

Družicové lokalizační systémy

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Čupera, Ph.D.

Vypracoval:

David Lemon

Brno 2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci: **Družicové lokalizační systémy** vypracoval/a samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom/a, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 Autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity o tom, že předmetná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne 30.1.2017

Rád bych na tomto místě poděkoval doc. Jiřímu Čuperovi, Ph.D. za odborné vedení při vypracování bakalářské práce a za zapůjčení informačních materiálů. Dále bych chtěl poděkovat Mendelově univerzitě v Brně za poskytnutí zázemí a strojních zařízení. Současně děkuji rodině a kamarádům za poskytnutí podpory během studia.

Abstrakt

Lemon, D. Družicové lokalizační systémy. Bakalářská práce. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2017.

Bakalářská práce poskytuje náhled do problematiky GPS systémů a podrobněji se zaměřuje na GPS systémy NAVSTAR, GLONASS, Galileo a BeiDou-Compass. V práci lze nalézt popis jednotlivých systémů, jejich historii a aktuální stav. Dále je proveden a vyhodnocen experiment za účelem ověření vhodnosti využití GPS jako alternativního způsobu stanovení skutečné rychlosti pro účely dalších výpočtů.

Satelitní navigační systémy, navigace, GPS, GNSS, navstar, glonass, beidou, compass, galileo, geocaching, geoinformatika

Abstract

Lemon, D. Satellite positioning systems. Bachelor thesis. Brno: Mendel University in Brno, 2017.

Bachelor thesis provides insight into GPS systems and the description is more focusing on the NAVSTAR GPS, GLONASS, Galileo and Beidou-Compass. In thesis you can find description of the individual systems, their history and current status. Next there is done and evaluated experiment to verify the appropriateness of using GPS as alternative method of determining the actual speed for further calculations.

Keywords

Satellite positioning systems, navigation, GPS, GNSS, navstar, glonass, beidou, compass, galileo, geocaching, geoinformatics

Obsah

1	Úvod	12
2	Cíle bakalářské práce	13
2.1	Cíle teoretické části práce	13
2.2	Cíle praktické části práce	13
3	Materiály a metodika práce	14
4	Teoretická část práce	15
4.1	Družicový navigační systém NAVSTAR	15
4.1.1	Historie.....	15
4.1.2	Současnost	15
4.1.3	Princip	16
4.1.4	Kosmický subsystém.....	16
4.1.5	Řídící subsystém.....	18
4.1.6	Uživatelský subsystém.....	19
4.1.7	Signály vysílané družicemi	21
4.1.8	C/A kód	21
4.1.9	P(Y) kód	21
4.1.10	M kód.....	22
4.1.11	Navigační zpráva	23
4.2	GLONASS.....	26
4.2.1	Kosmický subsystém.....	26
4.2.2	Řídící subsystém.....	29
4.2.3	Uživatelský subsystém.....	30
4.3	Galileo	32
4.3.1	Fáze projektu	32
4.3.2	Infrastruktura.....	33

4.3.3	Služby.....	34
4.4	BeiDou-Compass.....	35
4.4.1	Vesmírný subsystém.....	35
4.4.2	Řídící a uživatelský subsystém	37
5	Praktická část a výsledky práce	39
5.1	Měřicí ústředna.....	40
5.2	Protokol NMEA 0183	43
5.2.1	Formát zprávy	43
5.3	Metodika měření	45
5.3.1	LabVIEW	45
5.4	Interpretace výsledků.....	46
6	Diskuse	49
7	Závěr	50
8	Seznam použité literatury	51

Seznam obrázků

Obr. 1	Rozdělení GPS na subsystemy (WordPress.com, 2016)	16
Obr. 2	Konstelace 24-satelitového systému GPS (GPS.gov, 2016a)	17
Obr. 3	Přehled aktivních bloků satelitů GPS (GPS.gov, 2016a)	18
Obr. 4	Rozmístění řídicích prvků GPS na mapě (GPS.gov, 2016b)	19
Obr. 5	Přehled frekvenčního spektra používaných GPS signálů (Worldwide Vertical Guidance of Aircraft Based on Modernized GPS and New Integrity Augmentations, 2008)	23
Obr. 6	Struktura rámce navigační zprávy	24
Obr. 7	Konstelace satelitů systému GLONASS (Navipedia, 2014)	27
Obr. 8	Znázornění významných středisek řídicího subsystemu na ruském území (Navipedia, 2011)	30
Obr. 9	Ruční GPS GARMIN GPSMAP 64 PRO (garmin.cz, 2009-2013)	31
Obr. 10	Konstelace GNSS Galileo (Sickle, 2016)	33
Obr. 11	Konstelace BeiDou (Sickle, 2016)	36
Obr. 12	Oblast pokrytí GPS BeiDou (Sensors, 2013)	38
Obr. 13	Zkouška traktoru John Deere 8320 (Čupera, 2016)	39
Obr. 14	Systém CompactRio (ni.com, 2016)	42
Obr. 15	GPS přijímač Garmin 18x - 5 Hz umístěný na kapotě traktoru John Deere (Čupera, 2016)	43
Obr. 16	Část algoritmu NMEA použitá pro měření (Čupera, 2016)	44

Obr. 17	Maska programu pro záznam dat z traktorů i GPS (Čupera, 2016)	46
Obr. 18	Výsledky měření – srovnání rychlosti naměřené GPS s radarovou rychlostí	47
Obr. 19	Graf průběhu rychlostí v agregaci s kombinovaným kypřičem	48

Seznam tabulek

Tab. 1	Přehled vývoje generací družic GLONASS	28
Tab. 2	Stav družic GPS BeiDou k prosinci 2016 (MGEX, 2016)	37
Tab. 3	Vybrané základní údaje uváděné výrobcem.	40
Tab. 4	Popis dat v použité NMEA větě	45
Tab. 5	Základní statistické vyhodnocení měření v tahových zkouškách	47

1 Úvod

Už od dob Kryštofa Kolumba, slavného mořeplavce, mělo lidstvo potřebu mapovat svět okolo sebe, nalézat lepší obchodní cesty a objevovat nová místa. Své poznatky pak různí průzkumníci zakreslovali do map. Od vzniku technologií však doba velmi pokročila a Země je dnes již kompletně zmapovaná, pokud tedy nepočítáme nedostupná místa, např. jeskyně, mořské dno apod. Samotná země však člověku dlouho nestačila, dalším krokem se logicky stalo dobývání nebe a posléze vesmíru. Prvnímu člověku se to podařilo v roce 1961, kdy obletěl Zemi a po 108 minutách přistál bezpečně na zemském povrchu. Od té doby vývoj pokročil již takovým způsobem, že Zemi obíhá desetitisíce umělých objektů. Velká část z nich je naneštěstí odpad po zaniklých vesmírných tělesech, jako jsou zbytky raket a satelitů.

Tisíce těchto umělých satelitů a družic obíhá pravidelně Zemi po svých drahách a poskytuje nám nepřeberné množství služeb, např. televizi, internet, předpovědi počasí a navigaci. Tato práce se bude věnovat družicovým lokalizačním systémům, anglicky GPS (Global Positioning System). Tyto satelity slouží k určování aktuální polohy objektu na libovolném místě na zemské kouli pomocí jednoduchého radiového přijímače. Polohou není myšleno pouze určení souřadnic východní či západní délky a jižní či severní šířky, ale také nadmořské výšky objektu. Bez této technologie si dnes již nedokážeme představit dopravní a zásobovací infrastrukturu, ale ani koordinaci armád. Funkce GPS využívá námořní, letecká i automobilová doprava. Dnes je navíc bezplatná navigace obsažena téměř v každém chytrém telefonu. Družicové polohové systémy však nemají uplatnění jenom v dopravě, jejich využití má mnoho dalších podob, zabývá se jimi celé odvětví geoinformatiky.

Postupně budete seznámeni s principy lokalizačních systémů využívajících družic, jak fungují a jakým způsobem se využívají v dopravě. Dnes jsou k dispozici 4 různé typy lokalizačních systémů, které budou následně popsány. Jedná se o systémy NAVSTAR, GLONASS, BeiDou-Compass a Galileo. V praktické části bude navržena metodika určení difference rychlosti stanovená systémem GPS a způsobem jiného technického prostředku. Experimentální část byla řešena v souvislosti s tahovými zkouškami traktoru, kdy rychlost činí jednu z hlavních proměnných pro výpočet tahového výkonu traktoru. Navržená metodika následně bude využita v experimentu v běžném provozu, výsledky se analyzují a graficky znázorní.

2 Cíle bakalářské práce

Ověření vhodnosti využití získávání polohy pomocí GPS v zemědělství ve vztahu k stanovení skutečné rychlosti zemědělských strojů pro účely dalších výpočtů.

2.1 Cíle teoretické části práce

Popsat a vysvětlit základní typy systémů NAVSTAR, GLONASS, BeiDou-Compass a Galileo. Každému systému je věnována podrobná kapitola, kde se probírá jejich historie, funkce a technické parametry.

2.2 Cíle praktické části práce

Navržení způsobu získávání dat o rychlosti ze systému GPS a použití navržené metodiky pro experiment zkoušení tahových vlastností traktorů. Systém pro sledování GPS bude umístěn v tažném prostředku, tedy traktoru. Smyslem realizace této zkoušky je ověření vhodného alternativního způsobu stanovení skutečné rychlosti k mnoha dalším účelům a výpočtům, např. stanovení prokluzu, ztrátového výkonu, celkové výkonové bilanci atp. Výsledky z provedeného experimentu budou znázorněny v přehledných grafech.

3 Materiály a metodika práce

Tato bakalářská práce bude rozdělena na dvě části. V první části, teoretické, budou srovnány a popsány jednotlivé druhy dostupných a nejrozšířenějších globálních navigačních systémů. Každému z jednotlivých GPS systému bude věnována samostatná kapitola, kde bude popsán jejich vývoj, vlastnosti a aktuální stav. Materiálem teoretické části jsou odborné publikace a vědecké články. Z online zdrojů jsou použity zejména oficiální internetové stránky zřizovatelů jednotlivých GPS nebo státních organizací.

V praktické části bude proveden experiment, kdy bude GPS zařízení umístěno na vozidle a pomocí měřicí stanice budou sbírána data. Data budou vyhodnocena a interpretována pomocí přehledných grafů, z kterých bude vyvozen závěr. Materiálem praktické části jsou zařízení a prostředky poskytnuté Mendelovou univerzitou pod odborným dozorem doc. Čupeřy.

4 Teoretická část práce

4.1 Družicový navigační systém NAVSTAR

4.1.1 Historie

Idea družicových navigačních systému začala vznikat v roce 1960, kdy Námořnictvo USA (US-NAVY) provádělo experimenty s navigací pro sledování ponorek s jadernými hlavicemi a řízení balistických střel pomocí radiových signálů ze satelitů. Základní model sestával z šesti satelitů na orbitu pólů, ponorky pak byly schopné pomocí radiových signálů a jejich změn ve vztahu k pozici družic určit v řádu několika minut svoji polohu. Tento systém se nazýval TRANSIT a v roce 1964 byl uvolněn i pro civilní použití, později jej využívali například majitelé jachet pro navigaci na moři. Tento systém byl ještě velmi odlišný od současné GPS, jeho provoz byl pak ukončen v roce 1996 (Rapant, 2005).

Na začátku roku 1970 chtělo Ministerstvo obrany USA zaručit, aby byla k dispozici robustní a stabilní satelitní navigace. Už dříve se o vytvoření navigačního systému pokoušelo americké námořnictvo, a tak se ministerstvo obrany rozhodlo svou ideu stavět na jejich systému. První družice nového systému se začaly nasazovat v roce 1976 a vznikl tak první Navigační systém s měřením a časováním, zkráceně NAVSTAR z anglického názvu „Navigation System with Timing and Ranging“. Systém složený z 24 družic se pak stal plně funkční v roce 1993. První velký test GPS probíhal během války v Perském zálivu v roce 1990-1991, kde tehdy 16 satelitů pomáhalo řídit operace amerických a spojeneckých vojsk s přesností na 30 m. Od roku 1993 pak chtěla americká vláda rozšířit GPS i mezi civilními uživateli, nicméně z bezpečnostních důvodů byl signál pro civilní terminály narušen záměrnou systematickou chybou. Tato chyba měla bránit zneužití proti USA a omezovala přesnost určení polohy na 100 metrů. Brzy se však ukázalo, že pro dané využití byla takováto umělá nepřesnost nepřiměřená a v roce 2000 byla zrušena (Rapant, 2005).

