitov, t.j. efemeridy satelitov sú ich predpovedané dráhy (parametre obežných dráh), ktoré umožňujú modelovať polohu prijímača GPS prakticky v akomkoľvek požadovanom čase
 - b) dáta o polohe satelitov, t.j. efemeridy satelitov sú ich predpovedané dráhy (parametre obežných dráh), ktoré umožňujú modelovať polohu satelitu prakticky v akomkoľvek požadovanom čase
 - c) dáta o polohe satelitov, t.j. efemeridy satelitov sú ich vypočítané výšky (výšky obežných dráh), ktoré umožňujú modelovať polohu satelitu prakticky v akomkoľvek požadovanom čase
6. Prijímače GPS vykonávajú na základe prijatých signálov zo satelitov predbežné výpočty polohy, rýchlosti a času. Pre výpočet všetkých súradníc (x, y, z, t) je potrebné prijímať signál aspoň z(o):
 - a) štyroch satelitov
 - b) troch satelitov
 - c) piatich satelitov
7. Prijímače GPS pre fázové meranie môžu byť:
 - a) len jednofrekvenčné – pracujú iba s frekvenciou L1 alebo L2
 - b) jednofrekvenčné aj dvojfrekvenčné – pracujú s frekvenciou L1 a L2

8. Systémový čas GPS – TGPS (Time GPS) pozostáva z:
- poradového čísla GPS týždňa a počtu hodín v rámci GPS týždňa
 - poradového čísla GPS týždňa a počtu sekúnd v rámci GPS týždňa
 - poradového čísla GPS týždňa a počtu minút v rámci GPS týždňa
9. Pojem pseudovzdialenosť sa používa z toho dôvodu, že určovaná vzdialenosť satelit-prijímač GPS je zaťažená istými chybami:
- hodín na satelite a UTC v Greenwichi
 - hodín na satelite a v prijímači GPS
 - hodín v prijímači GPS
 - hodín na satelite
10. Meranie pseudovzdialeností pomocou pseudonáhodných kódov PRN je založené na:
- meraní rozdielu medzi časom odoslania a prijatia správy (zo satelitu do prijímača GPS)
 - meraní rozdielu medzi fázou odoslanej a prijatej vlny (zo satelitu do prijímača GPS)
 - meraní rozdielu medzi časom odoslanej a fázou prijatej správy (zo satelitu do prijímača GPS)
11. Relatívne určenie polohy z GPS meraní je:
- menej presné než absolútne určenie polohy
 - rovnako presné ako absolútne určenie polohy
 - oveľa presnejšie než absolútne určenie polohy
12. Diferenciálne korekcie v DGPS sa zavádzajú spôsobmi:
- korekcie sa zbierajú a ukladajú v referenčnom prijímači a aplikujú sa až po nameraní údajov v teréne do následného spracovania (post-processing)
 - korekcie sa monitorujú zvyčajne metódou absolútneho GPS merania, ktoré predchádza DGPS
 - korekcie sa zbierajú a ukladajú z inicializačných GPS meraní, ktoré musia predchádzať merania metódou DGPS
 - korekcie sa monitorujú zvyčajne cez telekomunikácie z SKPOS, a tak sa zavádzajú v reálnom čase
13. RTK metóda GPS je:
- v podstate pseudokinematická metóda určovania polohy v reálnom čase, prijímač GPS na určovanom bode musí byť nejakým komunikačným kanálom priamo napojený na referenčnú stanicu a na rozdiel od pseudokinematickej metódy nemusí byť zabezpečený neprerušovaný kontakt počas transportu (presunu prijímača GPS medzi určovanými bodmi)
 - v podstate rýchla statická metóda určovania polohy v reálnom čase, prijímač GPS na určovanom bode musí byť nejakým komunikačným kanálom priamo napojený na referenčnú stanicu a musí byť zabezpečený neprerušovaný kontakt počas transportu (presunu prijímača GPS medzi určovanými bodmi).
 - v podstate kinematická metóda určovania polohy v reálnom čase, prijímač GPS na určovanom bode musí byť nejakým komunikačným kanálom priamo napojený na referenčnú stanicu (resp. využívame služby SKPOS) a musí byť zabezpečený neprerušovaný kontakt počas transportu (presunu prijímača GPS medzi určovanými bodmi)
14. Selektívnou dostupnosťou (Selective Availability - SA) sa rozumie:
- zámerné zavedenie chýb do prijímačov GPS výrobcov, chyba z SA na základe využívania korekcií z permanentných GNSS staníc (napr. SKPOS); chyba z SA odstránená

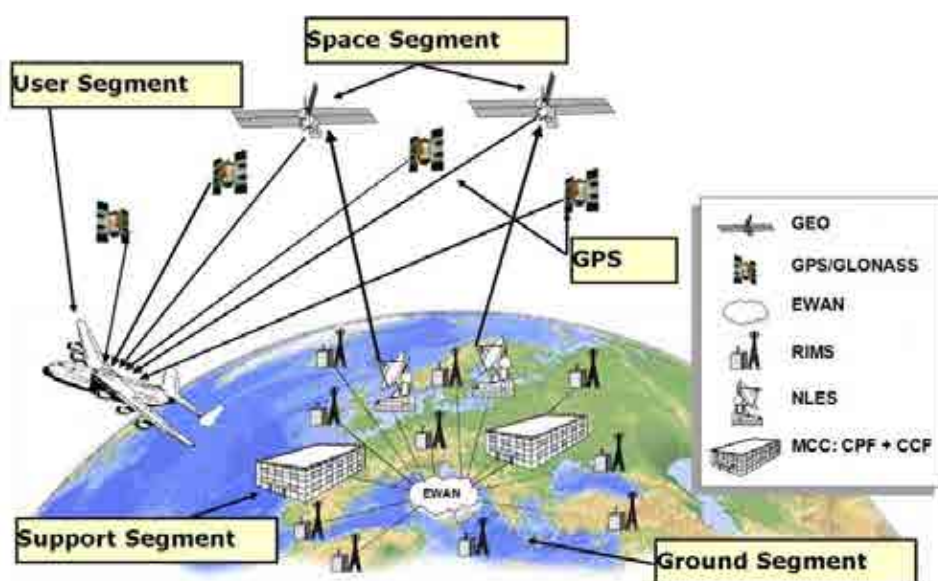
definitívne od roku 2000 b) zámerné zavedenie chýb do signálov vysielaných satelitmi správcom GPS; chyba z SA na základe politických rozhodnutí prezidenta USA odstránená definitívne od roku 2000 c) náhodné zavedenie chýb do signálov vysielaných satelitmi vplyvom atmosféry; chyba z SA na základe spresnenia dát v navigačnej správe odstránená definitívne od roku 2000
15. Geometrickú konfiguráciu satelitov a staníc (prijímačov) GPS popisuje: a) faktor zvýšenia presnosti b) faktor zníženia presnosti c) faktor priblíženia presnosti
16. GPS poskytuje výsledky v jednotnom svetovom súradnicovom systéme: a) ETRF 84 (European Terrestrial Reference Frame 1984) b) ITRS 84 (International Terrestrial Reference System 1984) c) WGS 84 (World Geodetic System 1984)
17. GPS má aplikácie aj v geografii a GIS: a) len čiastočne b) áno c) nie
18. GLONASS rovnako ako GPS umožňuje určovanie: a) 3D polohy a rýchlosti kdekoľvek a kedykoľvek na Zemi b) 3D polohy, rýchlosti a času kedykoľvek ale len na území RF c) 3D polohy, rýchlosti a času kdekoľvek a kedykoľvek na Zemi
19. GLONASS meria pseudovzdialenosti medzi prijímačom GPS a okamžitou polohou satelitu na základe: a) iba kódových meraní b) kódových aj fázových meraní c) iba fázových meraní
20. GLONASS patrí do GNSS spolu s: a) Galileo b) Compass c) NAVSTAR GPS
21. Sú satelity GLONASS na orbitách voči satelitom GPS: a) vyššie b) nižšie c) na rovnakej výške
22. GNSS tvoria v súčasnej dobe aj budované satelitné systémy: a) Compass a GLONASS b) Galileo a Compass c) Compass a GPS
23. Galileo je navigačný satelitný systém, ktorý bude súčasťou GNSS a ktorý vlastní, spravuje a financuje: a) výlučne vojenský sektor EÚ, t.j. NATO

b) výlučne civilný sektor EÚ, t.j. Európska komisia c) civilný aj vojenský sektor EÚ, t.j. Európska komisia a NATO
24. Vesmírny segment systému Galileo bude tvoriť: a) 27 satelitov v 3 obežných dráhach so sklonom 56° k rovine rovníka vo výške 23 222 km b) 30 satelitov v 3 obežných dráhach so sklonom 56° k rovine rovníka vo výške 23 222 km c) 30 satelitov v 4 obežných dráhach so sklonom 56° k rovine rovníka vo výške 23 222 km
25. Galileo by mal ponúkať širokú paletu služieb, od všeobecného otvoreného prístupu až k obmedzenému prístupu na rôznych úrovniach, akými sú: a) otvorené služby, teda voľne dostupné základné služby spravidla zahŕňajú aplikáciu systému vo verejnom a všeobecnom záujme a komerčné služby by mali napomôcť rozvoju profesijných aktivít súkromných spoločností b) otvorené služby, teda voľne dostupné základné služby spravidla zahŕňajú aplikáciu systému vo verejnom a všeobecnom záujme a politické služby podľa rozhodnutia Európskej komisie c) otvorené služby, teda voľne dostupné základné služby spravidla zahŕňajú aplikáciu systému vo verejnom a všeobecnom záujme a vojenské služby by mali napomôcť pre účely NATO
26. BeiDou-1 je projekt Čínskej ľudovej republiky s cieľom: a) vyvinúť nezávislý navigačný satelitný systém b) vyvinúť navigačný satelitný systém závislý na GLONASS na základe Zmluvy ZSSR-ČĽR z r. 1997 c) Čína ešte nevybudovala žiaden navigačný satelitný systém
27. BeiDou-1 používa: a) MEO (Mediu Earth Orbit) satelity b) GEO (Geostationary Earth Orbit) satelity c) HEO (High Earth Orbit) satelity d) LEO (Low Earth Orbit) satelity
28. Nový systém BeiDou-2, resp. Compass bude tvorený: a) 30 satelitmi vrátane 2 geostacionárnych, ktoré budú svojím signálom pokrývať celú zemeguľu b) Bude využívať len svoje doterajších 5 geostacionárnych satelitov, ostatné satelity bude využívať z GLONASS c) 35 satelitmi, vrátane 5 geostacionárnych, ktoré budú svojím signálom pokrývať celú zemeguľu

3. ROZŠIRUJÚCE NAVIGAČNÉ SATELITNÉ SYSTÉMY

Rozširujúce, zosilňujúce, augmentačné, resp., spresňujúce navigačné satelitné systémy (*SBAS*) (z angl. *Satellite-Based Augmentation Systems*) sú systémy, ktoré podporujú rozsiahlu alebo regionálnu augmentáciu (dokonca kontinentálnu) prostredníctvom geostacionárnych (*GEO*) satelitov, ktoré vysielajú augmentačné informácie (obr. 3.1, angl.). *SBAS* rozširujú (zosilňujú) primárnu *GNSS* konšteláciu poskytnutím informácií o rozsahu, integrite a korekcii *GEO* satelitov. Zatiaľ čo hlavným cieľom systémov *SBAS* je zabezpečenie integrity, zvyšuje aj presnosť s chybou polohy menej ako 1 meter (1 sigma).

