



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

DRUŽICOVÝ NAVIGAČNÍ SYSTÉM GLONASS 2018+ (STUDIJNÍ POMŮCKA)

SATELLITE NAVIGATION SYSTEM GLONASS 2018+ (STUDENT HANDBOOK)

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Karolína Navrátilová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Studentka: **Karolína Navrátilová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Profesionální pilot
Vedoucí práce: **doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Družicový navigační systém GLONASS 2018+ (studijní pomůcka)

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Charakteristika GLONASS.

Současný stav rozvoje GLONASS.

Místo GLONASS v navigačních metodách světového civilního letectví.

Směry budoucího rozvoje GLONASS po roce 2018.

Cíle bakalářské práce:

Shromáždit a stručně nastínit informace o principu činnosti GLONASS.

Popsat místo a použití GLONASS v navigačních systémech ve světě.

Charakterizovat tendence vývoje GLONASS po roce 2018.

Seznam doporučené literatury:

VOSECKÝ, S: Radionavigace, učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR - FCL-1, ISBN 978-80-7204-764-2, CERM Brno 2011.

<https://www.eurocontrol.int/>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Cílem předkládané bakalářské práce je vytvořit studijní pomůcku na téma globální družicový navigační systém GLONASS 2018+. Práce se zabývá jak samotným vývojem systému, tak jeho signály, navigačními zprávami a jednotlivými segmenty, které tvoří systém jako celek. Součástí je i přehled o soudobém vývoji a směru budoucího vývoje a také přehled navigačních metod, kde se využívá služeb systémů GNSS. Část práce je věnována vyvíjejícímu se evropskému družicovému systému Galileo a americkému systému GPS. Poslední kapitola se zabývá čtyřmi důležitými kritérii, tj. dostupností, integritou, kontinuitou a přesností, kde jsou porovnávány systémy GNSS.

Klíčová slova

GNSS, princip činnosti, navigační metody, GLONASS, stav rozvoje, budoucí vývoj, GPS, Galileo, dostupnost, integrita, kontinuita, přesnost.

Abstract

The aim of presented bachelor thesis is produce study aid on the topic global satellite navigation systém GLONASS 2018+. The work deals with the development of the system itself and signals, navigation messages and individual system segments, that makes up the system as a whole. The work also includes an overview of current development and direction of future development, as well as overview of navigation methods where the services of the GNSS are used. Part of the work is devoted the developing european's satellite system Galileo and american system GPS. The last chapter deals with four important criteria, i.e. availability, integrity, continuity and accuracy where the systems of GNSS are compared.

Keywords

GNSS, principle of operation, navigation methods, GLONASS, state of development, future development, GPS, Galileo, availability, integrity, continuity, accuracy.

Bibliografická citace

NAVRÁTILOVÁ, Karolína. *Družicový navigační systém GLONASS 2018+ (studijní pomůcka)*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133192>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Slavomír Vosecký.

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Slavomíru Voseckému, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé závěrečné práce.

V Brně dne 16.05.2021

.....
Karolína Navrátilová

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že svoji závěrečnou práci na téma Družicový navigační systém GLONASS 2018+ (studijní pomůcka) jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.“

Jako autorka uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 16.05.2021

.....
Karolína Navrátilová

Obsah

1. Úvod	7
2. Globální navigační družicový systém	8
2.1. <i>Struktura systémů GNSS</i>	<i>9</i>
2.2. <i>Principy určování polohy pomocí systémů GNSS</i>	<i>10</i>
2.2.1. Dálkoměrné metody měření	11
2.2.1.1. Kódová metoda měření.....	11
2.2.1.2. Fázová metoda měření.....	12
2.2.1.3. Dopplerova metoda měření.....	12
2.2.2. Trilaterace (výpočet polohy uživatele).....	13
3. Historie globální navigačního družicového systému.....	15
3.1. <i>TRANSIT</i>	<i>15</i>
3.2. <i>Vojenský Parus = civilní Tsikada.....</i>	<i>16</i>
4. GLONASS.....	18
4.1. <i>Etapy vývoje GLONASS.....</i>	<i>18</i>
4.1.1. Směr vývoje po roce 2018	21
4.1.2. Místo GLONASS v navigačních metodách.....	21
4.2. <i>Signály GLONASS</i>	<i>24</i>
4.2.1. FDMA signály	25
4.2.2. CDMA signály	26
4.3. <i>Navigační zpráva GLONASS.....</i>	<i>27</i>
4.3.1. Navigační zpráva FDMA.....	27
4.3.2. Navigační zpráva CDMA	28
4.4. <i>Segmenty GLONASS.....</i>	<i>29</i>
5. Používané systémy GNSS	32
5.1. <i>Galileo.....</i>	<i>32</i>