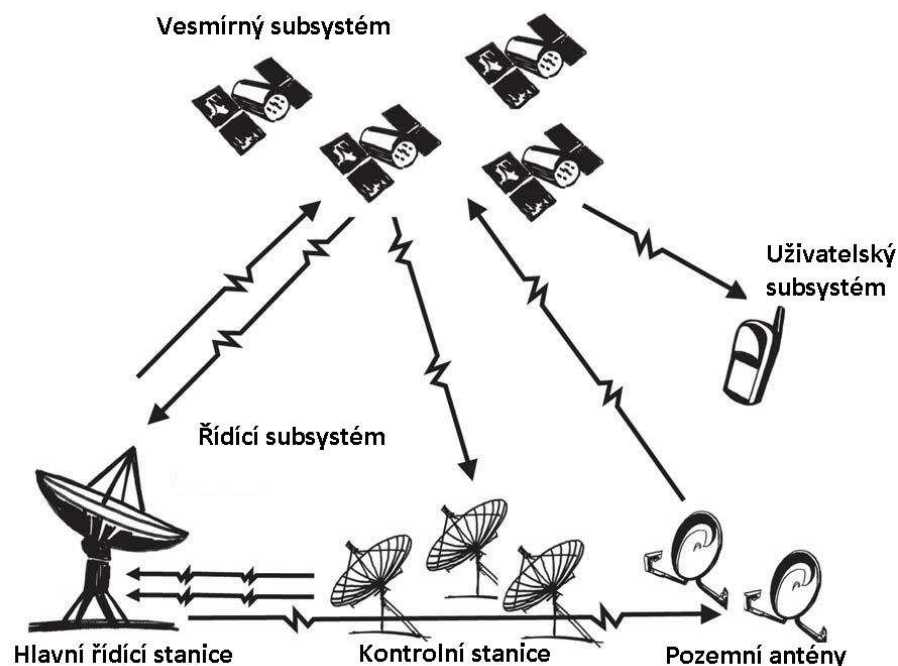
4.1.2 Současnost

V únoru 2016 byla nasazena finální část družic bloku IIF, který nahrazuje a doplňuje bloky předchozích generací. Konečně je tak systém připraven na vypuštění bloku III, který má být nejmodernější a bude obsahovat 32 satelitů. Vypuštění tohoto

bloku však doprovázejí neustále odklady a již několikrát byl odložen. První satelity v sérii měly vypuštění naplánováno na rok 2014. Poslední oficiální spuštění III. bloku je ohlášeno na květen 2017 (NASA, 2016a).

4.1.3 Princip

Satelitní navigační systém (GPS) je technologie vlastněná a patentovaná vládou USA. GPS je řízena a udržována letectvem USA. Poskytuje určení pozice, navigaci a časové služby (PNT). Je provozována neustále a je celosvětově rozšířena. Její uživatelé se dělí na civilní a vojenské. Vojenští uživatelé jsou Armáda USA a jejich spojenci, tito uživatelé využívají plně funkce současných technologií a disponují zařízeními s největší přesností. Současně se také USA zavázalo, že bude udržovat alespoň 24 GPS satelitů v provozu po 95 % času. Pro lepší pochopení je vhodné si celý systém rozdělit na 3 subsystémy: kosmický, řídicí a uživatelský (Rapant, 2005).

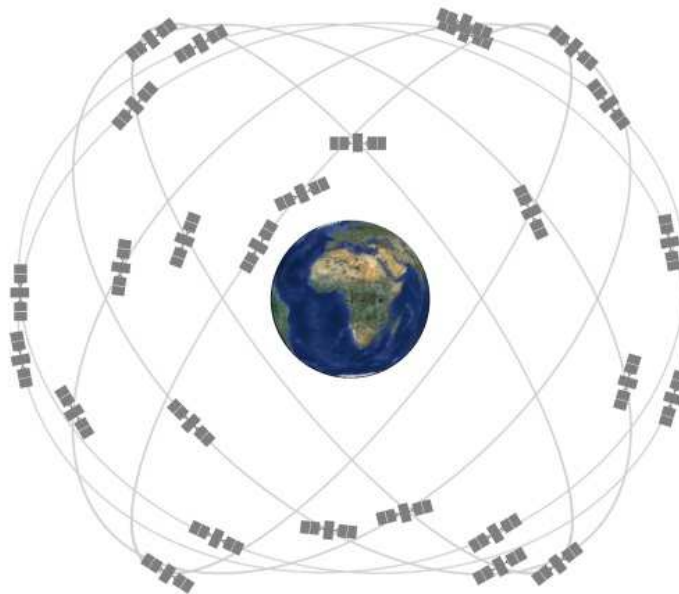


Obr. 1 Rozdělení GPS na subsystémy (WordPress.com, 2016)

4.1.4 Kosmický subsystém

Kosmický subsystém je tvořen 31 funkčními satelity (U.S. Coast Guard Navigation Center, 2016) rozmístěnými na šesti oběžných drahách ve výšce přibližně 20,2 tis.

km. Sklon oběžných drah k rovníku je 55° a mezi sebou jsou vzájemně posunuty o 60° . Každý ze satelitů obíhá Zemi dvakrát denně, jejich oběžná doba je 11 hodin a 58 minut. Systém je navržen, aby z libovolného místa na Zemi šlo přijímat signál alespoň z šesti družic, podmínkou je však viditelnost oblohy. K určení přesné polohy ve třech rozměrech je potřeba dostupnost signálu alespoň čtyř z nich, v menším počtu již nejde polohu stanovit. Mezi vybavení GPS satelitů patří radiový přijímač, radiový vysílač a cesiové atomové hodiny, všechny tyto věci jsou nezbytné pro určování polohy. Satelit je také vybaven mnoha dalšími technickými zařízeními, např. pro detekci jaderných výbuchů. Družice neustále přijímá, zaznamenává a zpracovává data vyslané z řídicího střediska, díky kterým koriguje svoji pozici na orbitě. Součástí jejich mechaniky je vlastní detekční systém podávající nepřetržitě informace o jejich stavu zpět řídicímu středisku (Rapant, 2005).




Obr. 2 Konstelace 24-satelitového systému GPS (GPS.gov, 2016a)

Jednotlivé druhy GPS satelitů byly na své oběžné dráhy nasazovány postupně od roku 1978 v tzv. blocích, každý tento blok pak nese své označení. V současné době stojí za zmínku už pouze aktivní bloky *IIR*, *IIR (M)*, *IIF* a *III* (GPS.gov: Space Segment, 2016a).

- Blok I – vývojové navigační satelity, 11 navigačních satelitů, hmotnost 845 kg
- Blok II a IIA – operační satelity, 28 satelitů, hmotnost okolo 1 500 kg
- Blok IIR – náhradní operační satelity, hmotnost okolo 2 000 kg

- Blok IIR(M) – modernizované satelity, 8 satelitů
- Blok IIF – pokračování operačních satelitů
- Blok III – nejnovější generace satelitů, nasazení 2016-2017

Staré satelity		Modernizované satelity		
				
BLOK IIA	BLOK IIR	BLOK IIR(M)	BLOK IIF	GPS III
0 V provozu	12 V provozu	7 V provozu	12 V provozu	Ve výrobě
- spuštěny 1990-1997	- spuštěny 1997-2007	- spuštěny 2005-2009	- spuštěny 2010-2016	- spuštěny od 2016
- poslední vyřazena v roce 2016	- životnost 7,5 let	- životnost 7,5 let	- životnost 12 let	- životnost 15 let
- C/A na pásmu L1 - P/Y na pásmu L1 a L2	- C/A na pásmu L1 - P/Y na pásmu L1 a L2	- kódy předešlých gen. - 2. civilní signál na L2 - vojenský M signál	- kódy bloku IIR(M) - 3. civilní signál na L5	- kódy bloku IIF - 4. civilní signál na L1

Obr. 3 Přehled aktivních bloků satelitů GPS (GPS.gov, 2016a)

4.1.5 Řídicí subsystém

Řídicí subsystém tvoří hlavní řídicí stanice (MCS), záložní řídicí stanice, 11 řídicích a pozemních antén a 15 monitorovacích stanic. Rozložení jednotlivých pozemních stanic je znázorněno na Obr. 4.

Úlohou **hlavní řídicí stanice** je sledování drah družic na orbitě a stavu jejich atomových hodin. Řízení se musí starat o provádění korekcí v jejich drahách, vysílaném signálu i o synchronizaci atomových hodin. Mezi další zodpovědnosti řídicího segmentu patří např. různá provozní opatření, jako je management nasazených družic, stahování vysloužilých satelitů a nasazování satelitů nových.

Monitorovací stanice slouží ke sledování viditelných GPS satelitů, jak prolétají nad stanicí, jednotlivá pozorování pak posílají hlavní řídicí stanici. Monitorovací stanice sbírají atmosférická data, vzdálenosti družic a navigační signály. Na stanicích jsou instalovány velmi výkonné přijímače GPS, které jsou řízeny MCS.

Pozemní antény slouží ke komunikaci se satelity GPS, jejich primární funkcí je vysílání a přijímání řídicích a kontrolních signálů. K těmto účelům používají ra-

diové mikrovlnné signály o frekvenci 2-4 GHz. Pozemní antény jsou také zodpovědné za sjednocování řídicích signálů dle předepsaných norem (GPS.gov: Control Segment, 2016b).

Řídicí subsystém GPS



Obr. 4 Rozmístění řídicích prvků GPS na mapě (GPS.gov, 2016b)

4.1.6 Uživatelský subsystém

Uživatelský subsystém se skládá z jednotlivých uživatelských přijímačů, které nám umožňují přijímat a dekódovat signály z družic. Dnes už existuje mnoho typů a velikostí uživatelských přijímačů v závislosti na požadavcích uživatele. Uživatelský GPS přijímač se skládá z antény, procesoru přijímače a velmi stabilních hodin. Procesor zpracovává přijímaná data a z nich určuje polohu a synchronizuje čas. Přijímače jsou vyrobeny jako pasivní zařízení schopná data pouze přijímat. Takto byly navrženy zejména z důvodu, aby je nešlo zaměřit nepřitelem. Civilní přijímače mají pevně nastavená omezení na výšku do 18 km a rychlost do 515 ms^{-1} . Tyto limity slouží jako prevence před zneužitím pro systémy orientace v prostoru u balistických raket, střel s plochou dráhou letu a podobných zařízení. Kvalitu nebo výkon GPS přijímače můžeme hodnotit podle počtu kanálů, které dokáže současně přijímat. Na každý kanál je pak možné mít připojenou 1 družici. Dnes jsou standardem zařízení schopná zpracovávat 12 až 20 kanálů. Lepší GPS přijímače jsou vybaveny

portem pro komunikaci s počítačem, přes který se většinou importují a exportují mapové podklady (Český kosmický portál, 2015a).

Pro minimální funkci je potřeba přijímat signál z 3 družic, s více družicemi pak přesnost zařízení stoupá. Uživatelský přijímač si svoji pozici určuje výpočtem na základě měření vzdálenosti od družice GPS. Poloha jednotlivých satelitů je známá informace, je součástí tzv. navigační zprávy¹, kterou satelit odesílá. Družice do každého vyslaného signálu připojuje informaci o čase, kdy jej vyslala (t_0). Uživatelský GPS přijímač obdrží data v čase t_1 . Přijímač pak jednotlivé časy odečte a zjistí čas, který byl potřebný pro doručení signálu z družice do přijímače $t = t_1 - t_0$. Tento čas se pak vynásobí rychlostí světla c (rychlost signálu), a získáme tak vzdálenost uživatele r_n od družice n ($n=1$) (Rapant, 2005).

$$r_1 = c \cdot (t_1 - t_0) \quad (1)$$

Pro výpočet polohy se pak sestaví 3 jednoduché rovnice o třech neznámých a matematickým postupem je vypočítáme, tyto výpočty samozřejmě provádí procesor GPS přijímače v reálném čase.

Problém však nastává u přesnosti atomových hodin družice, ty jsou totiž výrazně přesnější než hodiny v uživatelském zařízení a vzniká tak odchylka. Pro eliminaci odchylky se používá čtvrtá družice, která slouží právě k výpočtu tohoto rozdílu. Pro výpočet polohy přijímače v souřadnicích x , y , z potřebujeme tedy 4 družice ($n=1,2,3,4$). Souřadnice n -tého satelitu si pak označíme jako x_n , y_n , z_n . Čas t_n je doba šíření radiového signálu od n -tého satelitu k přijímači. Δt pak značíme odchylku přijímače od systémového času družice. Pro výpočet polohy přijímače pak použijeme vztah (Kučera, 2013)

$$r_n = (\sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + (z - z_n)^2}) = c \cdot (t_n - \Delta t) \quad (2)$$

Z tohoto vztahu jsme získali soustavu čtyř rovnic pro 4 neznámé x , y , z a Δt .

Údaje Δt pak slouží k synchronizaci hodin přijímače s družicí. Pro běžného uživatele se přesnost GPS pohybuje v rozmezí 5-10 m, u geografických přístrojů lze dosáhnout přesnosti v centimetrech.

¹ Datová zpráva přenášená signály vysílanými družicemi.