Rozšírenie, resp. zosilnenie *GNSS* je spôsob zlepšenia atribútov navigačného systému, akými je presnosť, spoľahlivosť a dostupnosť prostredníctvom integrácie externých informácií do procesu výpočtu. Existuje veľa druhov takýchto systémov (*SBAS*) a sú všeobecne pomenované alebo popísané na základe toho, ako snímač *GNSS* prijíma externé informácie. Niektoré systémy prenášajú dodatočné informácie o zdrojoch chyby (napr. posun hodín, efemeríd alebo ionosférické oneskorenie), iné poskytujú priame merania toho, koľko signálu bolo vypnuté v minulosti, zatiaľ čo tretia skupina poskytuje ďalšie informácie napr. o navigovanom vozidle, ktoré sa majú integrovať do procesu výpočtu.



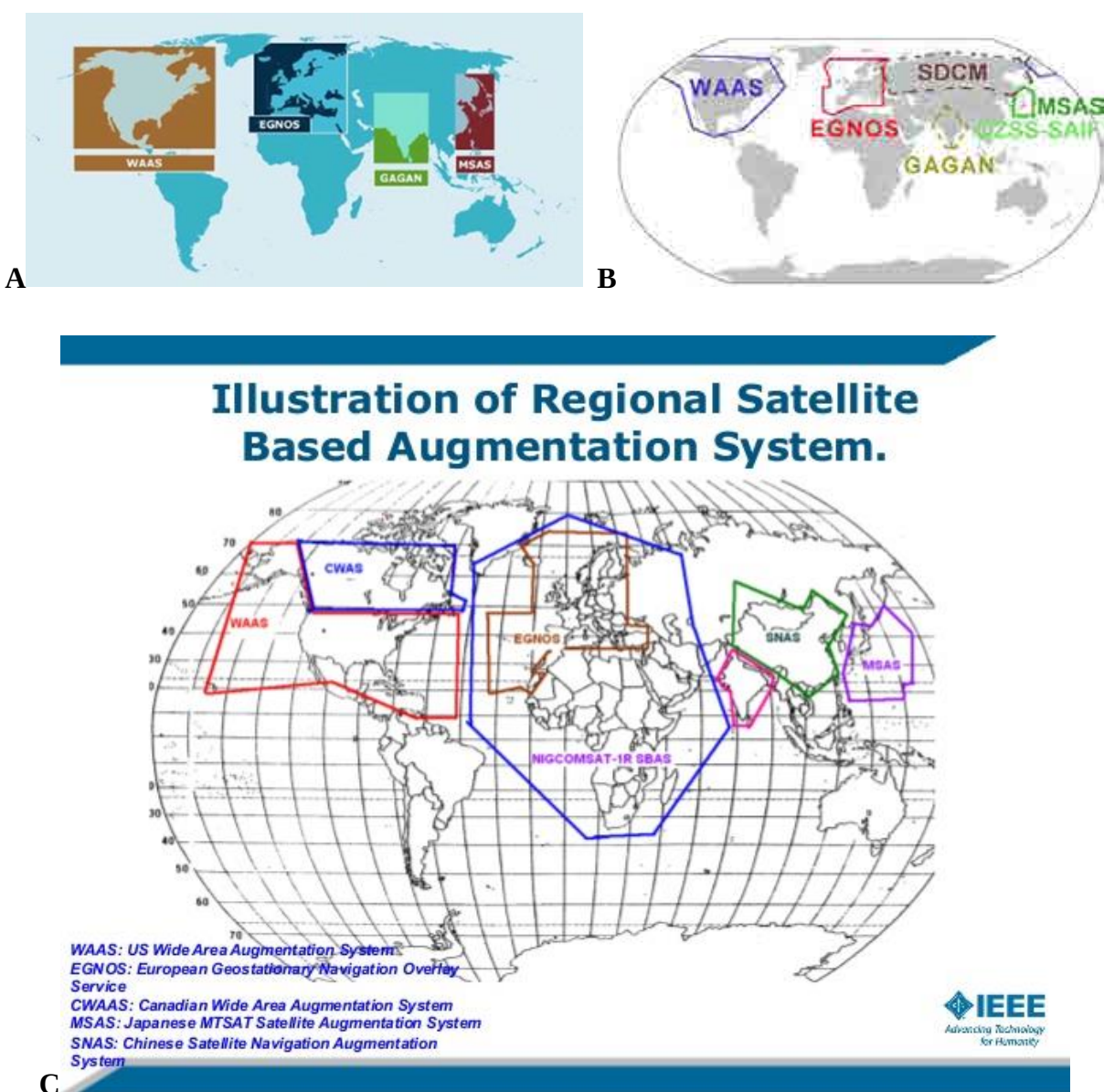
Obr. 3.1: Schéma architektúry SBAS.

Medzi *SBAS* sú začlenené (angl. názvy¹⁰⁵) (obr. 3.2, angl.) (Kaplan and Hegarty, 2006):

- *QZSS* - *Quasi-Zenith Satellite System* (Japonsko)
- *IRNSS* - *Indian Regional Navigation Satellite System* (India)

¹⁰⁵ Bez slovenského prekladu.

- WASS - Wide Area Augmentation System (USA)
- EGNOS - European Geostationary Navigation Overlay Service (EÚ)
- MSAS - Multi-functional Satellite Augmentation System (Japonsko)
- GAGAN - GPS-Aided GEO Augmented Navigation System (India)
- SDCM - System for Differential Correction and Monitoring (RF)
- SNAS - Satellite Navigation Augmentation System (Čína)
- WAGE - Wide Area GPS Enhancement (USA)
- GPS-C - GPS Correction, tiež CWAAS - Canadian Wide Area Augmentation System (Canada)
- SBAS AFI - SBAS for Africa-Indian Ocean Region (región Afriky a Indického oceánu)
- SACCSA – SBAS for South/Central America and the Caribbean
- + 2 komerčné navigačné satelitné systémy.



Obr. 3.2: Geografické rozmiestnenie a dosah niektorých SBAS v rôznych interpretáciách (A,B,C).

Obr. 3.3 (angl.) zobrazuje aktuálne svetové pokrytie *SBAS*. Tento údaj je iba aproximáciou pokrytia signálom každého systému z konštelácií *SBAS*. Aj keď je geografické pokrytie vo vyšších zemepisných šírkach, praktické využitie *SBAS* bude obmedzené na prostredie, kde je k dispozícii pomerne stály zorný pohľad na satelity zo systému *SXBlue GPS*¹⁰⁶.



Obr. 3.3: Celosvetové pokrytie SBAS.

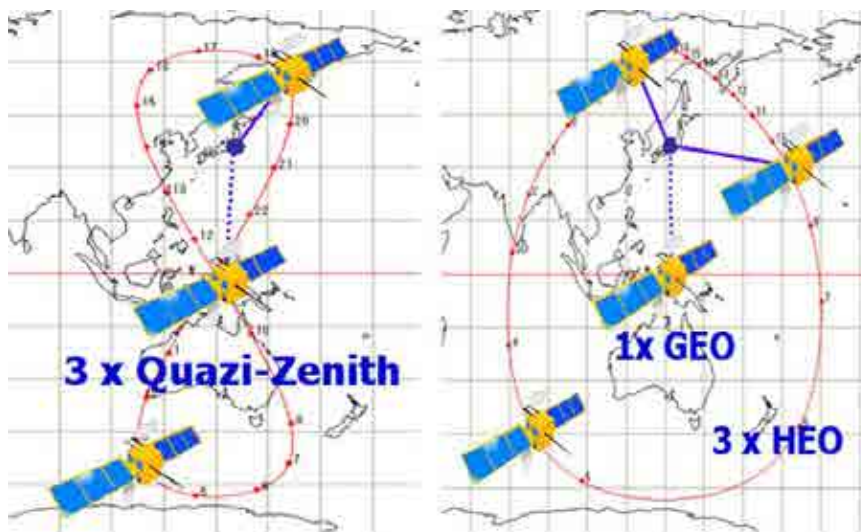
3.1 QZSS

QZSS - Quasi-Zenith Satellite System (slov. *Kvázii-zenitový Satelitný systém*). QZSS je japonský plánovaný a čiastočne aj realizovaný systém satelitného regionálneho časového prenosu založený na troch satelitoch *GEO*¹⁰⁷ a *SBAS* na zriadenie systému globálneho určovania polohy, ktorý je prijateľný v rámci Japonska (obr. 3.4, angl.).

Prvý satelit „*Michibiki*“ bol vynesený do vesmíru na svoju obežnú dráhu 11. septembra 2010. Úplný prevádzkový stav sa očakával od roku 2013. V marci 2013 japonský kabinet oznámil rozšírenie kvázi-zenitovej satelitnej sústavy z troch satelitov na štyri. Zmluva s Mitsubishi Electric o výstavbe troch satelitov za 526 miliónmi US dolárov bola určená pre výrobu satelitov, ktoré boli vynesené do vesmíru pred koncom roka 2017. Základný štvorsatelitný systém je naplánovaný do aktívnej operačnej činnosti v roku 2018.

¹⁰⁶ Spoločnosť *SXBlue GPS* je špecialista na výrobu a uvádzanie *GPS* a *GNSS* prijímačov používaných v oblasti geodézie a geomatiky.