5.1.1. Etapy vývoje Galileo.....	32
5.1.2. Signály Galileo.....	33
5.1.3. Navigační zprávy Galileo.....	35
5.1.4. Segmenty Galileo.....	37
5.2. <i>Navstar GPS</i>	39
5.2.1. Etapy vývoje GPS.....	39
5.2.2. Signály GPS.....	40
5.2.3. Navigační zpráva GPS.....	42
5.2.4. Segmenty GPS.....	43
6. Zhodnocení systémů GNSS.....	45
6.1. <i>Dostupnost</i>	45
6.2. <i>Integrita</i>	48
6.3. <i>Kontinuita</i>	50
6.4. <i>Přesnost</i>	50
7. Závěr.....	52
Seznam použitých zkratk.....	54
Seznam zkratk v rovnicích.....	57
Seznam obrázků.....	58
Seznam tabulek.....	59
Seznam příloh.....	60
Seznam použité literatury.....	61
Přílohy.....	70

1. Úvod

Cílem této bakalářské práce je charakterizovat globální družicový navigační systém GLONASS, popsat jeho umístění mezi družicovými navigačními systémy v letectví a predikovat jeho možný vývoj. Z hlediska rychle postupující aktuální modernizace družicových navigačních systémů jsou mnohé informace vázány na krátké časové období. Princip funkce systémů však zůstane zachován i nadále.

Od prvního leteckého pokusu, který uskutečnili bratři Wrightové 17. prosince 1903, uplynulo do dnešních dnů již mnoho let. Od jejich počátečního návrhu letounu jsme se ovšem posunuli dál, než se v prvopočátcích létání vůbec mohlo zdát. Naopak na čem jsme dnes stejně závislí, jako bratři Wrightové tenkrát, je orientace v prostoru, a to ať už pomocí mapy a kompasu nebo moderněji s pomocí „glass cockpit“, tedy digitální elektroniky využívající i družicovou navigaci.

Samotné určení polohy a následné trasy má však kořeny již o mnoho staletí dříve a je to tzv. *navigace*, jejíž název je odvozen od slova *navigare* neboli „plavit se“ [92]. Lidé se v úplných prvopočátcích orientovali pouze podle tzv. orientačních bodů, které mnohdy tvořily kresby, primitivní stavby, přírodní úkazy a jiné. Později, počátkem mořeplavby ve starověku, se aplikovaly navigační metody „podél pobřeží“ nebo pomocí „stálých větrů“ či „směru vln“, z čehož byly následně tvořeny mapy. Na určení polohy byly používány olovnice, které sloužily k zaznamenávání hloubky (mapy s tzv. izobáty), a také k zaznamenání sedimentu ze dna, z čehož se vylučovací metodou určila možná poloha. K noční orientaci se využívaly hvězdy, které pomáhaly určit světové strany. Zásadním zlomem byl příchod kompasu, který vymysleli Číňané, neznámo kdy. Do Evropy se kompas dostal mezi 10. a 11. století n.l.

Novou navigační metodou 15. století, která pomohla určit polohu, se stala „nautická spočtení“ jejímž principem bylo pravidelné zaznamenávání kurzu a odhadu rychlosti. O století později se rychlost začala měřit pomocí lana s uzly, z čehož vyplynula, dodnes stále používaná, jednotka rychlosti v letectví *knot* [88]. Postupným vývojem přes chronometr, sextant či oktant se počátkem 20. století přešlo k využívání elektromagnetických vln. Jejichž objev teoreticky popsal James Clerk Maxwell v 19. století pomocí Maxwellových rovnic [89]. Poprvé byly elektromagnetické vlny v navigaci uplatněny začátkem 20. století (30. ~ 40. léta) na všesměrovém radiomajáku NDB a v radionavigačním systému LORAN. Ty byly však pro exponenciálně rostoucí počet uživatelů a jejich nároků nedostačující. Koncem 50. let 20. století došlo k vypuštění družice Sputnik I., která dala základ dnešním GNSS. Následným vývojem družicové navigace se zabírá kapitola 3.

Základní myšlenkou GNSS byla a je možnost navigace a s ní určení přesné polohy kdekoliv na Zemi, v kteroukoliv denní či noční hodinu. Jde o tzv. nezávislé určení polohy přijímače na vzdálenosti od vysílače oproti radionavigačním zařízením s omezeným dosahem.

Dnes je již pro mnohé nepředstavitelná absence GNSS v denním pořádku. Vzpomínky na rozsáhlé papírové mapy, které kolikrát svoji velikostí nenašly na malém prostoru řádné uplatnění a vyznat se, natož určit hned svoji polohu, bylo otázkou jisté zdatnosti a zběhlosti. Pro řadu z nás jistě rády zůstaly pouze dávnou vzpomínkou na letní dovolenou. A tak jednoduše se malá přenosná či zabudovaná zařízení s přijímačem GNSS stala součástí našich každodenních životů.