4.1.7 Signály vysílané družicemi

Družice vysílají a přijímají signály přes radiovou technologii. Každý signál je kombinací nosné vlny (rádio), dálkoměrného kódu a navigační zprávy. Pro GPS družice je vyhrazeno celkem 5 pásem. Tyto pásma jsou zvolena s ohledem na meteorologické vlivy a rušení, které by mohly způsobovat. Jejich označení je následující (Rapant, 2005):

- L1 (1575.42 MHz), kde je vysílán C/A kód, P(Y) kód, M kód
- L2 (1227.60 MHz), kde je vysílán P(Y) kód, M kód, C kód
- L3 (1381.05 MHz), signály pro detekci a monitorování startu balistických raket, vysokoenergetických zdrojů a jaderných výbuchů
- L4 (1379.913 MHz), signál pro měření ionosférické refrakce²
- L5 (1176.45 MHz), signál SoL (z aj. Safety of Life), součást mezinárodně chráněné oblasti letecké navigace

4.1.8 C/A kód

Zkráceno z aj. Coarse/Acquisition, dále se také nazývá jako hrubý/dostupný kód, který není šifrovaný, umožňuje široké využití bez nutnosti autorizace. Tento kód je běžně dostupný pro civilní aplikace, používá se civilními přijímači jako základní signál pro standartní navigační a polohovou službu.

Signál je kódován v binární soustavě a má 1023 znaků, svojí charakteristikou připomíná tzv. šum (PRN kód z náhodných jedniček a nul). Posloupnost C/A kódu oproti PRN není náhodná a je jednoznačně definovaná. Každá družice má svůj unikátní kód, dle kterého je lze identifikovat. Je vysílán frekvencí 1,023 MHz, signál se opakuje každou milisekundu. Moduluje nosnou frekvenci L1, je pak rozprostřený v pásmu širokém 2,046 MHz.

4.1.9 P(Y) kód

Využití kódu P (z aj. Protected) je vyhrazeno pouze autorizovaným uživatelům, ozbrojeným složkám USA a jejich spojencům. Opět se jedná o kód podobný PRN

² Změna rychlosti šíření radiových vln při průchodu ionosférou. Slouží ke korekci chyby určení polohy způsobené zpožděním radiového signálu. Ionosféra je ionizovaná část atmosféry významně ovlivňující šíření elektromagnetických signálů.

kódu. Má desetkrát vyšší rychlost jak C/A kód, je vysílán frekvencí 10,23 MHz a je rozprostřen v širším pásmu, opakuje se každých 7 dní. Moduluje obě nosné frekvence L1 i L2, díky této dvojnásobné modulaci je výrazně přesnější. Modulace na dvou vlnách výrazně omezuje vliv refrakce radiových vln v ionosféře a troposféře³.

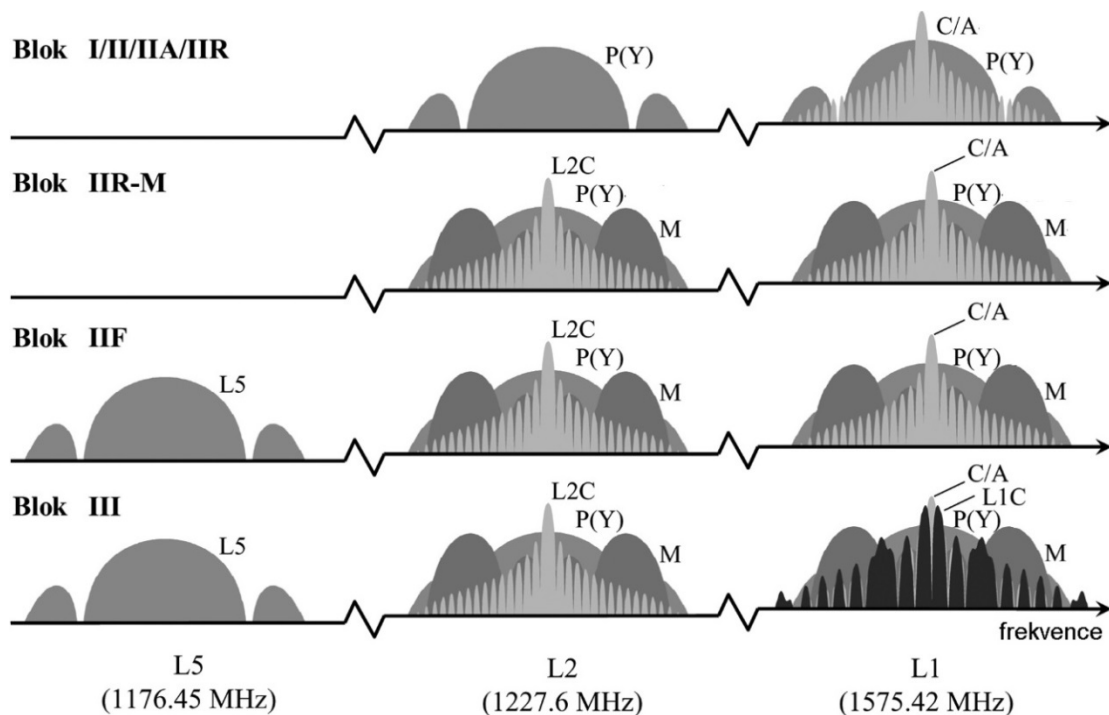
Y-kód je šifrovaný P kód pomocí kryptografického klíče, tento klíč je tajný a mají jej pouze autorizované přístroje, většinou se jedná o armádu. Tento kód je vysílán prakticky nepřetržitě.

4.1.10 M kód

Jedná se o modernizovaný vojenský kód vycházející z P(Y) kódu, má pokročilejší ochranu proti rušení a zabezpečení. Vysílá se na frekvencích L1 i L2, je navržen tak, aby se jeho signál moduloval na okrajích spektra nosných vln, mimo pásmo signálů C/A a P(Y). M kód je autonomní, autorizovaný uživatel k určení svojí polohy potřebuje pouze signál v M kódu. Při použití P(Y) kódu bylo navíc ještě vyžadováno komunikace s C/A kódem.

Kód M je připraven na použití směrové antény. Na aktuálních generacích družic (obr. 3) jsou širokopásmové antény, které vysílají signál na celou polokouli. Směrová anténa vysílá v paprsku zaměřeném na konkrétní místo na Zemi o velikosti několika stovek kilometrů. Můžeme lehce srovnat na příkladu svitu laserového ukazovátka a klasické žárovky. Díky směrování na jeden bod bude signál zesílený o 20dB (10× amplituda, 100× výkon). Směrové antény budou umístěny na družicích generace III, které jsou plánovány od roku 2016 (Proceedings of the IEEE, roč. 96, č. 12, 2008).

³ Troposféra je část atmosféry od zemského povrchu rozdělená podle změny teplotního gradientu. Rozmezí teplot od spodního okraje k hornímu je od 17°C až do -52°C. V různých klimatických oblastech má různou výšku.



Obr. 5 Přehled frekvenčního spektra používaných GPS signálů (Worldwide Vertical Guidance of Aircraft Based on Modernized GPS and New Integrity Augmentations, 2008)

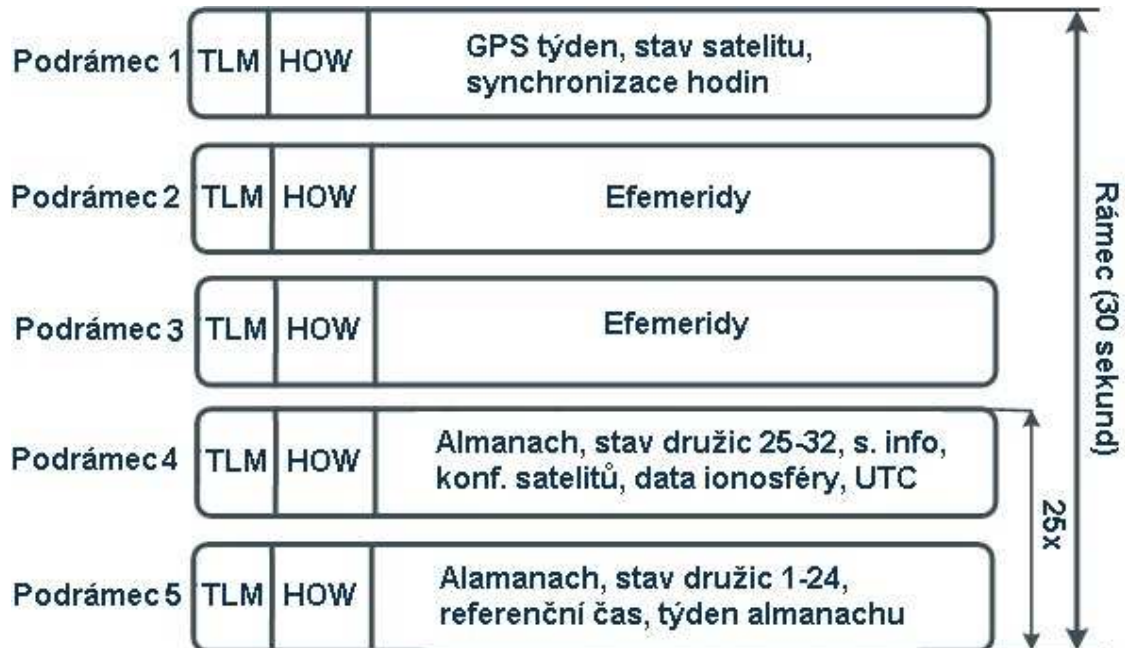
4.1.11 Navigační zpráva

Primární funkcí navigačních satelitních systémů je určení polohy vzdáleného uživatele, k určení přesné polohy GPS přijímače pak potřebujeme znát přesnou pozici satelitu v době vyslání dálkoměrného kódu a čas. Tyto informace se zjišťují z parametrů stavu družice obsažených v tzv. navigační zprávě (Rapant, 2005). Navigační zpráva by se dala charakterizovat jako užitečná data vysílaná družicí. Zpráva obsahuje:

- Parametry oběžné dráhy družice
- Almanach (informace o oběžných drahách ostatních družic)
- Údaje pro korekci času
- Koeficienty ionosférického modelu
- Stav družice

Navigační zpráva je generovaná na frekvenci 50 Hz, data se odesílají rychlostí 50 bit/s. Je přenášena společně s dálkoměrným kódem a její odeslání trvá 12,5 minuty. Skládá se z 25 rámců, každý trvá 30 sekund. Rámec obsahuje 1500 bitů rozdělených do 5 podrámčů po šesti sekundách (300 bitů). Podrámec se dělí na deset

slov. První a druhé slovo podrámece vždy obsahuje TLM (z aj. Telemetry) a HOW (z aj. HandOver Word). TLM slouží jako synchronizační slovo a obsahuje některé další synchronizační zprávy řídicí části. HOW slouží k identifikaci podrámece a obsahuje pořadí následujícího podrámece od počátku GPS týdne.



Obr. 6 Struktura rámce navigační zprávy

Stav satelitu – slouží jako informační služba o závadách na družici, zda ji lze ještě použít k určování polohy a v jakém rozsahu.

Almanach – obsahuje zjednodušené parametry oběžných drah všech družic v kosmickém subsystému a informace o jejich stavu. Přijímač, který zná aktuální almanach je schopen z těchto informací zjistit polohy ostatních viditelných družic a výrazně se tak snižuje doba potřebná pro zahájení určení polohy přijímačem.

Součástí almanachu jsou i **data ionosférického modelu**, které slouží ke kompenzaci nepřesnosti vzniklé průchodem signálu ionosférou. Pokud přijímač tyto data nemá, je výsledná nepřesnost určení polohy 2-3x větší.

V almanachu nalezneme i **referenční čas**. Jedná se o koeficienty sloužící k přepočtu mezi časovou základnou GPS systému a časovou škálou UTC⁴. Tyto informace jsou pro přijímač nezbytné, aby uváděl přesné časové údaje.

Efemeridy – předpovězené polohy a dráhy družic na oběžných drahách. Vlivem tíhových sil Země, Slunce a Měsíce a sluneční jaderné aktivity se však mírně mění, a proto jsou v pravidelných intervalech aktualizovány. Aby byli informace o drahách co nejpřesnější, jsou efemeridy platné maximálně 4 hodiny, jednotlivé přijímače pak mají pak nastaveno jejich stahování každé dvě hodiny.

⁴ UTC = Koordinovaný světový čas, je založen na atomových hodinách a odvozen od Mezinárodního atomového času TAI

4.2 GLONASS

Družicový navigační systém GLONASS je vyvíjený a řízený Ruskou federací, odpovědná řídicí organizace je Úřad ruských vojenských vesmírných sil. Jedná se o alternativu k americké GPS na poli technickém, v rozsahu poskytovaných služeb a v množství uživatelské základny. V současné době existují pouze dva plně funkční globální navigační systémy, NAVSTAR a GLONASS.