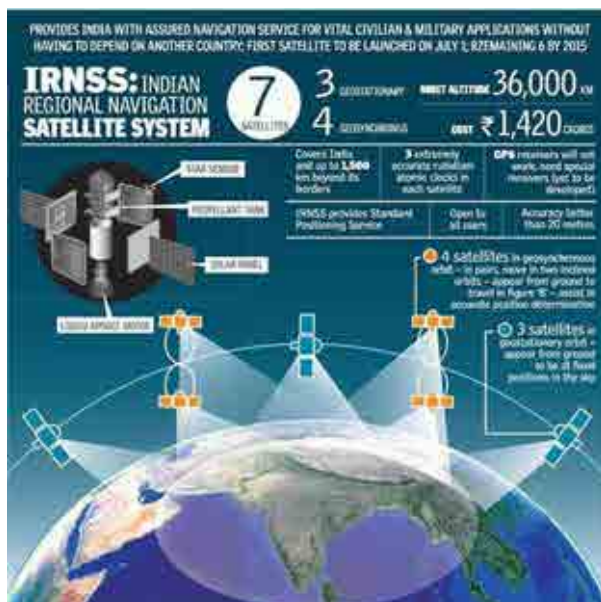
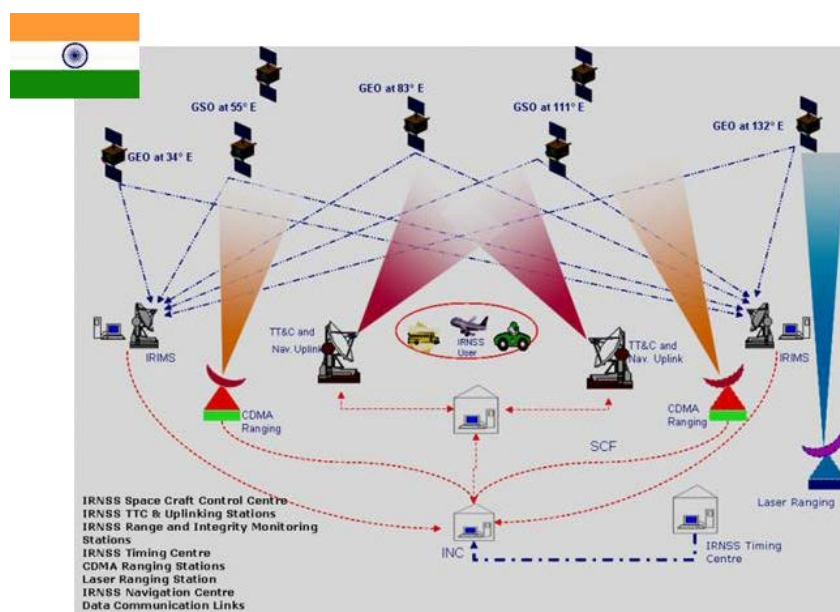
¹⁰⁷ GEO: Geostacionárna obežná dráha (z angl. *Geostationary Orbit*) je kruhová obežná dráha (orbita) 35,786 km (22 236 mi) nad zemským rovníkom a pohyb po nej je v zhode s rotáciou Zeme. HEO: Vysoko eliptická obežná dráha (z angl. *Highly Elliptical Orbit*) je eliptická obežná dráha s vysokou excentricitou.



Obr. 3.4: QZSS (Japonsko); orbity satelitov.

3.2 IRNSS

IRNSS - Indian Regional Navigation Satellite System (slov. *Indický regionálny navigačný satelitný systém*) je indický autochtónny rozvinutý navigačný satelitný systém v rámci *SBAS*, ktorý slúži na poskytovanie presných polohovacích a časovacích služieb v reálnom čase nad Indiou a v regióne s dosahom 1 500 km oolo Indie (obr. 3.5, angl.). Plne nasadený systém *IRNSS* sa skladá z troch satelitov v obežnej dráhe *GEO* a štyroch satelitov na obežnej dráhe *GSO*¹⁰⁸, približne 36 000 km nad nadzemným povrchom.



Obr. 3.5: Rôzne schémy architektúry IRNSS.

¹⁰⁸ *GSO: Geosynchronná obežná dráha* (z angl. *GeoSynchronous Orbit*) je obežnou dráhou okolo Zeme satelitu s orbitálnym časom, ktorý zodpovedá otáčaniu Zeme na svojej osi, ktorá trvá jeden hviezdny deň (23 hodín, 56 minút a 4 sekundy).

Celý systém *IRNSS* obsahuje deväť satelitov vrátane dvoch na Zemi ako pohotovostný režim. Požiadavka takéhoto navigačného systému je spôsobená tým, že v nepriateľských situáciách nie je zaručený prístup ku *GNSS* riadeným cudzou vládou, čo sa stalo aj v prípade indickej armády v závislosti od amerického *GPS* počas vojny v Kargile. Konštelácia siedemich satelitov na obežné dráhy vo vesmíre bola realizovaná v roku 2016.

IRNSS bude poskytovať dve služby: s otvorenou službou štandardného určovania polohy pre civilné použitie a obmedzenou službou (šifrovanou službou) pre oprávnených používateľov (vrátane armády).

3.3 WAAS

WAAS - *Wide Area Augmentation System* (slov. voľný preklad: *Rozširujúci systém širokej oblasti*) je americký podporný systém navigačný satelitný systém pre letectvo vyvinutý Federálnym úradom letectva USA na rozšírenie systému *GPS* s cieľom zlepšiť jeho presnosť, integritu a dostupnosť (obr. 3.6, angl.). V podstate *WAAS* umožňuje lietadlám spoliehať sa na *GPS* vo všetkých fázach letu lietadla vrátane presného priblíženia na každé letisko v rámci svojej oblasti pokrytia. *WAAS* využíva sieť pozemných referenčných staníc v severnej Amerike a na Havaji. Má schopnosť merať malé zmeny v signáloch satelitov *GPS* v západnej pologuli. Meranie z referenčných staníc sú smerované do „master“ stanice, ktorá odošle opravu dĺžky *DC* (*distance correction*) do správ geostacionárnym satelitom *WAAS* každých päť sekúnd alebo aj kratšie. Tieto satelity vysielajú opravné správy späť na Zem, kde *WAAS* s podporou prijímača *GPS* používajú opravy na zlepšenie presnosti pri výpočte ich pozície.



Obr. 3.6: Architektúra WAAS.

3.4 EGNOS

EGNOS - *European Geostationary Navigation Overlay Service* (slov. *Európska geostacionárna navigačná prekryvná služba*) je satelitný rozširujúci systém EÚ založený na *SBAS*, ktorý vypracovala *ESA* v spolupráci s *EK* a *EUROCONTROL*¹⁰⁹. Dopĺňa *GPS*, *GLONASS* a *Galileo* tým, že zvyšuje spoľahlivosť a presnosť ich lokalizačných údajov. *EGNOS* poskytuje augmentačný signál od troch geostacionárnych satelitov na frekvencii 1 575,42 MHz (*GPS* frekvencia *L1*) (obr. 3.7 angl.). Oficiálny začiatok činnosti *EGNOS* oznámila *EK* 1. októbra 2009.

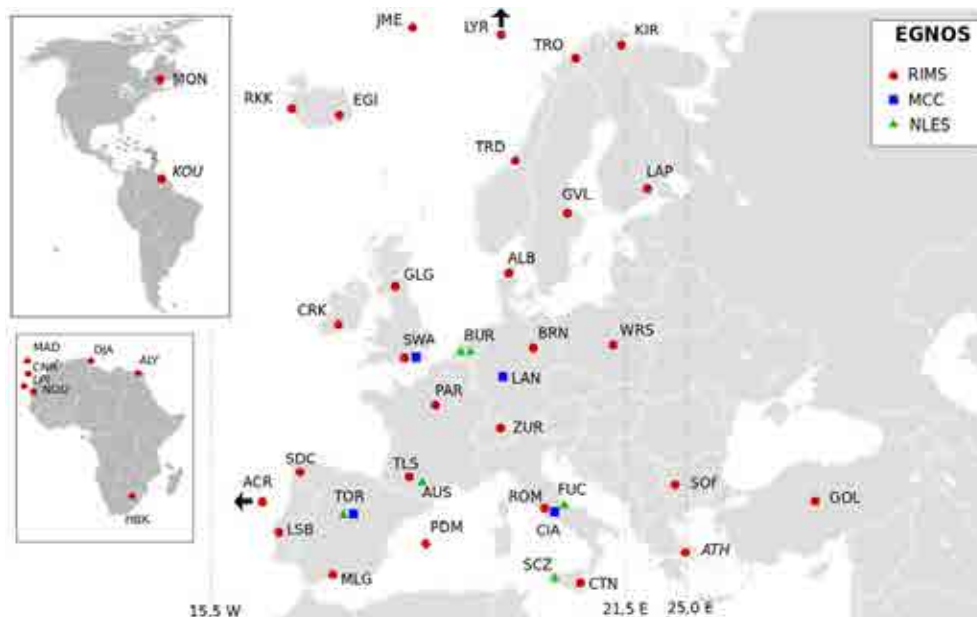


Obr. 3.7: Architektúra EGNOS.

Základné dáta *EGNOS*:

- systém vyhodnocujúci presnosť navigačných satelitných systémov *GPS* a *GLONASS*,
- prvá satelitná služba v Európe,
- projekt *ESA* a *EK*,
- znižuje nepresnosť určenia polohy na minimum bez nutnosti používať špeciálne vojenské prístroje alebo prijímať diferenciálne korekcie,
- štruktúra pozostáva z geostacionárnych satelitov a siete pozemných staníc (obr. 3.8),
- celý komplex slúži k získaniu a prenosu informácií o spoľahlivosti a presnosti signálov odosielaných zo siete *GPS* alebo *GLONASS*,
- poskytuje užívateľom v Európe a priľahlom okolí určenie polohy v intervale do 5 m oproti bežným 20 m.

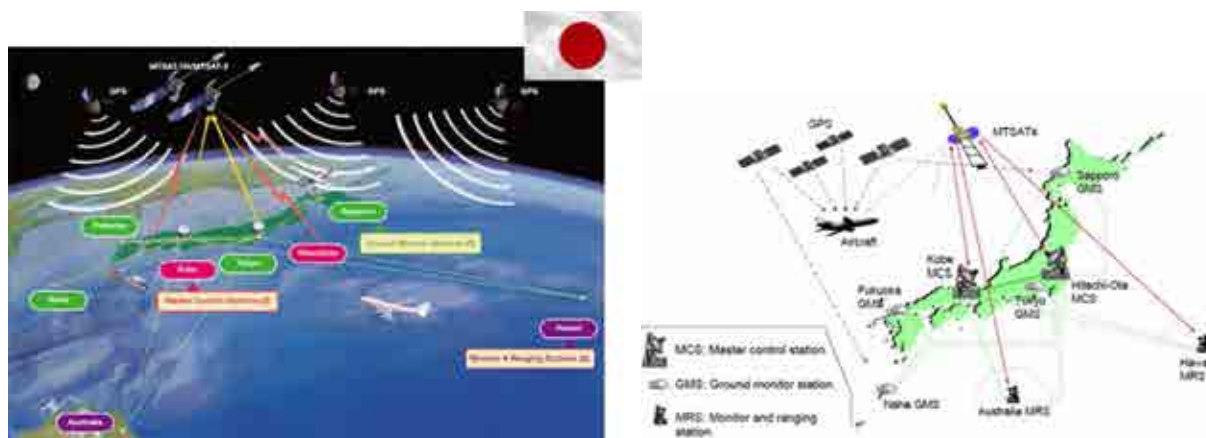
¹⁰⁹ Európska organizácia pre bezpečnosť leteckej navigácie, všeobecne známa ako *EUROCONTROL*, je medzinárodná organizácia, ktorá sa usiluje dosiahnuť bezpečné a bezproblémové riadenie letovej prevádzky v celej Európe.



Obr. 3.8: Mapa pozemných staníc EGNOS.

3.5 MSAS

MSAS - Multi-functional Satellite Augmentation System je ďalší japonský *SBAS* (tzv. *Multifunkčný satelitný rozširujúci systém*), t.j. satelitný navigačný systém, ktorý podporuje diferenciálne *GPS* (*DGPS*). *MSAS* je určená na doplnenie systému *GPS* oznamovaním a následným zlepšovaním spoľahlivosti a presnosti signálov *GPS* (obr. 3.9, angl.). Testy *MSAS* boli úspešne vykonané pre leteckú dopravu. *MSAS* bol uvedený do prevádzky 27. septembra 2007. *MSAS* presnosť signálov *GPS* zlepšil z približne 20 m na približne 1,5 m až 2 m v horizontálnom aj vertikálnom rozmere.