Tlak na výkon systému, přesnost a spolehlivost polohových údajů současně s modernizací systému a požadavky uživatelů jsou motivací všech vývojových center systémů GNSS.

2. Globální navigační družicový systém

Globální navigační družicový systém (*Global Navigation Satellite System*), dále jen GNSS, je označení pro skupinu umělých družic neboli satelitů, umístěných na oběžných drahách Země. Tyto družice poskytují globální pokrytí signálem, a tím uživateli umožňují přenos informací z kosmu na kterékoliv místo na Zemi. Zejména se jedná o určení aktuální polohy (její přesnost může být až v řádu jednotek metrů), času a rychlosti pohybu. Proto, aby data přenášená systémy byla spolehlivá a přesná, musí jednotlivé systémy splňovat řadu kritérií, mezi ty nejdůležitější patří:

- dostupnost – udává procentuální vyjádření času v intervalu 24 hodin, po které systém splňuje všechna dále uvedená kritéria, tzn. je schopný uživatele spolehlivě navigovat.
- integrita – je schopnost systému udržovat nastavený stupeň spolehlivosti a v případě detekce chyby v přenášených datech na ni včas upozornit.
- kontinuita – znamená fungování systému bez náhodného výpadku.
- přesnost – je parametrem udávajícím maximální možnou celkovou chybu měření systému od skutečných údajů [1][5].
- funkčnost – znamená splnění všech výše uvedených kritérií, bez kterých by systém nemohl být použit.

Mezi aktuálně funkční globální navigační satelitní systémy patří americký Navstar GPS (*Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System*), který má plné globální pokrytí od roku 1994 a ruský GLONASS (*GLOBALNAJA NAVIGACIONNAJA SPUTNIKOVAJA SISTĚMA*). Ten se na globální úrovni pohybuje až od roku 2011, i když na vývoji pracovalo již SSSR od roku 1976. Od roku 2020 se do skupiny globální navigačních systémů měly aktivně přidat projekty Galileo, který je pod záštitou Evropské unie a BeiDou, o jehož vývoj se zasadila Čínská lidová republika [13]. Nutností je podotknout, že je více zemí, které se pokusily navrhnout anebo realizovat globální navigační systém, například Francie pod názvem DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*) a Locstar nebo německý projekt Granas (*Global Radio Navigation Satellite*) [2][5].



Obr. 1 Složení systémů GNSS (převzato z [11] a upraveno)

2.1. Struktura systémů GNSS

Dnes již můžeme říci, že struktura jednotlivých globálních navigačních systémů je téměř stejná a obsahuje tři hlavní segmenty:

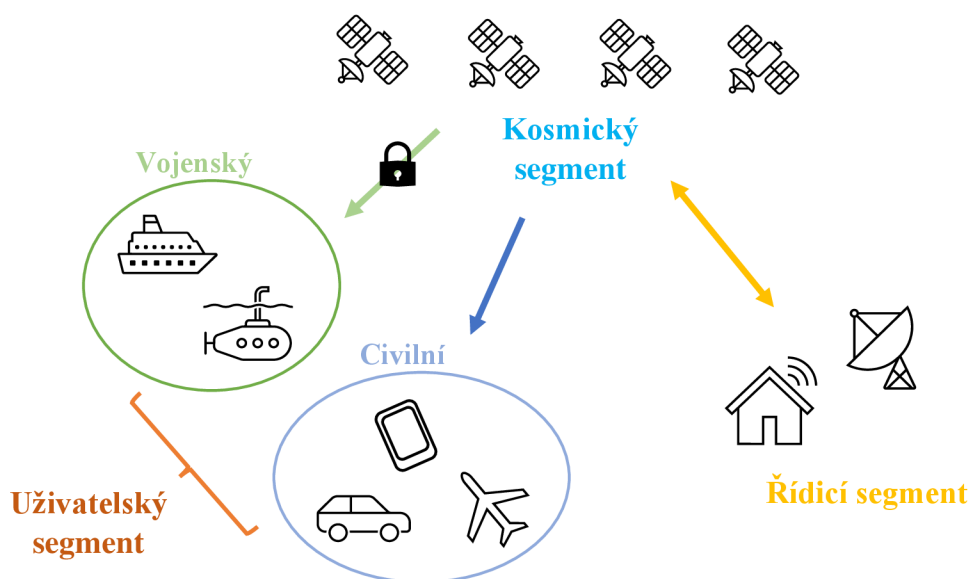
- a) kosmický,
- b) řídicí,
- c) uživatelský.