Počátky vývoje systému se datují do období SSSR, kdy v roce 1976 rozhodnutím komise komunistické strany byl schválen vývoj systému GLONASS. Jednalo se o odpověď Sovětského svazu na GPS NAVSTAR vyvíjenou Američany. První dvě testovací a jedna plnohodnotná družice byly vypuštěny na oběžnou dráhu v roce 1982. V roce 1991 pak bylo na oběžné dráze ve dvou rovinách celkem 12 družic, tento počet již stačil pro omezený provoz. Dosažení plné funkčnosti bylo plánováno na rok 1991, splnění plánu bylo oznámeno v roce 1993. Doopravdy však byl systém dokončen až v roce 1995 spuštěním konstelace 24 družic na oběžné dráze Země. Z politických a zejména ekonomických důvodů ve státě však systém po roce 1995 začal upadat, až zbylo v roce 2001 aktivních pouze šest družic. Na revitalizaci systému pak byl schválen vládou program „Globální navigační systém“, který se zavazoval zanedbaný systém postupně do roku 2011 obnovit a vyčlenila se na něj značná část finančního rozpočtu ruského vesmírného programu. Na prosazování tohoto programu intenzivně dohlížel prezident Vladimir Putin, přesto se financování nevyhnulo skandálu s korupcí. Z programu se ztratilo několik stovek milionů dolarů. Obnova pak byla dokončena v až roce 2012 (GLONASS History, 2016).

4.2.1 Kosmický subsystém

Vesmírná část je tvořena 27 satelity a 3 z nich slouží jako záložní (GLONASS constellation status, 2016). Plnohodnotná konstelace je tvořena 24 satelity. Systém potřebuje pro nepřetržité navigační služby alespoň 18 satelitů pro pokrytí ruského území a 24 pro 100% pokrytí celého světa. Pro srovnání, v roce 2008 měl systém s 18 satelity 94% pokrytí, v roce 2009 s 22 satelity 99,7% a v roce 2010 s 24 satelity již 99,99% pokrytí povrchu zemského. Satelity systému GLONASS obíhají Zemi ve třech kruhových oběžných drahách na střední orbitě (MEO) ve výšce 19 100 km a sklonem družic od rovníku 64,8°. Dráhy jsou vzájemně posunuty o 120°. Na každé z nich je umístěno 8 družic posunutých po 45°, jejich rozložení je číslováno:

- Dráha 1: družice 1-8
- Dráha 2: družice 9-16
- Dráha 3: družice 16-24

Doba oběhu jedné družice trvá vždy 11 hodin a 15 minut. Díky svému umístění jsou satelity GLONASS vhodnější pro používání ve vysokých zeměpisných šířkách (sever nebo jih) než jiné systémy. Výhodou oproti GPS je, že satelity nemají rezonanci s rotací Země. To jim umožňuje vysokou stabilitu a zároveň nejsou potřeba dodatečné korekce v průběhu aktivního života družic (Revnivykh, 2008).



Obr. 7 Konstelace satelitů systému GLONASS (Navipedia, 2014)

Družice se označují názvem Uragan a přívlástkem dle dané generace družice. Nyní jsou aktivní družice generace Uragan-M a připravují se k nasazení Uragan-K1. Družice Uragan-M jsou vybaveny atomovými hodinami s cesiovým oscilátorem ($< 10^{-13}$ sekundy), 12 vysílacími rádiovými anténami v pásmech L (2000-1000 MHz), komunikačními anténami pro komunikaci s pozemními kontrolními stanicemi, solárními panely 1,45 kW a bateriemi 70 Ah jako zdroj energie. Na povrchu družice je

umístěno odrazové pole pro určení pozice družice laserovými měřidly (SLR)⁵. Jejich životnost se pohybuje okolo sedmi let. Od roku 2012, probíhají testy generace Uragan-K ve vesmíru. Tyto družice mají oproti přechozí řadě nižší hmotnost a otevřený design - nejsou tlakovány. Předchozí řady družic byly hermeticky uzavřeny s vlastním tlakem, aby byly chráněny vnitřní součásti před vlivy vesmírného prostředí. Nové generace jsou již lépe navrženy, nepotřebují chránit vnitřní části před vesmírnými vlivy, a proto mají delší životnost. Přehled rozdílů ve výbavě napříč generacemi satelitů Uragan je popsán v tab. 1 (GLONASS History, 2016).

Tab. 1 Přehled vývoje generací družic GLONASS

Vlastnosti	Uragan	Uragan-M	Uragan-K	Uragan-K2
Období provozu	1982-2005	2003-2016	2011-2018	2017+
Stav	vyřazeny	v provozu	ostré testy	ve vývoji
Životnost, rok	3.5	7	10	10
Hmotnost, kg	1500	1415	935	1600
Rozměry, m	-	2,71 × 3,05 × 2,71	2,53 × 3,01 × 1,43	2,53 × 6,01 × 1,43
Výkon, W		1400	1270	4370
Design platformy	Uzavřený	Uzavřený	Otevřený	Otevřený
Přesnost hodin, specifikovaná/měřená	5×10 ⁻¹³ / 1×10 ⁻¹³	1×10 ⁻¹³ / 5×10 ⁻¹⁴	1×10 ⁻¹³ / 5×10 ⁻¹⁴	1×10 ⁻¹⁴ / 5×10 ⁻¹⁵
Typ signálu	FDMA	FDMA	FDMA, CDMA	FDMA, CDMA
Neautorizované signály	L1OF	L1OF, L2OF, L3OC	L1OF, L2OF, L3OC, L2OC	L1OF, L2OF, L1OC, L2OC, L3OC
Autorizované signály	L1SF, L2SF	L1SF, L2SF	L1SF, L2SF, L2SC	L1SF, L2SF, L1SC, L2SC

"O": neautorizovaný kód (standardní přesnost), "S": autorizovaný kód (vysoká přesnost); "F":FDMA, "C":CDMA

⁵ SLR (z aj. Satellite Laser Ranging) pozemní pozorovací stanice pomocí ultra-krátkých pulzů světla mohou s milimetrovou přesností určovat pozici satelitů. Jedná se o nejpřesnější dostupnou metodu určování polohy satelitů.

4.2.2 Řídící subsystém

Řídící část se skládá z pozemních stanic, antén a středisek, které jsou z převážné většiny umístěny na území Ruské federace. Nevýhodou stanic umístěných v jednom místě bylo, že řídicí část měla vždy pouze omezené okno pro komunikaci s družicemi, řízení ztrácelo kontakt každý den až na 16 hodin. V roce 2014 bylo 46 pozemních stanic systému GLONASS umístěno na ruském území, 8 v sousedních zemích, 3 v Antarktidě a 1 v Brazílii. Do budoucna se plánuje postavit dalších 50 stanic systému na různých místech světa. Cílem je poskytnout přesnější a lepší služby než doposud (The Way Forward, 2016).

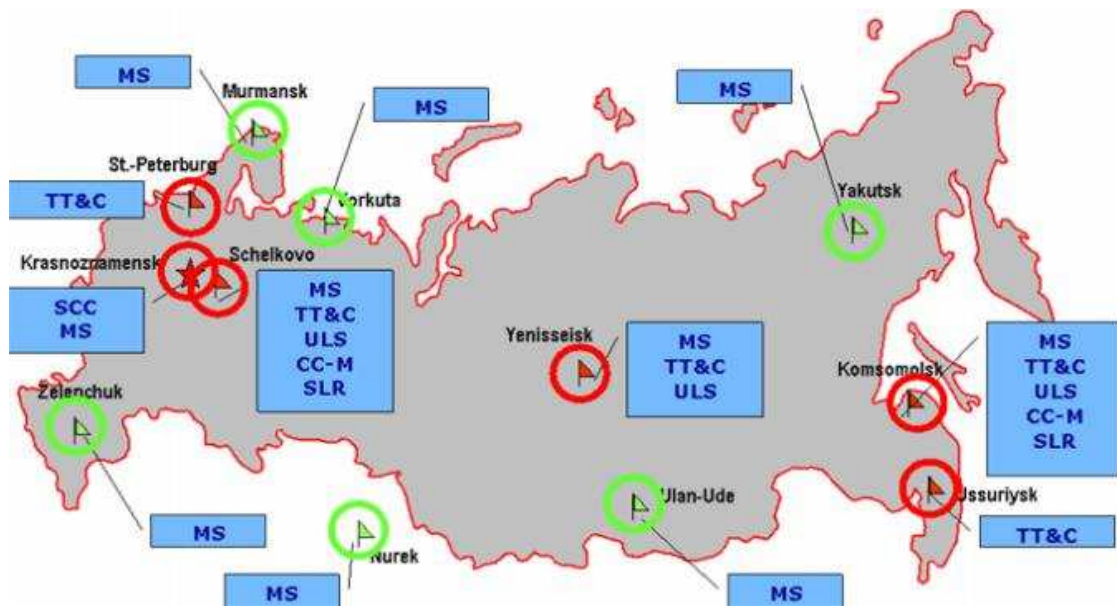
Řídící středisko se nalézá v Krasnoznamenstvu, stará se o udržování konstelace satelitů GLONASS a jejich správu. Poskytuje telemetrii⁶, řídicí příkazy a kontrolu nad celým systémem. Zpracovává a distribuuje informace z řídicích a sledovacích stanic, z kterých zjišťuje čas a pozici družic. Obnovuje navigační zprávy pro jednotlivé satelity. Označuje se jako SCC (z aj. System Control Centre)

Řídící a sledovací stanice se nacházejí v Schelkovu, Komsomoisku, St-Peteburgu, Ussuriysku a Jenisseisku. Systém se skládá ze sítě pěti řídicích a sledovacích stanic (TT&C, z aj. Telemetry, Tracking and Command), které jsou rozmístěny na ruském území. Sledovací stanice sledují pozici satelitů GLONASS a vypočítávají dálkoměrná data a telemetrii ze satelitních signálů. Tyto informace jsou pak následně zpracovány v SCC, aby se určil satelitní čas a orbita satelitů. Jedná se součást navigační zprávy, kterou pak odesílají povelové stanice společně s řídicími informacemi.

Laserové měřicí stanice (SLR) se nacházejí v Schelkovu a Komsomoisku. Slouží ke kalibraci dat emeferidů pro družice GLONASS na deklarovanou hodnotu přesnosti. Jejich použití značně zvyšuje přesnost systému.

Synchronizační stanice je umístěna v Schelkovu a jsou v ní spravovány velmi přesné hydrogenové atomové hodiny. Slouží k synchronizaci času atomových hodin umístěných na družicích se státním etalonem UTC času.

⁶ **Telemetrie** je technologie umožňující vzdálené měření a dálkový přenos dat. Jedná se o automatizovaný proces.



Obr. 8 Znárodnění významných středisek řídicího subsystému na ruském území (Navipedia, 2011)

SCC – hlavní řídicí stanice, TT&C – řídicí a sledovací stanice, ULS – povelová stanice (z aj. Uplink Station), MS – Monitorovací stanice, CC – synchronizační stanice, SLR – laserová měřící stanice

4.2.3 Uživatelský subsystém

Stejně jako u GPS se uživatelský subsystém skládá z jednotlivých radiových přijímačů v pásmu L, s kterými operují uživatelé. Přijímače přijímají data z viditelných družic v podobě navigační zprávy a ze získaných dat vypočítávají polohu, nadmořskou výšku, datum a čas. Přijímače pouze data pouze získávají, jsou tedy pasivní. Dnes se už vyrábějí v mnoha variacích a s různou velikostí a nabízenými funkcemi. Nalezneme je nejen v autech, geodetických přístrojích, přenosných GPS přijímačích, mobilních telefonech, ale využívají se i jednotlivé čipy o velikosti pár centimetrů např. v zavazadlech apod. GPS GLONASS byla pro civilní použití uvolněna o několik let později než GPS NAVSTAR, a to navíc s omezenou dostupností. Pro její masivnější rozšíření tak byly nutné intervence z ruské strany. Ruská vláda v roce 2001 vydala nařízení, že všechna přepravní i nákladní vozidla musí na ruském území používat navigační systém GLONASS. Toto nařízení bylo odůvodněno jako podklad pro centralizovaný výpočet silniční daně za užívání pozemních komunikací. Od roku 2011 musí být tato navigace součástí všech nově vyrobených vozidel na ruském území, platí i pro zahraniční značky např. Ford a Toyota, které mají někte-

ré továrny v Rusku. První mobilní telefon využívající GLONASS byl v roce 2011 chytrý telefon MTS GLONASS 945, navigaci zajišťoval čip společnosti Qualcomm. Jednalo se o tzv. dvoučipovou navigaci, kdy přístroj uměl využívat současně GPS a GLONASS, což výrazně zpřesňovalo určování polohy. Dnes obdobnou dvoučipovou navigaci používají levnější i dražší přístroje nejen u mobilů ale i u jiných dedikovaných navigačních přístrojů.