Obr. 3.9: Architektúra MSAS.

3.6 GAGAN

GAGAN - GPS-Aided GEO Augmented Navigation System (slov. voľný preklad: *GPS-pomocný GEO rozširujúci navigačný systém*) je ďalšia implementácia regionálneho satelitného augmentačného systému (*SBAS*) indickej vlády (obr. 3.10, angl.). Jedná sa o navigačný satelitný systém na zlepšenie presnosti prijímačov *GNSS* poskytnutím referenčných signálov.



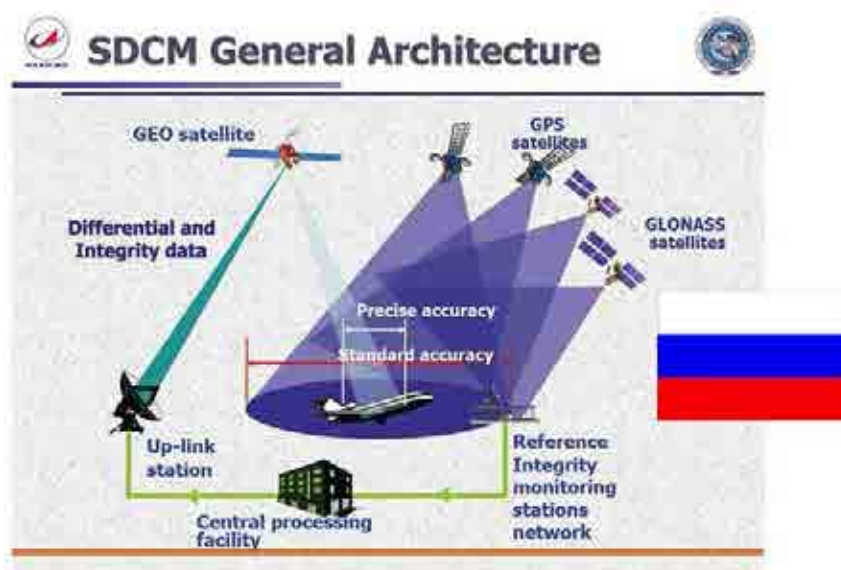
Obr. 3.10: Architektúra GAGAN.

Úsilie *AAI*¹¹⁰ na implementáciu operačného *SBAS* možno považovať za prvý krok smerom k zavedeniu moderného systému komunikácie, navigácie, riadenia letovej prevádzky nad vzdušným priestorom Indie. Projekt vytvoril 15 indických referenčných staníc, 3 indické navigačné pozemné stanice, 3 indické centrá riadenia misií a inštaláciu všetkých súvisiacich softvérových a komunikačných liniek. *GAGAN* bude schopný pomôcť pilotom navigovať sa v indickom vzdušnom priestore s presnosťou 3 m. Je to prospešné pre pristávanie lietadiel na letiskách v Indii v náročnom počasí a teréne, napr. letiská Mangalore a Leh patria medzi indické letiská s najnáročnejším terénom v Indii.

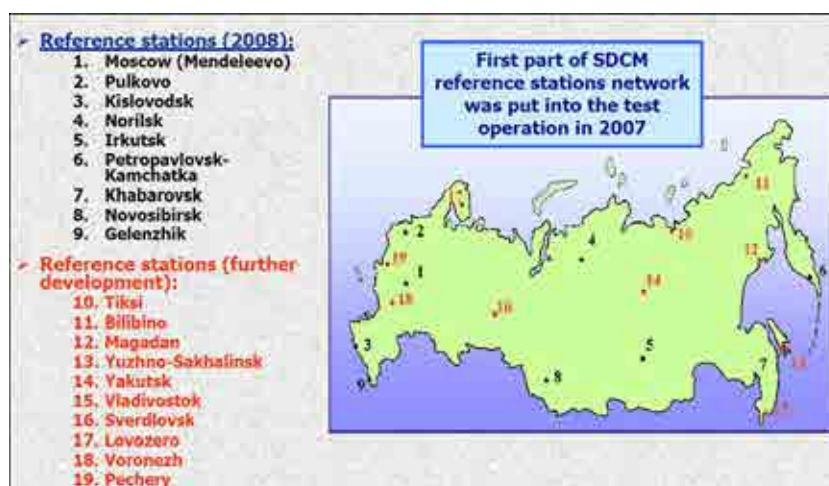
¹¹⁰ *AAI*: Agentúra pre letiská v Indii (z angl. *Airports Authority of India*) spadajúca pod Ministerstvo civilného letectva Indie, je agentúra zodpovedná za vytváranie, modernizáciu, udržiavanie a riadenie infraštruktúry civilného letectva v Indii.

3.7 SDCM

SDCM - System for Differential Correction and Monitoring (slov. *Systém pre diferenciálne korekcie a monitorovanie*) je ruský SBAS, ktorý sa v súčasnosti vyvíja v RF ako súčasť systému *GLONASS* (obr. 3.11 a 3.12, angl.). Hlavným rozlišovacím prvkom systému *SDCM* voči iným systémom *SBAS* je, že je koncipovaný ako augmentácia *SBAS*, ktorá by vykonávala monitorovanie integrity satelitov *GPS* aj *GLONASS*, zatiaľ čo zvyšok súčasných iniciatív *SBAS* okrem indického systému *GAGAN* poskytuje korekcie a integritu iba pre satelity *GPS*.



Obr. 3.11: Architektúra SDCM.



Obr. 3.12: Sieť referenčných staníc SDCM.

3.8 SNAS

SNAS - *Satellite Navigation Augmentation System* (slov. *Satelitný navigačný rozširujúci systém*). Čínska ľudová republika vyvíja vlastný SBAS (SNAS). V roku 2002 získala spoločnosť Novatel zmluvu na poskytnutie 12 prijímačov pre druhú fázu vývoja. Zazmluvnené prijímače už boli dodané do Číny. Stanice so satelitnými prijímačmi pre SNAS dopĺňajú 11 jednotiek, ktoré už boli nainštalované v Pekingu a v jeho okolí pre prvú fázu programu. Počas predstavenia vývojového stavu systému *BeiDou-2 (Compass)* na kongrese *ION¹¹¹-GNSS 2011* Čínsky satelitný navigačný úrad vymenoval služby, ktoré by poskytoval systém *BeiDou-2* a jednou z týchto služieb bol širokopásmový diferenčný servis zameraný na presnosť polohovania na 1 m. Je pravdepodobné, že tento diferenčná služba širokého rozsahu zodpovedá systému SNAS.

3.9 WAGE

WAGE - *Wide Area GPS Enhancement* (slov. voľný preklad: *Systém zlepšenia širokého priestoru GPS*) je SBAS USA na zvýšenie horizontálnej presnosti *P*-kódu a šifrovaného *Y*-kódu zašifrovaného GPS pridaním dodatočných údajov o korekcii rozsahu do navigačnej správy satelitného vysielania. WAGE prevádzkuje Ministerstvo obrany USA na použitie pre vojenské a autorizované prijímače GPS. WAGE je k dispozícii len pre autorizované prijímače GPS využívajúce *službu presného určovania polohy (PPS)* (z angl. *Precise Positioning Service*), alebo *P*-kód a jeho šifrovanú časť (*Y*-kód). Vyžaduje si najmenej 12,5 min. na získanie najnovších údajov WAGE. Následne je proces používania korekčných údajov pre prevádzkovateľa automatický a transparentný. Kedykoľvek je prijímač GPS zapnutý, nepretržite zhromažďuje údaje WAGE (či je zapnutý alebo vypnutý režim WAGE). Prijímač GPS vždy používa najaktuálnejšie údaje WAGE na výpočet pozície a nepoužije údaje, ktoré sú staršie ako 6 hod.

Pri testovaní prijímačov GPS z roku 1996 používajúce *PLGR* (z angl. *Precision Lightweight GPS Receiver*, konkrétne 5-kanálový prijímač GPS L2, slov. *presný ľahký GPS prijímač*) sa nenašla jasná výhoda v používaní WAGE v jeho súčasnej konfigurácii. Testovanie dokonca potvrdilo skutočnosť, že celková priemerná chyba vo výške 9,1 m bola horšia ako pri nepoužívaní WAGE.

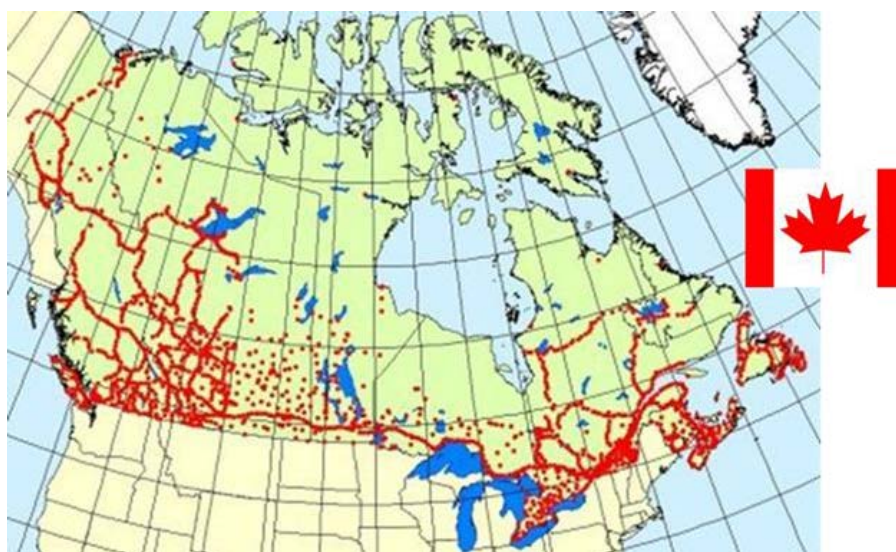
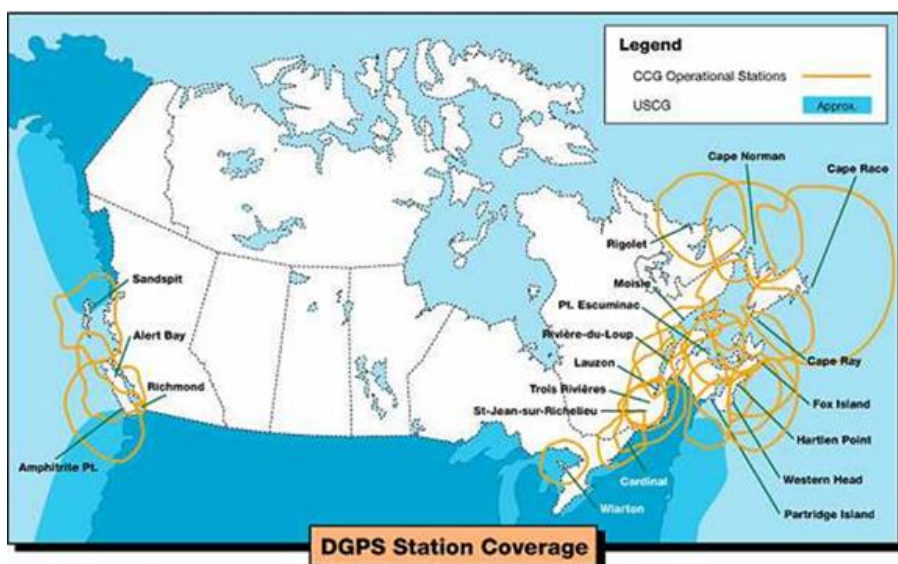
3.10 GPS·C/CWAAS

GPS·C - *GPS Correction*, tiež CWAAS¹¹² - *Canadian Wide Area Augmentation System* (slov. voľný preklad: *Korekcia GPS/Kanadský systém rozšírenia širokého priestoru*) (obr.