Obr. 9 Ruční GPS GARMIN GPSMAP 64 PRO (garmin.cz, 2009-2013)

4.3 Galileo

GPS Galileo je globální družicový polohový systém (GNSS) vyvíjený a financovaný Evropskou unií na základě rozhodnutí Evropské komise a pod vedením Evropské kosmické agentury. Cílem projektu evropského GNSS je vyvinutí a rozšíření civilní verze GPS služby nezávislé na vládách zřizovatelských států a zejména jejich armádách. Systémy GPS a GLONASS jsou totiž primárně vojenské systémy, které negarantují dostupnost služby v dobách krize a válečných konfliktů. Z tohoto důvodu je projekt Galileo projektován čistě pro civilní použití a je spravován civilní správou. Práce na systému byly zahájeny 19.7.1999 a v roce 2010 bylo plánováno jeho plné spuštění. Nastalo však několik komplikací, a proto bylo zahájení plného provozu několikrát odloženo a rok spuštění byl posunut nejprve na rok 2018 a následně na 2020.

4.3.1 Fáze projektu

Projekt Galileo lze dle svého vývoje rozdělit do několika fází (Český kosmický portál, 2015b):

- ověření na orbitě (IOV z aj. In-Orbit-Validation)
- částečná operační kapacita (IOC z aj. Initial Operational Capacity)
- plná operační kapacita (FOC z aj. Full Operation Capacity)

Fáze IOV slouží k ověření funkčnosti, kvality a spolehlivosti komponentů jednotlivých satelitů pomocí řízených testů. K tomuto účelu se využívali dva experimentální satelity, redukovaná konstelace čtyř operačních satelitů a k nim potřebné pozemní stanice. První dva experimentální satelity byly nasazeny v prosinci 2005 a v květnu 2008. Jejich účelem bylo charakterizování podmínek na střední orbitě (MEO), měření radiace, magnetického pole atd. Dále bylo potřebné otestování tzv. nákladu družice, např. atomových hodin a nesených digitálních systémů. V této fázi byly ověřovány jednotlivé typy signálů mezi družicemi ve frekvenčním spektru specifickém pro systém Galileo. U signálů se postupovalo dle doporučení WRC RNSS⁷. První dva operační satelity byly spuštěny v říjnu 2011 a třetí a čtvrtý o rok později, v říjnu 2012. Jejich úkolem bylo ohodnotit projekt Galileo jako koncept při

⁷ RNSS (z aj. Radio Navigation Satellite Service) Organizace zabývající se efektivním a ekonomickým rozdělením radiového spektra včetně navigačních systémů. WRC – jeden ze standardů RNSS

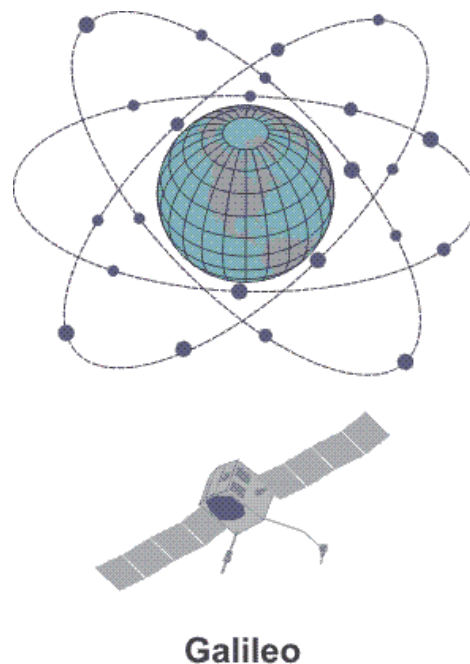
využití konstelace čtyř satelitů a přidružených pozemních stanic. První nezávislé určení pozice v Evropě pomocí GNSS Galileo proběhlo 12. března 2013.

Fáze IOC zahrnuje rozmístění další vesmírné a pozemní infrastruktury nezbytné pro provoz systému v režimu částečné operační kapacity. Jedná se o nasazení dalších 14 satelitů k 4 IOV satelitům. Od roku 2014-2015 spuštění civilních signálů OS, SAR a PRS. K zabezpečení těchto služeb bude sloužit konstelace 18 satelitů.

Fáze FOC představuje rozšíření konstelace na 30 satelitů, dosažení plné operační kapacity je plánováno na rok 2019-2020. Pozemní infrastruktura bude rozmístěna celosvětově, tak aby mohl systém poskytovat časové a navigační služby bez ohledu na pozici uživatele.

4.3.2 Infrastruktura

V současné době, v prosinci 2016, je stav systému stále IOV (ověření provozu na orbitě). V konstelaci je aktivních 11 satelitů, které poskytují omezené časové a navigační služby, 2 satelity se nacházejí ve fázi testování a jeden je mimo provoz (Constellation Information, 2016).



Obr. 10 Konstelace GNSS Galileo (Sickle, 2016)

Kompletní infrastruktura GNSS Galileo se bude skládat z:

- 30 satelitů (27 operačních a 3 záložní) konstelace na MEO ve výšce 23 222 km, satelity budou obíhat ve třech kruhových rovinách se sklonem 56° k rovníku. Satelity mají hmotnost 675 Kg, rozměry 2,7 m × 1,2 m × 1,1 m a životnost větší než 12 let.
- 16 sensorových stanic
- 2 řídicí stanice, hlavní řídicí centrum v Praze
- 5 vysílacích stanic
- 5 řídicích a povelových stanic (TT&C)
- 4 řídicí centra, servisní centrum Galileo, referenční centrum, centrum dat SAR, bezpečnostní centrum

4.3.3 Služby

Galileo bude svým uživatelům nabízet celkem 4 základní služby a několik doplňkových, které budou postupně přidávány (The Way Forward, 2016).

Základní služba (OS z aj. Open Service) bude nabízet základní signál s předpokládanou přesností určení polohy až 1 m. Tato služba bude všem uživatelům poskytována zdarma a bez omezení. Na stejném signálu je poskytována služba SOL, která bude šifrovaná s důrazem na bezpečnost a spolehlivost, tato služba je určená např. pro letecký provoz.

Komerční služba (CS z aj. Commercial Service) bude nabízet k základnímu signálu ještě další dva šifrované signály, které jsou placené. Přístup bude řízen na úrovni přijímačů pomocí přístupových klíčů. Díky využití až tří signálů bude možné zaměřovat polohu až s přesností 1 cm.

Veřejně regulovaná služba (PRS z aj. Public Regulated Service) bude nabízet dva šifrované signály s kontrolovaným přístupem. Tato služba je určená státem vybraným uživatelům, např. bezpečnostním nebo záchranným složkám.

Vyhledávací a záchranná služba (SAR z aj. Search and Rescue) je nouzová lokalizační služba a slouží v rámci celosvětové družicové záchranné služby COSPAS-SARSAT. Výhodou této služby je, že oproti ostatním druhům signálů umožňuje oboustrannou komunikaci.

4.4 BeiDou-Compass

Globální navigační systém BeiDou⁸ je navigační systém vyvíjený Čínskou lidovou republikou. Oficiální název systému v aj. je BeiDou Navigation Satellite System (BDS). Systém byl později přejmenován na Compass z důvodu použití navigace i mimo čínské území, nicméně se stále používají obě označení. Vývoj a spouštění systému je rozděleno na 3 kroky:

- 2000-2003: experimentální navigační systém BeiDou (BeiDou-1), 3+1 satelity
- Od 2012: regionální navigační systém BeiDou pokrývající Čínu a okolí
- Od 2020: globální navigační systém BeiDou

První satelit systému byl vypuštěn v říjnu 2000 s označením BeiDou-1A, následován v prosinci 2000 satelitem BeiDou-1B a třetím satelitem BeiDou-1C v květnu 2003. Nasazením třetího satelitu byla splněna první fáze vývoje a zároveň byl ustanoven navigační systém BeiDou-1. V roce 2007 byl vypuštěn ještě čtvrtý a poslední satelit systému BeiDou-1D, který pak sloužil jako záložní. Tento systém pokrýval pouze omezené území Číny.

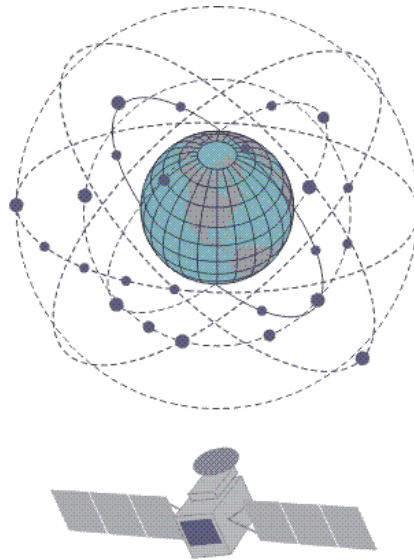
V roce 2006 Čína oznámila, že od roku 2008 bude BeiDou zdarma poskytovat určení polohy s přesností 10 metrů všem uživatelům již na základní službě. Tímto prohlášením představila svoje úmysly dalšího rozvoje systému. V květnu 2007 byl vypuštěn první satelit nové generace systému BeiDou-2, označeného jako Compass-M1. Systém byl prohlášen operačním v roce 2011 s omezenou konstelací 10 satelitů a od roku 2012 začal poskytovat poziční, navigační, časové a komunikační služby v oblastech Asie a Oceánie. V polovině roku 2015 začali práce na třetí generaci BeiDou (BDS-3), první satelit z této generace byl nasazen 30. září 2015. Celkem do května 2016 byly vypuštěny 4 satelity BDS-3, které se nacházejí ve fázi testování na orbitě. Globálního pokrytí by měl systém dosáhnout kolem roku 2020 s konstelací 35 satelitů (Sickle, 2016).

4.4.1 Vesmírný subsystém

Na rozdíl od předchozích popisovaných GNSS systémů (Navstar, Glonass, Galileo) BeiDou je projektován tak, že bude využívat satelity na několika různých orbitách. BDS-1 používá satelity na geostacionární orbitě (GEO). Satelity na geostacionární dráze se jeví pozorovatelům na Zemi jako nehybné, aby toho bylo dosaženo, musí

⁸ název BeiDou je odvozen od čínského názvu pro souhvězdí velkého vozu

se pohybovat kruhovou rychlostí v rovině Země ve výšce 35 800 km nad rovníkem. Výhodou satelitů na GEO je, že konstelace nepotřebuje mnoho satelitů. Nevýhodou je omezená obsluhovaná oblast, nachází se pouze v pásmu délky od 70°E do 140°E a šířky od 5°N do 55°N.



BeiDou

6 orbitálních drah

35 satelitů: 5 GEO + 27 MEO + 3 IGSO

sklon 55°

Výška 38 300 km, 21 500 km

Obr. 11 Konstelace BeiDou (Sickle, 2016)

První satelity BDS-2 (Compass) jsou na orbitě MEO ve výšce 21 500 km se sklonem 55,5°. Podobné satelity pak následovaly mezi roky 2007-2012. Celkem bylo nasazeno 5 MEO satelitů s označením Compass-M1 až M6 (kromě M2). V období 2009-2012 pak následovalo 6 satelitů GEO s názvy Compass-G1 až G6. Jejich pozice jsou 58,75°E délky (G5), 80,0°E délky (G6), 110,5°E délky (G3), 140,1°E délky (G1), 160,0°E délky (G4). Satelit G2 není aktivní. Od roku 2010 do 2011 bylo nasazeno 5 satelitů BDS-2 na vysoké orbitě (z aj. High Earth Orbit, HEO) s názvy Compass-IGS01 až IGS05 ve výšce 38 300 km. Satelity IGOS (z aj. Inclined Geosynchronous Orbit Satellites) z důvodu svého sklonu nejsou geostacionární

a z pevného místa na Zemi lze pozorovat jejich dráhu připomínající analemmu⁹, tento jev je způsoben gravitačními vlivy vesmírných těles ovlivňujících jejich trajektorii. Satelity IGS01, IGS02 a IGS03 jsou přibližně na pozici $\sim 120^\circ\text{E}$. IGS04 a IGS05 jsou na $\sim 95^\circ\text{E}$. Všechny satelity řady IGS0 mají pak sklon 55° a jsou rozmístěny tak, že jeden z nich je vždy nad územím Číny (IGS MGEX BeiDou, 2016).

Kompletní konstelace bude obsahovat 35 satelitů, 5 z nich budou satelity geostacionární a 30 nestacionárních. Satelity budou umístěny na 6 orbitálních drahách. Z 30 nestacionárních satelitů bude 27 umístěno na MEO a 3 na IGS0. Všechny satelity ponosou v nákladu mimo základní systémy ještě směrovou anténu, zabudovaný odrážecí paprsků (z aj. retro-reflector), sektorovou anténu pro pásmo C a parabolickou anténu pro pásmo S/L.

Tab. 2 Stav družic GPS BeiDou k prosinci 2016 (MGEX, 2016)

Blok	Termín vypuštění	Vypuštěné satelity			Aktivní
		Úspěšně	Neúspěšně	Plánováno	
BDS-1	2000-2007	3	0	0	0
BDS-2	2007-2012	17	0	0	13
BDS-3	Od 2015	8	0	18	8
Celkem		28	0	18	21

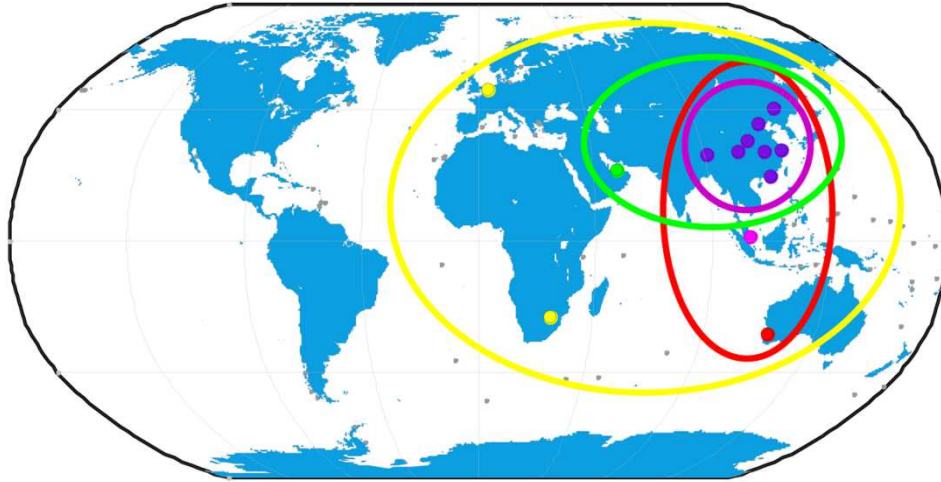
4.4.2 Řídící a uživatelský subsystém

Pozemní segment systému se skládá z několika hlavních řídicích center, monitorovacích stanic a povelových stanic. Převážná většina stanic a center je v současné době umístěna na čínském území. Systém se však vyvíjí z regionálního na globální, a proto stejným tempem přibývají stanice i mimo čínské území. BDS-2 používá pro funkce regionálního polohování geostacionární satelity. Tyto satelity potřebují pro správnou funkci, na rozdíl od nestacionárních satelitů, fixní bod na Zemi, proto s nimi mohou pracovat pouze konkrétní stanice.

Uživatelský subsystém se skládá z uživatelských terminálů přijímajících signály ze systému BeiDou, které zpracovávají a získávají tak své souřadnice. Terminály z přijatých dat vypočítávají svoji pozici, nadmořskou výšku, přesný čas a umějí také odesílat a přijímat krátké zprávy. U první generace systému BDS-1 výpočty prováděly pozemní stanice, které data posílaly zpět GEO družicím. Tento systém se však

⁹ Obrazec připomínající nekonečnou smyčku, používá se zejména ve spojení s pohyby Slunce a satelitů.

neosvědčil a od generace BDS-2 se používá běžný způsob zpracování dat na uživatelském terminálu.



Obr. 12 Oblast pokrytí GPS BeiDou (Sensors, 2013)

Pokrytí GPS BeiDou je rozděleno do několika regionů dle obr. 12. Čínský region je označen nejmenší elipsou – fialovou a je obsluhován pouze GEO satelity, tečky značí pozemní stanice, Asie-Oceánie je označena červenou elipsou, Asie zelenou a globální síť žlutou.

Signály systému jsou modulovány v pásmech E1, E2, E5B, a E6 a částečně se překrývají se signály GPS Galileo. BDS poskytuje:

- základní (otevřenou) službu s přesností 10 m, přesností času na 50 ns a přesností měření rychlostí $0,2 \text{ ms}^{-1}$
- autorizovanou vojenskou službu s přesností 10 cm, možností obousměrné komunikace, používá ji pouze Čínská lidová armáda a armáda Pákistánu
- posílání krátkých zpráv, až 120 čínských znaků, pouze GEO satelity

5 Praktická část a výsledky práce

Smyslem praktické části bylo ověření náhrady, resp. substituce radarového měření pojezdové rychlosti traktoru za užití přijímače GPS. V současnosti se totiž instalace radarů provádí pouze u traktorů vyšší výkonové třídy. Realita v podmínkách ČR či Polska je však jiná a mechanizace zemědělství spoléhá i na traktory s nižším výkonem. Abychom mohli experiment zrealizovat, bylo nutné zajistit vhodný traktor, který bude mít instalován moderní typ radaru s dvojitým způsobem vyzařování. Konstrukce dvojitého vyzařování eliminuje chyby ve stanovení rychlosti v případě, že se do dráhy paprsku dostane těleso, které způsobí diferenci času v odraze a data o rychlosti tak znehodnotí. Tímto tělesem může být i stéblo obilovin či půda, která odpadává z hnacích kol. Výrobci se snaží implementovat i rozličné algoritmy úprav signálu od klouzavého průměrování, přes digitální filtry až po sofistikované Kalmanovy filtry¹⁰ s predikcí polohy a korekcí integrací získaného z měření dané polohy.

Ke zkouškám byl přistaven kolový traktor John Deere 8320, na obr. 13 v předí. Základní technické údaje uváděné výrobcem jsou uvedeny v tab. 3.



Obr. 13 Zkouška traktoru John Deere 8320 (Čupera, 2016)

¹⁰ Speciální matematický algoritmus pro filtraci signálů v časové oblasti

Tab. 3 Vybrané základní údaje uváděné výrobcem.

Model traktoru	John Deere 8320R
Parametr	Hodnota
Číslo motoru	RG 6090L078771*
Číslo traktoru	*1 RW 8320RVAP006517*
Rok výroby	2010
Počet motohodin	3,2
Jmenovitý výkon	239/320 [kW/koní]
Max. výkon bez navýšení	255/347 [kW/koní]
Jmenovitý výkon s navýšením	261/355 [kW/koní]
Jmenovité otáčky	2 100 ot/min
Max. točivý moment	1 419 N.m při 1 500 ot/min
Počet válců	6
Počet ventilů	24
Vrtání	118,4 [mm]
Zdvih	136 [mm]
Kompresní poměr	16,3
Objem motoru	9 000 cm ³
Pohon ventilátoru chlazení	Varicool- systém s proměnlivými otáčkami ventilátoru chlazení
Přeplňování	Turbodmychadlo
Vstřikovací systém	Vysokotlaký Common Rail s plně elektronickým řízením
Typ	Powershift
Počet převodových stupňů	16F/5R
Rozměr přední pneumatiky	Michelin 600/70 R30
Rozměr zadní pneumatiky	Michelin 710/70 R42

5.1 Měřicí ústředna

Měřicí ústředna je postavena na komponentech společnosti National Instruments. Jedná se o systém komerčně nazývaný CompactRIO, který byl složen z těchto částí:

1. Šasi s FPGA polem (3M) NI 9104 (sériové číslo: 12BC0B0)

Šasi lze osadit osmi moduly libovolné konfigurace, od analogových vstupů, přes vstupně/výstupní digitální linky či účelové převodníky pro tenzometry, RTD, termočlánky, akcelerometry aj. po reléové moduly a moduly sběrnice CAN. Šasi je konstruováno s ohledem na extrémní podmínky, snese teploty od -40°C do 70°C a odolává vibracím až do 50g (parametry: 3 ms, 3 osy, tvar poloviny sinusoidy). Vzhledem k umístění bylo nutné dřívější systém chránit proti účinkům statické elektřiny, cRIO je interně chráněno až do 2 300 V.

2. Real-time kontrolér NI 9004 (sériové číslo: E766A9)

Kontrolér je hlavním mikroprocesorovým systémem celé sestavy. Vnitřní architekturu tvoří průmyslový mikroprocesor taktovaný na 195 MHz, který využívá 64 MB DRAM, přičemž externí paměť pro ukládání dat či výsledků je typu CompactFlash s kapacitou 512 MB, která lze rozšířit na 2 GB. Komunikační rozhraní je tvořeno standardním Ethernetem 10baseT/100baseTx a dále lze připojit na kontrolér sériovou linku RS 232. Standardně je kontrolér vybaven několika typy interních serverů. K zobrazení analýz je vhodný http server, pro konfigurace a jako úložiště dat slouží FTP server. Rozšíření rozhraní VISA umožňuje vzdálenou správu systému z jiných prostředků NI.

3. Modul vstupů z tenzometrů NI 9237 (sériové číslo: 12AF987)

Modul slouží k záznamu tahové síly traktoru (měření valivých odporů tažených vozidel). Tenzometrický vstup umožňuje připojení čtyř tenzometrů, které mohou měřit simultánně. Maximální rychlost vzorkování činí až 50 kS/s při rozlišení 24 bitů. Zapojení tenzometrů může být v půl- nebo plném mostu s maximální excitací 10 V a vstupem ± 25 mV. Izolace proti vysokému napětí odolá až 1000 V.

4. CAN-Bus modul NI 9853 (sériové číslo: 128760C)

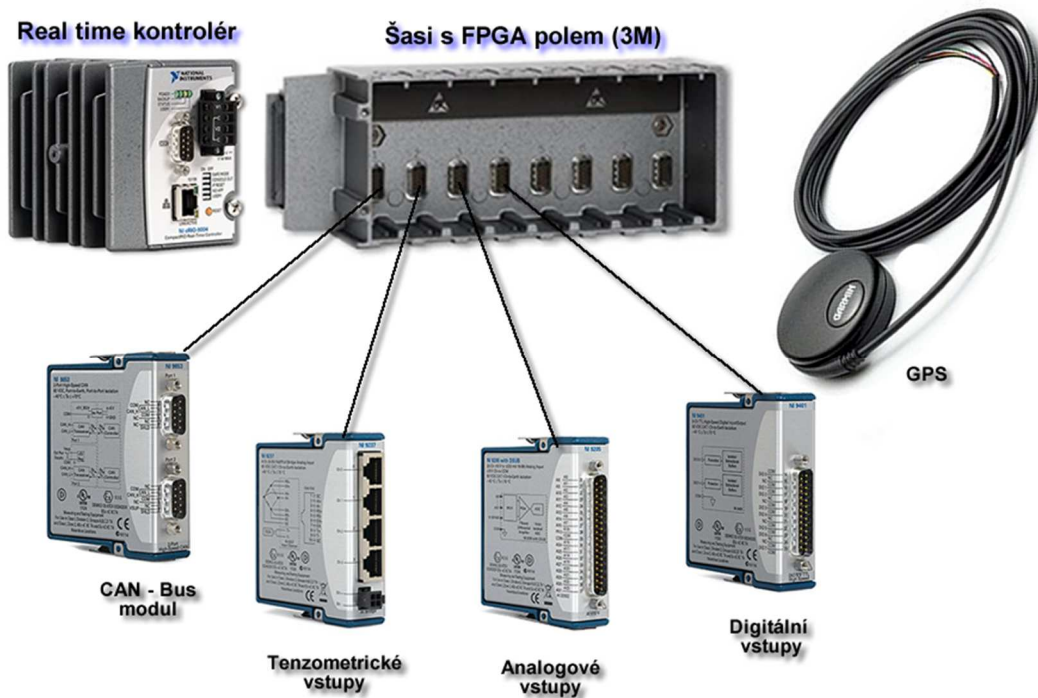
Modul reprezentuje systém sběru dat z palubní sítě traktoru. Současné traktory téměř výhradně používají protokoly s komunikační rychlostí 250 kbps. Modul umožňuje snímat data s rychlostí 1Mbits, a to nezávisle na dvou portech, případně jeden port může číst a druhý zapisovat. Mimo obvyklé standardy lze definovat vlastní uživatelské.

5. RS232 modul NI 9870 (sériové číslo: 14BB980)

Modul je v systému integrován z důvodu čtení dat z GPS přijímače. Baudrate¹¹ přijímače byl nastaven na 38,4 kbps. Modul má čtyři porty RS232 s možností komunikační rychlosti 921,6 kbps.

6. Modul digitálních vstupů NI 9411 (sériové číslo 12F69AB)

Modul pro digitální vstupy v úrovni TTL či volitelně do 24 V, diferenciálně či single ended zapojení. Port má 6 vstupů.



Obr. 14 Systém CompactRio (ni.com, 2016)

K substituci radarového měření pojezdové rychlosti traktoru John Deere byla použita GPS Garmin 18x – 5 Hz připevněná ke kapotě traktoru. Jedná se o přesné OEM zařízení určené k automobilové navigaci, sledování vozidel a elektronické aplikaci. Toto zařízení je uloženo ve voděodolném pouzdru a snáší venkovní použití. Pro přenos dat slouží 5m dlouhý kabel zakončený sériovým portem RS-232 napojeným do systému CompatRio. Model 18x – 5 Hz přijímá data současně z několika

¹¹ Baud (Bd) je jednotka modulační rychlosti (také označována jako symbolová nebo znaková rychlost, v aj. Baudrate)

satelitů, nejvýše však 12 z důvodu omezení datového protokolu. Data aktualizuje 5krát za sekundu a přenos dat z GPS přijímače probíhá přes NMEA protokol.