¹¹¹ ION: Institute of Navigation.

¹¹² CWAAS je obdobou amerického WAAS.

3.13, angl.) bol systém zdroja GPS diferenčných dát pre väčšinu Kanady udržiavaný inštitúciou *Canadian Active Control System (CACS)* (slov. *Kanadský systém aktívnej kontroly*), ktorý bol divíziou spoločnosti *Natural Resources Canada (NRCan)* (slov. *Prírodné zdroje Kanady*). Pri použití s príslušným satelitným prijímačom GPS systém GPS-C zlepšil presnosť v reálnom čase na približne 1 až 2 m, od nominálnej presnosti 15 m. Údaje v reálnom čase boli zhromaždené na štrnástich stálych pozemných staniciach rozmiestnených po celej Kanade a postúpené na centrálnu stanicu *NRC1* v Ottawe na spracovanie. Informácie o GPS-C boli vysielané v celej Kanade na *MSAT* (z angl. *Mobile Satellites*, slov. *Mobilné satelity*) prostredníctvom služby *CDGPS* (z angl. *Canadian-Wide DGPS Correction Service*). *CDGPS* vyžadoval samostatný prijímač *MSAT*, ktorý poskytuje informácie o korekcii pre vstup do akéhokoľvek vhodne vybaveného prijímača GPS. Potreba samostatného prijímača GPS spôsobuje, že je menej nákladná ako riešenia systému *WAAS*, ktorý dostáva korekčné informácie pomocou rovnakej antény a prijímača GPS. Služba GPS-C bola ukončená 31. marca 2011.



Obr. 3.13: Pokrytie Kanady službou DGPS z GPS-C/CWAAS.

3.11 SBAS AFI

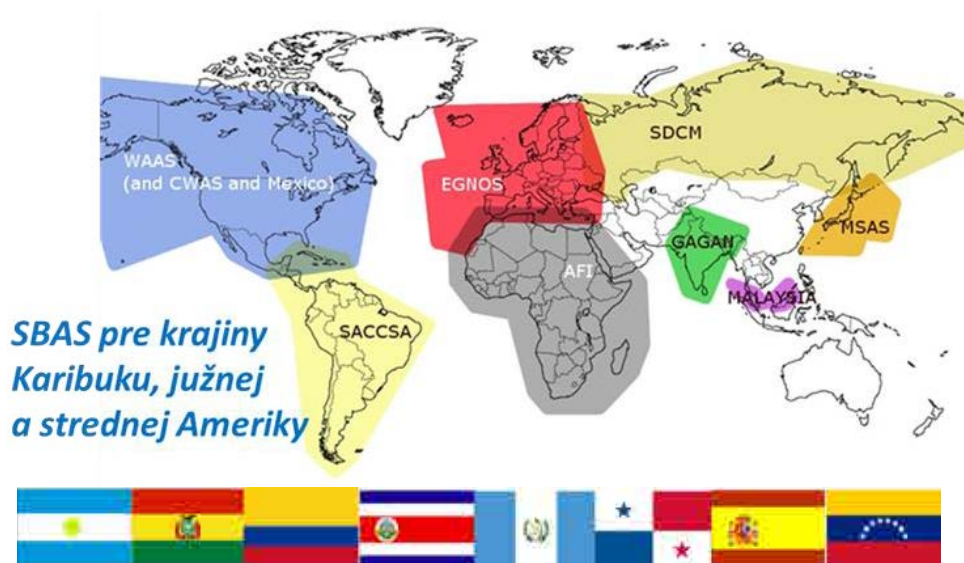
SBAS AFI - SBAS for Africa-Indian Ocean Region (slov. *SBAS pre Afriku a región Indického oceánu*). Zavedenie systému *SBAS* v Afrike, zamerané na podporu odvetvia leteckej dopravy a satelitnej navigácie v Afrike, je jednou z hlavných priorít spolupráce Afriky a EÚ (obr. 3.14, angl./slov.). V rámci strategického partnerstva medzi Afrikou a EÚ sa uvažovalo o realizačnom pláne rozšírenia systému *EGNOS* aj na územie Afriky. Plán bol prerokovaný na treťom samite Afriky a EÚ v Líbyi 29. a 30. novembra 2010. Implementácia *EGNOS* bola skúmaná z hľadiska rozšírenia tohto systému *SBAS* (*EGNOS*) pre *AFI* (Afrika a región Indického oceánu). Súčasný stav realizácie plánu rozšírenia *EGNOS* pre *AFI* je v štádiu svojej realizácie.



Obr. 3.14: EGNOS pre AFI.

3.12 SSACCSA

SACCSA. Iniciatíva *SBAS* v Karibiku, južnej a strednej Amerike sa nazýva *SACCSA* (zo špan. *Solución de Aumentación para Caribe, Centro y Sudamérica*, slov. *Riešenie augmentácie pre pre Karibik, strednú a južnú Ameriku*) (obr. 3.15, angl./slov.). *SACCSA* je projekt ICAO (z angl. *International Civil Aviation Organization*, slov. *Medzinárodná organizácia civilného letectva*) postavený účastníkmi - členskými štátmi projektu *SACCSA*: Argentína, Bolívia, Kolumbia, Kostarika, Guatemala, Panama, Španielsko, Venezuela a *COCESNA* (z port. *Corporación Centroamerica de Servicios de Navegación Aérea*, slov. *Stredoamerická korporácia leteckých navigačných služieb*). Cieľom je preskúmať zlepšenie vzdušného leteckého navigačného prostredia v regiónoch Karibiku, južnej a strednej Ameriky riešením *SBAS*. Program začal v roku 2003. V súčasnosti je vo svojej tretej fáze, ktorá určuje realizovateľnosť implementácie vlastného systému *SBAS* v regiónoch Karibiku, južnej a strednej Ameriky.



Obr. 3.15: SBAS pre Karibik, južnú a strednú Ameriku.

Otázky a úlohy z kap. 3

K overeniu získaných vedomostí z obsahu kap. 3 zodpovedajte na nasledujúce otázky a riešte úlohy. Správne odpovede a riešenia nájdete na konci skrípt.

Otázky a úlohy:

1. Medzi SBAS, ktoré zvyšujú efektívnosť GNSS, nepatrí:
 - a) WASS
 - b) EGNOS
 - c) Compass
 - d) MSAS
 - e) GAGAN
2. IRNSS je:
 - a) Indonesian Regional Navigation Satellite System
 - b) Indian Regional Navigation Satellite System
 - c) Iraquian Regional Navigation Satellite System
3. EGNOS v súčasnosti slúži k získaniu a prenosu informácií o spoľahlivosti a presnosti signálov odosielaných zo siete:
 - a) GPS a GLONASS
 - b) GPS a Compass
 - c) GLONASS a Galileo
4. Zavedenie systému SBAS v Afrike znamená:
 - a) rozšírenie dosahu EGNOS na územie Afriky a arabských krajín blízkeho východu
 - b) rozšírenie dosahu EGNOS na územie Afriky a región Indického oceánu
 - c) rozšírenie dosahu WAAS na územie Afriky a región Indického oceánu
5. WAGE je k dispozícii len pre autorizované prijímače GPS využívajúce servis:
 - a) presného určovania polohy (PPS) alebo P-kód a jeho šifrovanú časť (Y-kód)
 - b) presného určovania polohy (PPS) alebo C/A-kód jeho šifrovanú časť (Y-kód)
 - c) presného určovania polohy (PPS) alebo C/A-kód jeho šifrovanú časť (Y-kód)

ZÁVER

Vo vysokoškolských skriptách *Globálne navigačné satelitné systémy* boli prezentované dve skupiny GNSS. Prvú skupinu predstavujú v súčasnosti dva plne funkčné navigačné satelitné systémy, ktorými je americký GPS a ruský GLONASS. Druhú skupinu tvorí v súčasnosti v štádiu svojho budovania európsky navigačný satelitný systém *Galileo* a čínsky *Compass*. V stručnosti sú uvedené aj tzv. spresňujúce, resp. rozširujúce (augmentačné) navigačné satelitné systémy (SBAS: *Satellite-Based Augmentation Systems*), ktoré sú regionálneho charakteru a majú za úlohu rozšíriť dosah, či podpríť signály od satelitov základných globálnych navigačných satelitných systémov (GPS, GLONASS, *Galileo*, *Compass*).

Celá problematika satelitnej navigácie, akú poznáme v súčasnej dobe, je uvedená stručným historickým prehľadom o navigácii a lokalizácii ako takej od predhistorických dôb, cez stredovek, potom cez obdobie využívania prvých princípov rádiovej lokalizácii a navigácii až po prvé a súčasné projekty satelitnej lokalizácie a navigácie vo svete.

Neobvykle väčší priestor v tomto historickom prehľade o lokalizácii a navigácii je ponechaný námornej navigácii v období stredoveku, pretože tam kdesi u námorných plavieb sa rodili prvé myšlienky astronomickej navigácie, t.j. navigácia lodí podľa vesmírnych objektov. Práve námorníci cez dlhé obdobie stredoveku za čias veľkých zámorských a zaoceánskych námorných objavov mali toho času veľmi obmedzené technické možnosti svojej lokalizácie a navigácie na otvorenom mori či oceáne. A práve tam, u námorníkov vznikol základ pre idey do ďalekej budúcnosti o navigácii podľa iných než prirodzených vesmírnych objektov (Slnko, Mesiac, hviezdy a pod.), ktorými by boli „umelé“ vesmírne telesá (objekty) a ktoré s postupom času človek aj dostal vesmíru. Týmito „umelými“ (nie prirodzenými) objektami vo vesmíre boli práve umelé družice Zeme (satelity), ktorých rádiové signály (elektromagnetické vlny) v súčasnosti využívame k určeniu našej polohy na zemskom povrchu a aj mimo neho za podpory technického vybavenia, ktoré detekuje príjem takýchto vln a vyhodnocuje našu 3D polohu.

Čitateľovi zaiste neunikne pozornosti skutočnosť, že takmer všetky už historické a aj súčasné či už pozemné alebo neskôr satelitné navigačné systémy boli a sú vyvíjané pôvodne pre vojenské účely, t.j. pre navigáciu vojenských lodí a lietadiel. Civilný sektor dostáva možnosť využívať tieto vojenské navigačné satelitné systémy s odstupom času po vývoji týchto navigačných satelitných techník väčšinou na základe politických rozhodnutí svetových veľmocí, ktorým tieto systémy patria. Výnimku tvorí jedine európsky a v súčasnosti budovaný navigačný satelitný systém *Galileo*, pretože projekt EÚ je v gescii výlučne civilnej organizácie, t.j. Európskej komisie.