Obr. 15 GPS přijímač Garmin 18x – 5 Hz umístěný na kapotě traktoru John Deere (Čupera, 2016)

5.2 Protokol NMEA 0183

Standard NMEA původně vznikl pro potřeby automatizovaného přenosu dat mezi zařízeními elektroniky lodi. Protokol 0183 vznikl mezi roky 1980-1990 a nahradil tak starší verze 0180 a 0182. Stanovilo jej a o jeho údržbu se stará Národní sdružení pro loďní elektroniku (NMEA). Stávající protokol je už pomalu nahrazován novějším NMEA 2000 standardem.

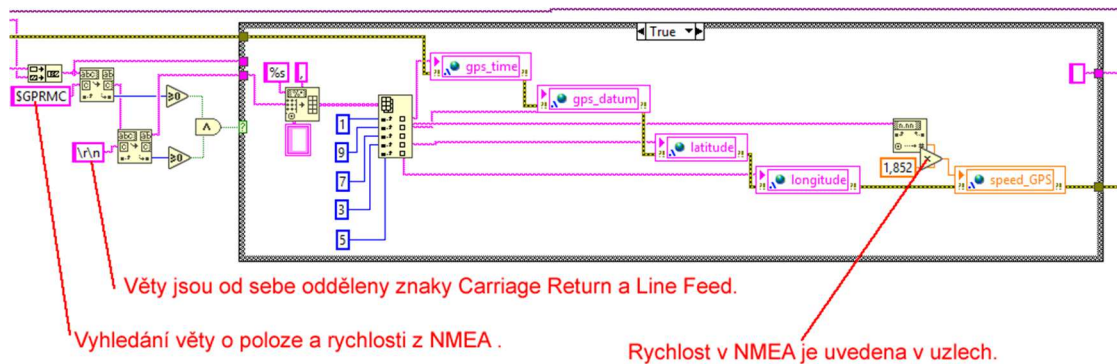
Protokol 0183 popisuje jednotlivé elektrické charakteristiky a přenosový protokol, informace kóduje pomocí ASCII znaků. Mezi jeho hlavní využití patří přenos dat mezi přijímači globálních družicových navigačních systému, anemometry, gyrokompasy, autopiloty a sonary.

5.2.1 Formát zprávy

Každá zpráva protokolu NMEA má následující obecný formát (GPS a komunikační protokol NMEA, 2006):

$$\text{\$XXYYY, } a_1, a_2, a_3, \dots, a_n * \text{cc} < \text{CR} > < \text{LF} > \quad (3)$$

- Každá zpráva je na jeden řádek a začíná znakem „ \$ “
- První dva znaky po znaku \$ jsou označené XX a reprezentují identifikátor mluvčího (typ vysílače)
- Další tři znaky označené YYY představují identifikátor věty (druh zprávy)
- Položky „a₁, a₂, a₃,..., a_n“ označují datové položky a jsou odděleny čárkou „ , “, řetězec je ukončen znakem „ * “ bez čárky
- Po znaku * následuje kontrolní součet cc, který je nepovinný. Jedná se o hexadecimální zápis bytu, který vznikne jako XOR předchozích ASCII kódů znaků zprávy mezi znaky \$ a *
- Zpráva je zakončena znaky <CR> a <LF>, které značí návrat vozíku (z aj. Carriage Return) a přechod na nový řádek (z aj. Line Feed)



Obr. 16 Část algoritmu NMEA použitá pro měření (Čupera, 2016)

Na obr. 16 je znázorněna část algoritmu NMEA, která byla použita při měření. \$GPRMC, kde GP značí identifikaci družicového přijímače, GP = GPS. RMC označuje druh zprávy družicového přijímače, v tomto případě RMC = základní sada údajů (z aj. Recommended Minimum Data).

Data NMEA věty při použití formátu GPRMC pak mohou vypadat následovně (GPS a komunikační protokol NMEA, 2006):

$$\text{\$GPRMC,131038.431,A,4847.7295,N,1647.9257,E,0.04,16.43,100816,*,*32} \quad (4)$$

Pro snazší pochopení je ukázka dat NMEA věty rozepsána v tabulce č. 4.

Tab. 4 Popis dat v použité NMEA větě

	Formát	Data	Popis
1	hhmmss.sss	131038.431	Čas (UTC)
2	c	A	Status (A=OK, V=varování)
3	ddmm.mmmm	4847.7295	Zeměpisná šířka
4	c	N	Indikátor sever/jih (N=sever, S= jih)
5	ddmm.mmmm	1647.9257	Zeměpisná délka
6	c	E	Indikátor východ/západ (E=východ, W=západ)
7	d . d	0.04	Vodorovná rychlost (uzly)
8	d . d	16.43	Kurz pohybu ve stupních
9	ddmmyy	100816	Datum (10.08.2016)
10	d . d	N.A.	Magnetická deklinace ve stupních
11	c	N.A.	Indikátor východ/západ (E=východ, W=západ)
12	*xx	32	Kontrolní součet

5.3 Metodika měření

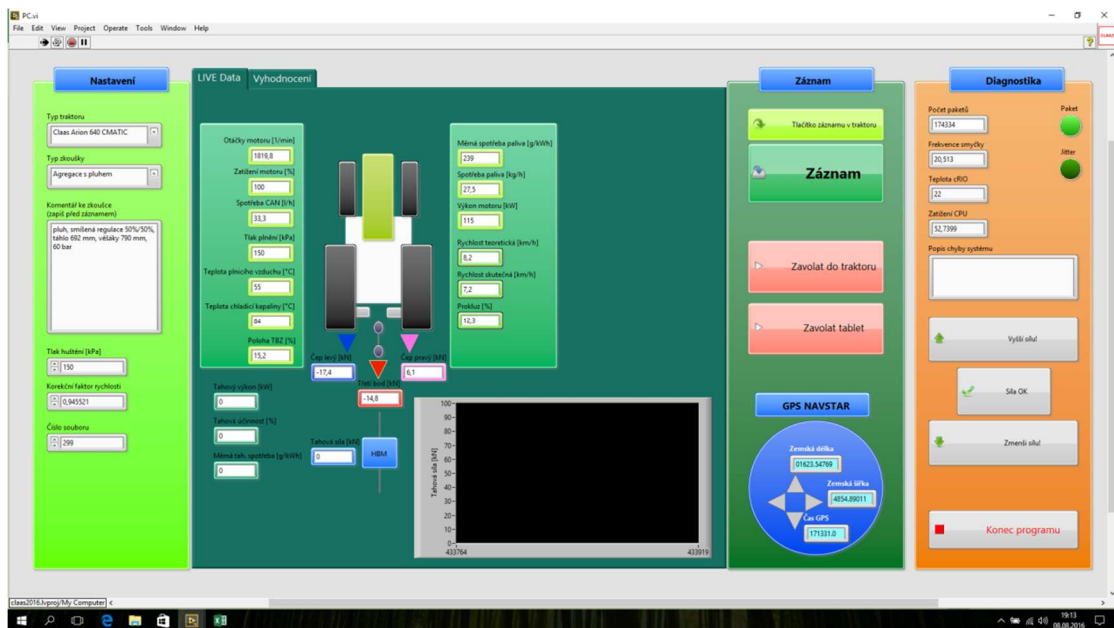
Ke splnění cíle práce bylo měření realizováno jako tahová zkouška a zkouška v agregaci s kombinovaným kypřičem. Při tahové zkoušce, kdy traktor byl zatěžován jiným traktorem a mezi nimi byla zjišťována síla pomocí tenzometru, byl s výhodou povrchu sledován signál z radaru traktoru. Byly sledovány mimo jiné tyto veličiny:

- rychlost od kol traktoru, která je určena řídicí jednotkou převodovky,
- rychlost z radaru,
- rychlost z GPS (mé externí měření).

5.3.1 LabVIEW

Pro řízení záznamu dat byl použit program vyvinutý v prostředí LabView 2015, v kterém byla vytvořena přehledná maska pro zadávání dat. LabView je grafické programové a vývojové prostředí firmy National Instruments, někdy se také ozna-

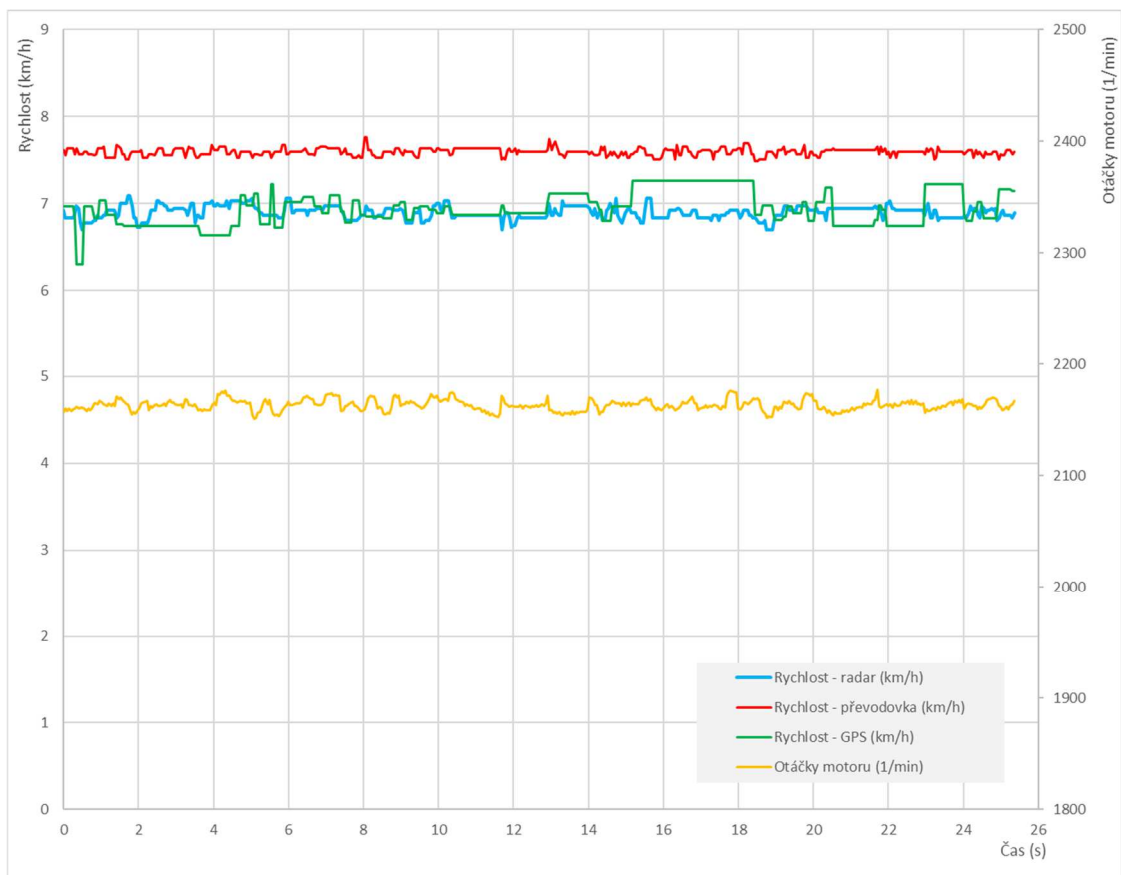
čuje jako G-jazyk (grafický jazyk). Toto prostředí je unikátní v tom, že prakticky nemá omezení svého použití. Je užitečné zejména tam, kde je možné nákladný a složitý hardware nahradit virtualizovaným prostředím a šetří nám tak čas a peníze. Mezi jeho další nespornou výhodou patří snadná a rychlá možnost navrhovat nové aplikace i provádění změn v konfiguraci, což by u reálných zařízení mohlo být časově náročné nebo nemožné. Jazyk je vhodný nejen k programování systémů pro měření, ale také k programování různých složitých systémů jako jsou třeba například systémy pro řízení robotů (Havlíček a další, 2008).



Obr. 17 Maska programu pro záznam dat z traktorů i GPS (Čupera, 2016)

5.4 Interpretace výsledků

Výsledky měření jsou uvedeny graficky níže na obr. 18. Z grafu je patrná korelace hodnot GPS a radaru, byť je patrná disproporce, kdy GPS poskytuje signál s nižší vzorkovací frekvencí než radar, proto je třeba patrný konstantní úsek mezi 15 a 18 sekundou záznamu. Dále je vidět, že hodnoty prezentované převodovkou (od kol) mají sice věrohodný průběh signálu, avšak jsou posunuty ofsetem. Toto lze přisoudit „chybnému“ základnímu nastavení traktoru, kdy jsou při kódování řídicí jednotky zadány dynamické poloměry kol, avšak jiných rozměrů, resp. jiných tlaků huštění.

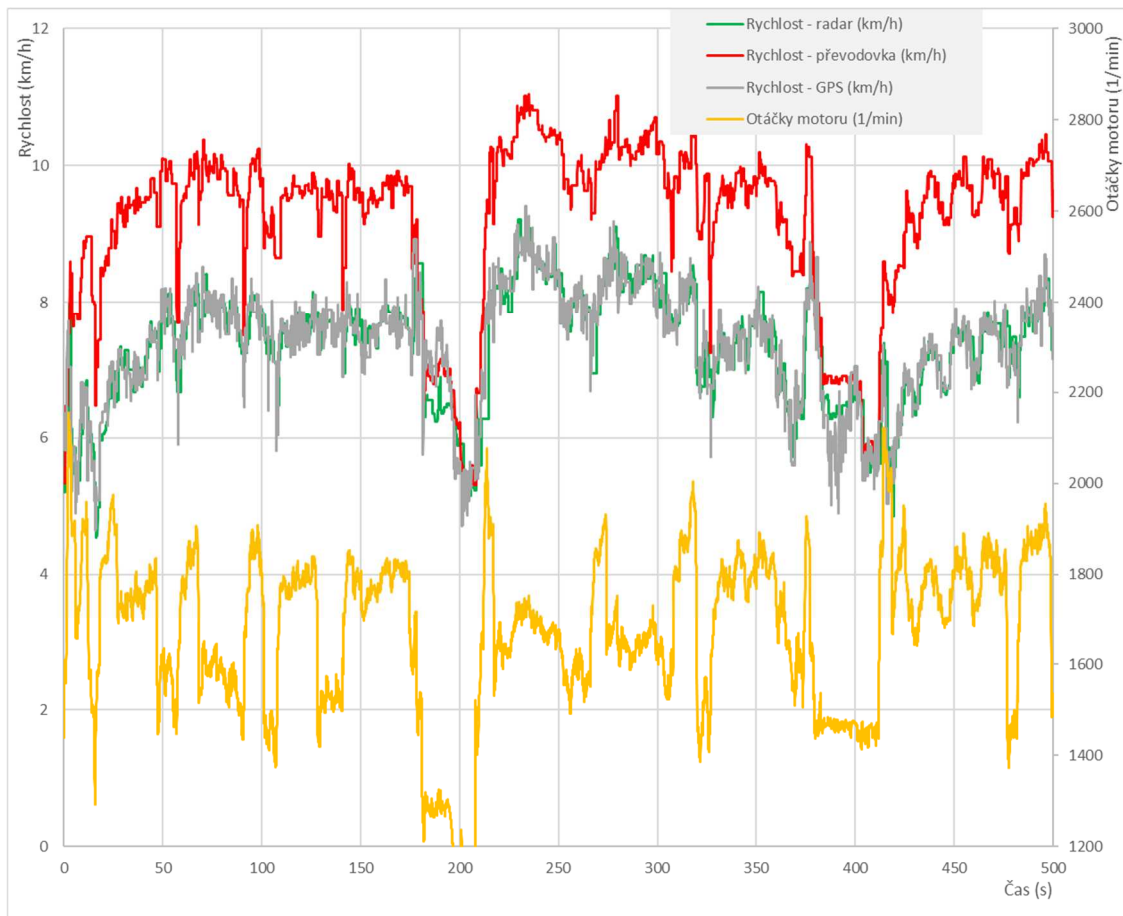


Obr. 18 Výsledky měření – srovnání rychlosti naměřené GPS s radarovou rychlostí

Tab. 5 Základní statistické vyhodnocení měření v tahových zkouškách

	Rychlost z radaru (km/h)	Rychlost od kol (km/h)	GPS rychlost (km/h)
Aritmetický průměr (km/h)	6,90	7,60	6,94
Směrodatná odchylka (km/h)	0,07	0,04	0,19
Variační koeficient (%)	1,06	0,55	2,78

V grafu na obr. 19 je průběh rychlostí v agregaci s kombinovaným kypřičem. Smyslem tohoto měření bylo v delším časovém úseku zjistit, zdali se nevyskytují anomálie v průběhu, které by měření zkreslovalo. Jak je patrné z grafu, korelace hodnot je dobrá a dostatečná pro standardní zkoušky.



Obr. 19 Graf průběhu rychlostí v agregaci s kombinovým kypřičem

6 Diskuse

Jak je patrné z měření, výsledky, které v polních podmínkách systém GPS dává z hlediska měření rychlostí, jsou vhodné a dostatečné s ohledem na přesnost pro tahové i další zkoušky. Při korelaci dat rychlosti naměřené radarem a GPS je patrná disproporce. Disproporce je způsobena použitím GPS přijímače, který má nižší vzorkovací frekvenci než radar, řešením by bylo použití přijímače s nižší frekvencí nebo změna vzorkování radaru. Při měření bylo zjištěno, že hodnoty prezentované převodovkou (od kol) jsou posunuty ofsetem, který je způsoben chybně nastavenými dynamickými poloměry kol v řídicí jednotce. Vzhledem k tomu, že na traktorech jsou použity kola jiných velikostí, tlaků a huštění bylo by nutné doplnit aktuální data do řídicí jednotky, poté by rychlost od kol nebyla zatížena ofsetem.

Pokud budou výsledky měření srovnány se studií Možnosti dynamických měření výkonových parametrů traktoru (Pexa a další, 2012), kde měření na základě GPS dat bylo použito jako substitute dynamometru, lze vyvodit, že přesnost GPS systému je dostatečná i pro další typy zkoušek. V současnosti, jak se systémy GPS rozvíjejí a zvyšuje se jejich přesnost a dostupnost, bude zajímavé sledovat jejich možné využití k podobným účelům nejen v zemědělství.

7 Závěr

Dle naměřených výsledků lze usoudit, že GPS současné generace dosahují již takové přesnosti při určování polohy, že je možné je v polních podmínkách používat jako alternativu pro měření rychlosti v zemědělských strojích. Ze statistického vyhodnocení získaných dat bylo zjištěno, že odchylka GPS rychlosti od radarové rychlosti traktoru je 0,04 km/h. V delším časovém úseku pak byl sledován průběh rychlostí v agregaci s kombinovaným kypřičem, kde bylo ověřeno, že se nevyskytují v měření anomálie, které by mohly výsledky měření pro standardní zkoušky zkreslovat.

Vzhledem k tomu, že Česká republika je evropskou zemí, dalo by se očekávat, že na našem území bude nejvhodnější používat GNSS systém Galileo, který je vyvíjen EU. Systém však stále není dokončený a přechod do fáze plné operační kapacity se zdá v nedohlednu. Nyní je dokončení plánováno okolo roku 2019-2020. Otázka je však, zda nebude tento termín opět posunut, protože se začínají hromadit problémy s vestavěnými atomovými hodinami, které by mohly značit závažnou systémovou chybu. Pokud se prokáže, že je potřeba všechny hodiny na družicích vyměnit, bude to velmi nákladné a časově náročné. Dokončení systému by to mohlo protáhnout klidně o dalších 5 let.

GPS je dnes tak rozšířený, že na něm začínáme být poměrně závislí. Problém spočívá v tom, že systém je náchylný na rušení signálu, tzv. jamming. Blokování nebo rušení signálu bez platného povolení nebo generální licence je dle Zákona o telekomunikacích zakázáno pod vysokou pokutou, ale prakticky se to těžko dokazuje. GPS ke komunikaci používá radiový signál, který je poměrně slabý, a tak se dá snadno blokovat nebo rušit pomocí rušičky. Rušička se dá koupit na zahraničních, ale i českých e-shopech za cenu od 500 Kč v závislosti na jejím výkonu. Díky její dostupnosti je pak poměrně rozšířená, zejména mezi řidiči aut. Nejčastěji se jedná o řidiče firemních aut vybavených sledováním, kteří nechtějí, aby zaměstnavatel věděl o jejich pohybu. Tito lidé si však neuvědomují, že mohou rušit signál ostatním uživatelům nebo složkám záchranného systému, a v případě výkonnějších zařízení i letecký provoz.

8 Seznam použité literatury

- Constellation Information. *European GNSS Service Centre*. [online]. 20.12.2016 [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: <https://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information>
- Constellation status. *GLONASS constellation status, 20.12.2016*. [online]. 20.12.2016 [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>
- Český kosmický portál. *Americký NAVSTAR GPS*. [online]. 2015a [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <http://www.czechspaceportal.cz/3-sekce/gnss-systemy/gnss-mimo-evropu/americky-navstar-gps/>
- Český kosmický portál. *GALILEO - Evropský globální navigační družicový systém*. [online]. 2015b [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <http://www.czechspaceportal.cz/3-sekce/gnss-systemy/galileo/>
- ČUPERA Jiří. Ústav techniky a automobilové dopravy (AF Mendelu). Fotodokumentace zkoušky traktoru. 2016
- Garmin Czech s.r.o.. *GARMIN. GPSMAP 64 PRO*. [online]. 2009-2013 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://www.garmin.cz/produkty/outdoor/rucni-gps/gpsmap-64-serie/gpsmap-64-pro.html>
- Glonass history. *Glonass history* [online]. 2016 [cit. 2016-11-11]. Dostupné z: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/index.php>
- GMV. GLONASS Ground Segment – Navipedia. *GLONASS Ground Segment*. [online]. 2011 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: http://www.navipedia.net/index.php/GLONASS_Ground_Segment
- GPS a komunikační protokol NMEA. 3 (*dekódování dat*). [online]. 10.10.2006 [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: <http://www.abclinuxu.cz/clanky/ruzne/gps-a-komunikacni-protokol-nmea-3-dekodovani-dat>
- GPS constellation status for 20/12/2016. *U.S. COAST GUARD NAVIGATION CENTER*. [online]. 20.12.2016 [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: <http://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>
- HAVLÍČEK Josef, Jaroslav Vlach, Martin Vlach, Viktorie Vlachová. *Začínáme s LabVIEW*. : BEN – technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.
- IGS MGEX BeiDou. *BeiDou*. [online]. 7.11.2016 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: http://mgex.igs.org/IGS_MGEX_Status_BDS.html

- KUČERA Tomáš. *Algoritmy výpočtu polohy, rychlosti a času z GNSS signálů*. Diplomová práce. VUT Brno. 2013
- MAI Thuy. *Global Positioning System History*. NASA. [online]. 5.5.2015 [cit. 2016-10-21]. Dostupné z:
http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS_History.html
- National Instruments: Testovací, měřicí a integrované systémy – National Instruments: *Popis produktu*. [online]. 2016 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z:
<http://www.ni.com/cs-cz.html>
- NCO. *GPS.gov. Control Segment*. [online]. 2016b [cit. 2016-10-25]. Dostupné z:
<http://www.gps.gov/systems/gps/control/>
- NCO. *GPS.gov. Space Segment*. [online]. 2016a [cit. 2016-10-24]. Dostupné z:
<http://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- PEXA Martin, Karel KUBÍN, Zdeněk KVÍZ a Karel MAYER. *Možnosti dynamických měření výkonových parametrů traktoru*. AgritechScience [online], 2012, roč. 6, č. 2, s. 1-7. [cit. 2016-12-02]. ISSN 1802-8942. Dostupné z:
<http://www.agritech.cz/clanky/2012-2-4.pdf>
- RAPANT Petr. *Geoinformační technologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava, 2005.
- REVNIVYKH, Sergey. CGSIC Meeting. *GLONASS Status and Progress*. [online]. 16.9.2008 [cit. 2016-11-15]. Dostupné z:
<http://www.navcen.uscg.gov/pdf/cgsicMeetings/48/Reports/International%20Subcommittee/%5B24%5D%20GLONASS%20CGSIC%2016.09.2008.pdf>
- Sensors. *Experimental Study on the Precise Orbit Determination of the BeiDou Navigation Satellite System*. [online]. 1.3.2013 [cit. 2016-12-20]. Dostupné z:
<http://www.mdpi.com/1424-8220/13/3/2911/htm>
- SICKLE J.V. *GPS for Land Surveyors, Fourth Edition*. Londýn: CRC Press, 2016. ISBN 9781466583108
- The Way Forward* [online]. 2016. [cit. 2016-11-18]. ISBN 978-92-1-101333-7. Dostupné z:
http://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2016/stspace/stspace67_0_html/st_space_67E.pdf
- WordPress.com. *GPS, GIS and their uses. General Technical Information*. [online]. 5.7.2013 [cit. 2016-10-21]. Dostupné z:

<https://shivkumardas.wordpress.com/agri-tech/an-introduction-to-gps-gis-and-its-uses-in-agriculture/>

Worldwide Vertical Guidance of Aircraft Based on Modernized GPS and New Integrity Augmentations. *Proceedings of the IEEE*, roč. 96, č. 12, str. 1918–1935, 2008