Snahou vysokoškolských skript je oboznámiť čitateľa s princípmi a činnosťou prezentovaných GNSS a poukázať najmä na možnosti ich aplikačných výstupov predovšetkým do oblastí so spoločným geodeticko-geografickým menovateľom.

Jednotlivé kardinálne kapitoly skript sú doplnené otázkami a úlohami podporujúce snahu čitateľa zopakovať si odbornú náplň z jednotlivých popísaných a vysvetľujúcich navigačných, najmä satelitných problematik.

Predkladané vysokoškolské skriptá tvoria základnú študijnú literatúru pre študijný predmet *Globálne navigačné satelitné systémy* v rámci študijného programu *Geografia a*

geoinformatika na Prírodovedeckej fakulte Univerzity Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach. K hlbšiemu štúdiu predmetnej problematiky GNSS je nesporne potrebné rozšírenie študijných materiálov o ďalšie literárne zdroje s problematikou navigačných satelitných systémov a ich aplikácií.

Správne odpovede a riešenia

Správne odpovede a riešenia – kap. 1

1. Áno, GNSS uľahčujú navigáciu a určenie priestorovej (3D) lokalizácie na zemskom povrchu.
2. Technológia GNSS je nástrojom pre nepriame určenie polohy.
3. V druhej polovici 20. stor. námorný chronometer bol vytlačený z používania satelitnou navigáciou.
4. Nultý poludník prechádza cez Kráľovské observatórium v Greenwichi (Londýn).
5. A-d, B-a, C-b, D-c
6. Áno, systém TRANSIT bol historicky prvý satelitný polohový systém prevádzkovaný 1964–1996 vojenským námorníctvom USA, s ktorého pomocou bolo možné určiť polohu s presnosťou prvých stoviek metrov a presný čas kdekoľvek na Zemi.
7. b) Posledným projektom predchádzajúcim dnešný NAVSTAR GPS bol v roku 1964 projekt TIMATION.

Správne odpovede a riešenia – kap. 2

1. c) GNSS začali budovaním GPS a GLONASS začiatkom 70-tych rokov minulého storočia.
2. GPS sa skladá z troch segmentov: kozmický, riadiaci, užívateľský.
3. c) V súčasnosti v GPS pracuje: 24 satelitov (21 aktívne + 3 záložné) na 6 orbitách.
4. b) Hlavná riadiaca stanica GPS (MCS – Master Control Station) je umiestnená v opevnenom bunkri v Skalistých horách na Schrieverovej vojenskej leteckej základni (bývalej Falcon vojenskej leteckej základni) v Colorado Springs (Colorado, USA)
5. b) Efemeridy sú dáta o polohe satelitov, t.j. efemeridy satelitov sú ich predpovedané dráhy (parametre obežných dráh), ktoré umožňujú modelovať polohu satelitu prakticky v akomkoľvek požadovanom čase.
6. a) Pre výpočet všetkých súradníc (x, y, z, t) je potrebné prijímať signál aspoň zo štyroch satelitov.
7. b) Prijímače GPS pre fázové meranie môžu byť jednofrekvenčné aj dvojfrekvenčné – pracujú s frekvenciou L1 a L2.
8. b) Systémový čas GPS – TGPS (Time GPS) pozostáva z poradového čísla GPS týždňa a počtu sekúnd v rámci GPS týždňa.

9. b) Pojem pseudovzdialenosť sa používa z toho dôvodu, že určovaná vzdialenosť satelit-prijímač GPS je zaťažená istými chybami hodín na satelite a v prijímači GPS.
10. a) Meranie pseudovzdialeností pomocou pseudonáhodných kódov PRN je založené na meraní rozdielu medzi časom odoslania a prijatia správy (zo satelitu do prijímača GPS).
11. c) Relatívne určenie polohy z GPS meraní je oveľa presnejšie než absolútne určenie polohy.
12. a) d) Diferenciálne korekcie v DGPS sa zbierajú a ukladajú v referenčnom prijímači a aplikujú sa až po nameraní údajov v teréne do následného spracovania (post-processing) alebo korekcie sa monitorujú zvyčajne cez telekomunikácie z SKPOS, a tak sa zavádzajú v reálnom čase.
13. c) RTK metóda GPS je v podstate kinematická metóda určovania polohy v reálnom čase, prijímač GPS na určovanom bode musí byť nejakým komunikačným kanálom priamo napojený na referenčnú stanicu (resp. využívame služby SKPOS) a musí byť zabezpečený neprerušený kontakt počas transportu (presunu prijímača GPS medzi určenými bodmi).
14. b) Selektívnou dostupnosťou (SA) sa rozumie zámerné zavedenie chýb do signálov vysielaných satelitmi správcom GPS; chyba z SA na základe politických rozhodnutí prezidenta USA odstránená definitívne od roku 2000.
15. b) Geometrickú konfiguráciu satelitov a staníc (prijímačov) GPS popisuje faktor zníženia presnosti.
16. c) GPS poskytuje výsledky v jednotnom svetovom súradnicovom systéme WGS 84 (World Geodetic System 1984).
17. a) Áno, GPS má aplikácie aj v geografii a GIS.
18. c) GLONASS rovnako ako GPS umožňuje určovanie 3D polohy, rýchlosti a času kdekoľvek a kedykoľvek na Zemi.
19. b) GLONASS meria pseudovzdialenosti medzi prijímačom GPS a okamžitou polohou satelitu na základe kódových aj fázových meraní.
20. c) GLONASS patrí do GNSS spolu s NAVSTAR GPS.
21. b) Satelity GLONASS na orbitách voči satelitom GPS sú nižšie.
22. b) GNSS tvoria v súčasnej dobe aj budované satelitné systémy Galileo a Compass.
23. b) Galileo je navigačný satelitný systém, ktorý bude súčasťou GNSS a ktorý vlastní, spravuje a financuje výlučne civilný sektor EÚ, t.j. Európska komisia.
24. b) Vesmírny segment systému Galileo bude tvoriť 30 satelitov v 3 obežných dráhach so sklonom 56° k rovine rovníka vo výške 23 222 km.
25. a) Galileo by mal ponúkať širokú paletu služieb, od všeobecného otvoreného prístupu až k obmedzenému prístupu na rôznych úrovniach, akými sú otvorené služby, teda voľne dostupné základné služby spravidla zahŕňajú aplikáciu systému vo verejnom a všeobecnom záujme a komerčné služby by mali napomôcť rozvoju profesionálnych aktivít súkromných spoločností.

- | |
|--|
| 26. a) BeiDou-1 je projekt Čínskej ľudovej republiky s cieľom vyvinúť nezávislý navigačný satelitný systém. |
| 27. b) BeiDou-1 používa GEO (Geostationary Earth Orbit) satelity. |
| 28. c) Nový systém BeiDou-2, resp. Compass bude tvorený 35 satelitmi, vrátane 5 geostacionárnych, ktoré budú svojim signálom pokrývať celú zemeguľu. |

Správne odpovede a riešenia – kap. 3

- | |
|---|
| 1. c) Medzi SBAS, ktoré zvyšujú efektívnosť GNSS, nepatrí Compass. |
| 2. b) IRNSS je Indian Regional Navigation Satellite System. |
| 3. a) EGNOS v súčasnosti slúži k získaniu a prenosu informácií o spoľahlivosti a presnosti signálov odosielaných zo siete GPS a GLONASS. |
| 4. b) Zavedenie systému SBAS v Afrike znamená rozšírenie dosahu EGNOS na územie Afriky a región Indického oceánu. |
| 5. a) WAGE je k dispozícii len pre autorizované prijímače GPS využívajúce servis presného určovania polohy (PPS) alebo P-kód a jeho šifrovanú časť (Y-kód). |

Literatúra

- BETZ, J.W., 2015. *Engineering Satellite-Based Navigation and Timing: GNSS, Signals, and Receivers*. New Jersey: Wiley-IEEE Press. ISBN 978-1-118-61597-3.
- BLAIR, S. a EJL-QUARTZ, 2011. *Birth of the European Satellite Navigation Constellation Galileo in-orbit Validation*. Paris: European Space Agency. ISBN 978-92-9221-044-1, ISN 0250-1589.
- DODEL, H. a H. HÄUPLER, 2009: *Satellitenavigation*. Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-79446-1.
- FORSSELL, B., 2008. *Radionavigation system*. Norwood: Artech House Publisher. ISBN 978-1-596-93354-5.
- GLEASON, S. a D. GEBRE-EGZIABHER, 2009. *GNSS Applications and Methods*. Norwood: Artech House Publisher. ISBN 978-1-596-93329-3.
- HOFMANN-WELLENHOF, B., H. LICHTENEGGER a E. WASLE, 2008. *GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Wien-New York. Springer. ISBN 978-3-211-73017-1.
- JEFFREY, CH. 2015. *An Introduction to GNSS: GPS, GLONASS, Galileo and other Global Navigation Satellite Systems*. Calgary: NovAtel. ISBN 978-0-9813754-0-3.
- JIN, S., E. CARDELLACH a F. XIE, 2014. *GNSS Remote Sensing. Theory, Methods and Applications*. Wien-New York. Springer. ISBN 978-94-007-7482-7.
- KAPLAN, E.D. a C.J. HEGARTY, 2006. *Understanding GPS Principles and Applications*. 2nd ed.. Artch House. ISBN 1-58053-894-0.
- KOMISIA EURÓPSKYCH SPOLOČENSTIEV, 2006. *Zelená kniha o družicových navigačných aplikáciách*. Brusel: KOM.
- LEICK, A., L. RAPOPORT a D. TATARNIKOV, 2015. *GPS Satellite Surveying*. 4th ed., New York: Wiley. ISBN 978-1-118-67557-1.
- MERVART, L., 1994. *Globální polohový systém*. Praha: České vysoké učení technické Praha. ISBN 80-01-01221-2.
- MONTENBRUCK, O., A. HAUSCHILD, P. STEIGENBERGER a S. NAKAMURA, 2013. Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-2 regional navigation satellite system. In: *GPS Solutions*. Vol. 17, No. 2, pp.2011-222. ISSN 1080-5370.
- RAPANT, P., 2002. *Družicové polohové systémy*. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava. ISBN 80-248-0124-8.
- SEDLÁK, V., 2003. *Kozmická geodézia: Globálny polohový systém*. 2. vyd. Košice: Technická univerzita v Košiciach. ISBN 80-7099-670-6.
- SEDLÁK, V., P. LOŠONCZI a I. PODLESNÁ, 2009. *Družicové navigačné systémy*. Košice: Vysoká škola bezpečnostného manažérstva v Košiciach. ISBN 978-80-89282-31-9.
- SEDLÁK, V. a P. LOŠONCZI, 2011. *Družicové navigačné systémy a ich bezpečnostné aplikácie*. Košice: Vysoká škola bezpečnostného manažérstva v Košiciach. ISBN: 978-80-89282-66-1.
- SEDLÁK, V., 2012. *Globálne navigačné satelitné systémy pre bezpečnostný manažment*. Košice: Vysoká škola bezpečnostného manažérstva v Košiciach. ISBN 978-80-89282-83-8.

- SEEBER, G., 2003. *Satellite Geodesy*. Berlin: Walter de Gruyter. ISBN 3-11-017549-5.
- SKPOS, 2017. *Slovenská obderváčná priestorová služba*. [online] [cited. 06.11.2017, 17:42 SEČ]. Dostupné na: <https://www.geoportal.sk/sk/geodeticke-zaklady/skpos>
- SMERNICA 2004/52/ES EURÓPSKEHO PARLAMENTU A RADY z 29. apríla 2004, o interoperabilite elektronických cestných mýtnych systémov v spoločenstve.
- ŠEBESTA, J., 2012. *Globální navigační systémy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. ISBN 978-80-214-4500-0.
- VALACH, F. a A. PRIGANCOVÁ, 2006: Neutral network model for the Kp prediction based on one-hour averages of solar wind data. In: *Contribution to Geophysics and Geodesy*. Vol. 36, Special Issue, pp.73-80. ISSN1338-0540.
- VOJTEK, D., 2014. *Globální navigační a polohové systémy*. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, 357 s.

Zoznam obrázkov a tabuliek

- Obr. 1.1 Umelé orientačné body (objekty) v teréne: kamenný násyp (A); Trakijská mohyla pri obci Debnevo, Trojansko v Bulharsku (B); mohyla Homole - praveká mohyla, Chotouň, Česká republika (C); mohyly - ilustračná kresba z konca 18. stor. (D)
- Obr. 1.2 Stredoveké vyobrazenie majáku v Alexandrii na ostrove Faros (A) a jeho novodobá maketa (B); najstarší funkčný maják na svete Torre de Hércules alebo tiež Herkulova veža pri Atlantickom oceáne (pri galicijskom prístavnom meste La Coruña, Španielsko) (C); zrekonštruovaný maják zo 17. stor. na pobreží jazera Swilly, Írsko (D)
- Obr. 1.3 Navigácia lode výpočtom - kompasový kurz. Náčrt podľa dobových máp z konca 13. stor.
- Obr. 1.4 Historické náčrty námorných navigácií a navigačných zariadení
- Obr. 1.5 Stredoveké lodné kompasy: originál z konca 17. stor. (A); retromodely podľa originálov zo 16. až 17. stor. (B-D)
- Obr. 1.6 Objavné plavby: Krištof Kolumbus (A); Vasco de Gama (B); James Cook (C), prvá plavba je vyznačená červenou, druhá zelenou a tretia modrou farbou)
- Obr. 1.7 Chronometer - historický náčrt zo začiatku 18. stor. (A); sextant z 18. stor. - britský sextant v McCord Múzeu, Montreal, 1756-1772 (B); ukážka používania sextantu na mori - historická fotografia zo začiatku 19. stor. (C); princíp lokalizácie a navigácie lode pomocou chronometra (D)
- Obr. 1.8 Lano na meranie rýchlosti s naviazanou doskou (log)
- Obr. 1.9 Greenwichské observatórium v Londýne: súčasnosť (A); dobová kresba z roku 1710 (B); vyznačenie nultého poludníka (C)
- Obr. 1.10 Znázornenie poludníkov a nultého (Greenwichského) poludníka
- Obr. 1.11 Ostrov Ferro (El Hierro) v skupine Kanárskych ostrovov v Atlantiku, ktorým prechádzal nultý poludník (1634-1884)
- Obr. 1.12 Najväčšie hodiny na svete na veži hotela Abradž Al-Bajt Towers v Mekke (Saudská Arábia)
- Obr. 1.13 Ukážka radarov
- Obr. 1.14 Princíp činnosti a navigácie LORAN-C pre letectvo
- Obr. 1.15 Princíp hyperbolickej navigácie (časomerne hyperbolická metóda)
- Obr. 1.16 Pokrytie atlantickej a pacifickej oblasti signálmi systému LORAN-C
- Obr. 1.17 Sputnik-1
- Obr. 1.18 Lokalizácia Bajkonuru v dnešnom Kazachstane (v strede a vľavo dole); mapa dnešnej Ruskej federácie (vľavo hore); štartovací komplex pre rakety Sojuz (vpravo hore); v uliciach mesta Bajkonur (vpravo dole)
- Obr. 1.19 TRANSIT 2A so satelitom GRAB 1 na vrchole počas prípravy na štartovanie (A); model satelitu GRAB v Národnom kryptologickom múzeu, USA (B); operačný satelit TRANSITu (C)
- Obr. 1.20 Podzemný vojenský komplex v zátok Balaklava (Krym); umelcova vízia dokončenej základne (vľavo dole)
- Obr. 1.21 Satelit systému SECOR
- Obr. 1.22 Satelit TIMATION TS-1 (A); satelit TIMATION 2 (B)
- Obr. 2.1 Plánovaná a skutočná dráha letu KAL 007; hektická správa o tragédii v The New York Times
- Obr. 2.2 Turistické navigátori GPS

- Obr. 2.3 GPS navigácia na mori
- Obr. 2.4 Ručné navigátory GPS pre mestskú turistiku
- Obr. 2.5 Rôzne druhy navigátorov GPS a ich umiestnenia na bicykli
- Obr. 2.6 Rôzne druhy navigátorov GPS pre automobily; voľné na upevnenie v interiéri automobilu alebo pevne zabudované v palubovej doske automobilu
- Obr. 2.7 Rôzne druhy navigátorov GPS a ich umiestnenia na motorke
- Obr. 2.8 Geocaching – zábava s GPS; ukážky obsahu rôznych caches (skrýš geocachingu); logo geocachingu (vľavo hore)
- Obr. 2.9 Referenčné stanice SKPOS
- Obr. 2.10 Ukážky niektorých staníc SKPOS
- Obr. 2.11 Rôzne ukážky zobrazení a schém segmentov GPS
- Obr. 2.12 Kozmický segment GPS a konštelácia satelitov
- Obr. 2.13 Základné dáta konštelácie satelitov GPS
- Obr. 2.14 Porovnanie geostacionárnej obežnej dráhy, obežných dráh GPS, GLONASS a Galileo a strednej obežnej dráhy (Compass)
- Obr. 2.15 Satelit GPS
- Obr. 2.16 Satelity GPS: Block I (A), Block IIA (B), Block IIR (C), Block IIR-M (D), Block IIF (E)
- Obr. 2.17 Atómové hodiny na satelite GPS (A); prvé atómové hodiny z roku 1955 (B)
- Obr. 2.18 Raketa Delta v príprave a na odpaľovacej rampe pre vynesenie satelitov GPS do vesmíru z vojenskej leteckej základne v Cape Canaveral (A); foto niektorých odpaľovacích rámp amerického kozmodrómu v Cape Canaveral (B); Cape Canaveral (Florida) Air Force Station (C)
- Obr. 2.19 Trajektória obežnej dráhy satelitu GPS (Block IIF) s PRN-17 za 24 hodín (24.2.2010) (A); celá konštelácia kozmického segmentu GPS (trajektórie satelitov) 10.3.2014 o 12:00 UTC (B)
- Obr. 2.20 Schéma fyzikálneho princípu modulácie vln (A); schéma modulácie signálu vysielaného satelitom GPS (B)
- Obr. 2.21 Schéma odvodzovania frekvencií jednotlivých signálov GPS
- Obr. 2.22 Rôzne schematické znázornenia navigačnej správy GPS
- Obr. 2.23 Riadiaci segment GPS s rozmiestnením jeho komponentov (staníc GPS)
- Obr. 2.24 Navstar Headquarters v Los Angeles - záložné veliteľstvo GPS (vľavo dole); MCS v Colorado Springs - operátorka riadiaceho strediska na leteckej základni Schriever monitorujúca stav kozmického segmentu (vpravo dole)
- Obr. 2.25 Monitorovacia stanica GPS na Havajoch (hore); monitorovacia stanica GPS v Museum Rocket Garden - Air Force Space and Missile Museum v Cape Canaveral, Florida, USA (dole)
- Obr. 2.26 Navigácia pomocou GPS
- Obr. 2.27 Diferenciálne meranie polohy pomocou GPS
- Obr. 2.28 Ukážka geodetických prijímačov GPS
- Obr. 2.29 MCC koordinácia časov na satelitoch GPS
- Obr. 2.30 Profesionálny testovací modul generátora signálov GPS s anténami
- Obr. 2.31 Určenie 3D polohy prijímača a GPS času
- Obr. 2.32 Názorný príklad: Skutočná vzdialenosť a pseudovzdialenosť medzi satelitom a prijímačom GPS.
- Obr. 2.33 Absolútne (časové, kódové) GPS meranie
- Obr. 2.34 Reálné (fázové) GPS meranie
- Obr. 2.35 Koncepcia ambiguity vo fázovom meraní
- Obr. 2.36 GPS meranie pri tvorbe dvojnásobných diferencií

- Obr. 2.37 GPS meranie pri tvorbe trojnásobných diferencií
- Obr. 2.38 Diferenciálny GPS
- Obr. 2.39 Statická metóda
- Obr. 2.40 Kinematická metóda
- Obr. 2.41 Pseudokinematická metóda
- Obr. 2.42 Ukážky konfigurácie štyroch satelitov s rôznymi faktormi GDOP (geometrický faktor zníženia presnosti)
- Obr. 2.43 Priebeh PDOP pre interval 12 hod.; B (latitude-zemepisná šírka)=49°, L (longitude-zemepisná šírka)=20°, 15.11.2001, výškový filter 15°, 24 satelitov
- Obr. 2.44 AS systém a GPS
- Obr. 2.45 Vplyv atmosféry
- Obr. 2.46 Viaccestné, odrazené signály od budov
- Obr. 2.47 Viaccestné, odrazené signály od terénu
- Obr. 2.48 Vplyv elektromagnetického poľa a kovového objektu
- Obr. 2.49 Tienenie (zašumenie) signálu porastom (A, C, D); bez tienenia signálu (B)
- Obr. 2.50 Zdroje chýb a ich vplyv na signál GPS
- Obr. 2.51 WGS 84
- Obr. 2.52 GLONASS; projektovaná konštelácia satelitov GLONASS na obežnej dráhe (vpravo hore)
- Obr. 2.53 Satelit GLONASS-K model (A) a na orbite vo vesmíre (B); satelit GLONASS Uragan-M model (C) a na orbite (D) satelit GLONASS Uragan-K1 (E); satelit GLONASS dnes už nepoužívaný prvej série Uragan (fotografie NASA) (F)
- Obr. 2.54 Konštelácia satelitov GLONASS-M 3. februára 2012 o 09:48 GMT
- Obr. 2.55 Riadiaci segment GLONASS; mapa s lokalizáciou kozmodrómu v Bajkonure (Kazachstan) (A); mapa RF s lokalizáciou piatich povelových staníc (B)
- Obr. 2.56 Odlišnosť v konštelácii satelitov GLONASS (vľavo) a GPS (vpravo)
- Obr. 2.57 Porovnanie GLONASS vs GPS v dátach.
- Obr. 2.58 Princíp satelitného navigačného systému Galileo pri určovaní 3D polohy
- Obr. 2.59 Satelit GIOVE-A
- Obr. 2.60 Navigačný satelitný systém Galileo v dátach; mapa Kazachstanu s lokalizáciou kozmodrómu Bajkonur
- Obr. 2.61 Satelit GIOVE-B
- Obr. 2.62 Ruská raketa Proton-K/M na odpaľovacej rampe
- Obr. 2.63 Francúzska Guayana (mapa dole); pohľad do riadiaceho strediska kozmodrómu v Kouru (fotografia hore)
- Obr. 2.64 Ukážka atómových - vodíkových hodín navigačného systému Galileo
- Obr. 2.65 Kozmický segment Galileo; dva prieskumné satelity GIOVE-A a GIOVE-B (A); konštelácia 30 satelitov (obrazový kredit ESA) (B)
- Obr. 2.66 Ukážka antény TT&C
- Obr. 2.67 Architektúra systému Galileo
- Obr. 2.68 Architektúra pozemného segmentu systému Galileo
- Obr. 2.69 Pre geodetov bude Galileo neoceniteľným pomocníkom
- Obr. 2.70 Galileo a SoLS
- Obr. 2.71 Galileo pre spektrum dopravy
- Obr. 2.72 BeiDou
- Obr. 2.73 Geostacionárny satelit BeiDou-2A
- Obr. 2.74 Architektúra GPS a Compass.
- Obr. 2.75 Trajektórie navigačných satelitov BeiDou-1 (A) a BeiDou-2/COMPASS a QZSS-1 (B)

- Obr. 3.1 Schéma architektúry SBAS
- Obr. 3.2 Geografické rozmiestnenie a dosah niektorých SBAS v rôznych interpretáciách (A,B,C)
- Obr. 3.3 Celosvetové pokrytie SBAS
- Obr. 3.4 Quasi-Zenith Satellite System (Japonsko); orbity satelitov
- Obr. 3.5 Rôzne schémy architektúry IRNSS
- Obr. 3.6 Architektúra WAAS
- Obr. 3.7 Architektúra EGNOS
- Obr. 3.8 Mapa pozemných staníc EGNOS
- Obr. 3.9 Architektúra MSAS
- Obr. 3.10 Architektúra GAGAN
- Obr. 3.11 Architektúra SDCM
- Obr. 3.12 Sieť referenčných staníc SDCM
- Obr. 3.13 Pokrytie Kanady službou DGPS z GPS-C/CWAAS
- Obr. 3.14 EGNOS pre AFI
- Obr. 3.15 SBAS pre Karibik, južnú a strednú Ameriku
- Tab. 1.1 Dôležité míľniky v začiatkoch kozmonautiky bývalého Sovietskeho zväzu (ZSSR)
- Tab. 2.1 Prehľad GNSS
- Tab. 2.2 Prehľad histórie GPS (1973-1995)
- Tab. 2.3 Prehľad dát letu KAL 007
- Tab. 2.4 Prehľad počtu a typov satelitov GPS
- Tab. 2.5 Zložky signálu GPS
- Tab. 2.6 Doba merania (pozorovania) u rýchlej statickej metódy GPS v závislosti od počtu satelitov
- Tab. 2.7 Zdroje a veľkosti chýb
- Tab. 2.8 Prehľad o kozmickom segmente GLONASS
- Tab. 2.9 Porovnanie GLONASS vs GPS v dátach (január 2015)
- Tab. 2.10 Pôvodný harmonogram programu Galileo
- Tab. 2.11 Charakteristiky signálov satelitov BeiDou-1

Zoznam skratiek

AFB	Air Force Base
AFI	Afrika a región Indického oceánu
AFP	Agence France-Presse
AAI	Airports Authority of India
angl.	anglický(á)(é), anglicky
a pod.	a pod.
AS	Anti-Spoofing
atď.	a tak ďalej
B	latitude
BODC	Boeing Satellite Development Center
BMCS	Backup Master Control Station
BNSS	Beidou Navigation Satellite System
C/A	Coarse Acquisition
cca	zhruba, približne
CACS	Canadian Active Control System
CDMA	Code Division Multiple Access
CEP	Circular Error Probable
CIGNET	Cooperative International GPS Network
cm	centimeter
COCESNA	Corporación Centroamerica de Servicios de Navegación Aérea
CS	Commercial Service
čes.	český(á)(é), česky
čin.	čínsky(á)(é), čínsky
DC	Distance correction
DGPS	Differential Global Positioning System
DOP	Dilution Of Precision
EFC	Electronic Factice Cautioning
EGM96	Earth Gravitational Model 1996
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EIB	Európska investičná banka
EK	Európska komisia
EOC	Early Operational Capability
ESA	Európska vesmírna agentúra
ERIS	External Region Integrity Systems
ETRS89	European Terrestrial Reference System 1989
EÚ	Európska Únia
EUREF TWG	European Reference Frame Technical Working Group
EUROCONTROL	European Organisation for the Safety of Air Navigation
F	Follow on Group
FAA	Federal Aviation Administration
FIG	Fédération Internationale des Géomètres
FOC	Full Operational Capability
fran.	francúzsky(a)(e)
GAGAN	GPS-Aided GEO Augmented Navigation System
GCS	Ground Control Segment

GEO	Geostationary Orbit
GHz	gigahertz
GIOVE	Galileo In-Orbit Validation Element
GIS	Geographical Information Systems
GJU	Galileo Joint Undertaking
GLONASS	GLObalnaja NAVigacionnaja Sputnikovaja Sistema
GLONASST	GLONASS Time
GMS	Ground Mission Segment
GMT	Greenwich Mean Time
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
GPS-C	Global Positioning System Correction
GS	Geodetická sieť
GSA	Galileo Supervising Authority
GSO	Geosynchronous Orbit
GSS	Galileo Sensor Stations
HEO	Highly Elliptical Orbit
hod.	hodina
Hz	hertz
IAT	International Atomic Time
ICAO	International Civil Aviation Organization
IF	Integrity Flag
IM	Integrity Messages
IMO	International Marine Organization
IOC	Initial Operational Capability
ION	Institute of Navigation
IPF	Integrity Processing Function
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
IT	Integrity Tables
ITM	International Time Service
ITRS	International Terrestrial Reference System
JPO	Joint Program Office
kap.	kapitola
kg	kilogram
km	kilometer
KOM	Komisia euopských spoločenstiev
kt/kn	námorný uzol (knot)
L	longitude
LEOP	Launch and Early Orbit Phase
LORAN	LOng RANge Navigation
m	meter
mm	milimeter
MCC	Master Control Clock
MCS	Master Control Station
MEO	Medium Earth Orbit
MHz	megahertz
mi	míľa
min.	minúta
MS	Monitoring Station

MSAS	Multi-Functional Satellite Augmentation System
MSAT	Mobile Satellites
msek.	milisekunda
MULS	Mission Up-Link Stations
N	Ambiguity
napr.	napríklad
NM	námorná míľa
NRCan	Natural Resources Canada
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NAVSAT	Navy Navigation Satellite System
NAVSTAR	NAVigation Signal for Timing And Ranging
NDS	Navigation Development Satellites
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
NNSS	Navy Navigation Satellite System
NOAA	(US) National Oceanic and Atmospheric Administration
NRCan	Natural Resources Canada
nsek.	nanosekunda
NTS	Navigation Technological Satellites
NWS	(US) National Weather Service
obr.	obrázok
OD&TS	Orbitography Determination and Time Synchronisation
OS	Open Service
OTF	On The Fly
P	Precise
PCMCIA	PC card Computer Memory International Association
PDA	Personal Digital Assistant
PLGR	Precision Lightweight GPS Receiver
p.n.l.	pred našim letopočtom
port.	portugalský(á)(é), portugalsky
ppm	parts per million
PPS	Precise Positioning Service
PRN	Pseudo Random Noise
pr.n.l.	pred našim letopočtom
PRS	Public Regulated Service
PZ 90	Paremtri Zemli 1990
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
R	Replacement Operational Satellites
RDRS	Radio Detection and Ranging Systems
resp.	respektíve
RF	Ruská federácia
RKK Energija	Raketno-kosmičeskaja korporacija Energija im. S. P. Korol'ova
RSESB	Radionavigation Satellite Earth-to-Space Band
RTK	Real Time Kinematic
RTSWS	Real Time Solar Wind System
rus.	ruský(á)(é), rusky
S	satelit (satellite)
SA	Selective Availability
SACCSA	Solución de Aumentación para Caribe, Centro y Sudamérica

SBAS	Satellite-Based Augmentation Systems
SBAS AFI	SBAS for Africa-Indian Ocean Region
SDCM	System for Differential Correction and Monitoring
SECOR	Sequential Collation of Range
sek.	sekunda
SELČ	Stredoeurópsky letný čas
SEP	Spherical Error Probable
SISA	Signal-in-Space Accuracy
SESAR	Single European Sky ATM Research
SITA	Slovenská tlačová agentúra
S-JTSK	Systém jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej
SKPOS	Slovenská priestorová observačná služba
SLR	Satellite Laser Ranging
slov.	slovenský(á)(é), slovensky
SMS	Short Message Service
SNAS	Satellite Navigation Augmentation System
SoLS	Safety of Life Service
SOS	medzinárodné volanie o pomoc na mori
SPS	Standard Positioning Service
SR	Slovenská republika
SSS	Solar System Service
ST	štandardná presnosť (točnosť)
stor.	storočie
špan.	španielsky(a)(e)
TA	Time-to-Alert
TAAF	Terres Australes et Antarctiques Françaises
tab.	tabuľka
t.č.	toho času
t.j.	to je; to jest
TDOA	Time Difference Of Arrival
TGPS	Time GPS
TIMATION	TIME/navigATION
TT&C	Tracing, Telemetry and Command
tzn.	to znamená
tzv.	tak zvaný
UHF	Ultra High Frequency
UKV	ultra krátke vlny
USA	United States of America
USAF	United States Air Force
USD	United States Dollar
USN	United States Navy
USNMS	US National Meteorological Service
UT	Universal Time
UTC	Coordinated Universal Time
VLBI	Very Long Baselines Interferometry
vs	versus
VT	vysoká presnosť (točnosť)
WAAS	Wide Area Augmentation Systém
WGS 84	World Geodetic System 1984



WAGE	Wide Area GPS Enhancement
ZSSR	Zväz sovietskych socialistických republík
2D	dvoj-dimenzionálny
3D	troj-dimenzionálny

Názov: **Globálne navigačné satelitné systémy**
Vysokoškolský učebný text

Autor: prof. Ing. Vladimír Sedlák, PhD.
Vydavateľ: Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach
Umiestnenie: www.unibook.upjs.sk
Rok vydania: 2017
Dostupné od: december 2017
Počet strán: 157
Vydanie: prvé
AH: 11

ISBN: 978-80-8152-554-4