Kosmický segment je složen ze soustavy družic, obíhajících ve výšce přibližně 20 000 km okolo Země, kdy pomocí antén a vysílače jsou družice schopny vysílat a signál na Zemi. Nastavení tohoto segmentu je vždy dáno nároky uživatele a schopností realizace nároků řídicího segmentu.

Řídicí segment zahrnuje hlavní řídicí stanice, pozemní síť monitorovacích stanic a stanice pro komunikaci s družicemi.

- Hlavní řídicí stanice (angl. Control center) mohou být dvě, primární a záložní. Primární stanice zpracovává informace z monitorovacích stanic. Na základě získaných údajů upravuje parametry oběžných drah jednotlivých družic a podle potřeby provádí korekci času. Výsledné změny zasílá stanici pro komunikaci s družicemi.
- Monitorovací stanice (angl. Monitor station) jsou obvykle instalovány po celém světě na místa, která umožňují sledování maximálního počtu družic po co nejdelší možné dobu. Tyto stanice monitorují stavy družic a jejich signály, které dále putují do hlavní řídicí stanice.
- Stanice pro komunikaci s družicemi (angl. Up-link station) slouží k zasílání upravených dat, vytvořených řídicí stanicí, zpět k družicím.

Uživatelský segment je složen ze zařízení, zpracovávajících signály z družic GNSS, jejichž prostřednictvím zjišťujeme aktuální polohu, čas a rychlost pohybu. Zařízení sahají od smartphonů, přes turistické mobilní navigace až po specializované přístroje [7], [8], [12].



Obr. 2 Schéma struktury GNSS

2.2. Principy určování polohy pomocí systémů GNSS

Principů, jak můžeme určit svoji polohu pomocí družic je více. Vždy se ale vychází z předpokladu, že se měří vzdálenost mezi družicí, jejíž poloha je známá, a uživatelem, jehož poloha je neznámá. Systém přitom může být založen na dvou způsobech měření vzdálenosti:

- a) aktivním měření vzdálenosti,
- b) pasivním měření vzdálenosti.

Aktivní měření vzdálenosti (Obr. 3b) by pro všechny uživatele znamenalo mít kromě přijímače i dotazovač. V reálu by dotazovač uživatele vždy vyslal signál tzv. dotaz, který by obsahoval příslušný kód přijímače. Přijímač družice by signál zpracoval a odpovídačem by, po přesně definované době, poslal tzv. odpověď zpět uživateli. Na základě zpoždění příjmu odpovědi by obvody přijímače zjistily vzdálenost, kterou signál urazil, a vydělily by ji dvěma. Aktivního měření vzdálenosti je využito např. u DME.

$$d_k = \frac{t_p \cdot t_d}{2} \cdot c \quad (2.1)$$

, kde d_k ... konečná vzdálenost,

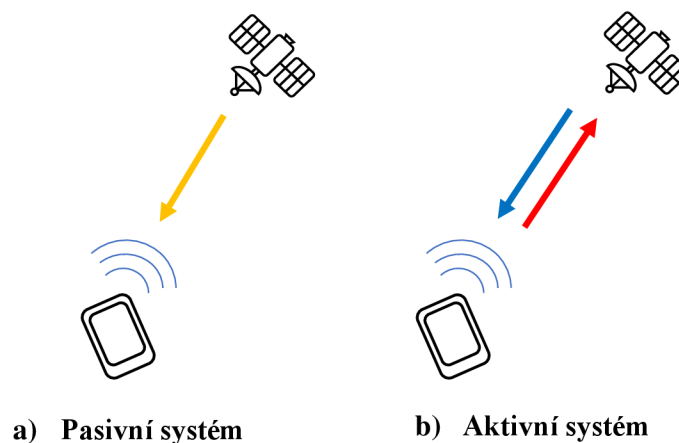
t_p ... doba přenosu signálu přijímač-družice,

t_d ... doba přenosu signálu družice-přijímač,

c ... rychlost šíření rádiových vln \approx rychlost světla $3 \cdot 10^8$ m/s.

Pasivní měření vzdálenosti (Obr. 3a) je oproti aktivnímu měření jednodušší, avšak zde musíme brát v úvahu synchronizaci času. Problematika synchronizace času bude rozebrána v následující podkapitole. Měření je založeno na vysílání signálu přímo z družic. Přijímač na základě vygenerování kopie kódu dané družice z paměti, který synchronizuje s příchodem signálu, určí časový interval mezi odesláním a příjmem kódu. Vynásobením časového intervalu rychlostí šíření rádiových vln přijímač dostane vzdálenost přijímač-družice.

Ve chvíli, kdy by systémy GNSS pracovaly jako aktivní systémy, by docházelo k přehlcení systému, což je nepřijatelné jak pro civilní, tak vojenský sektor [8] [11].



Obr. 3 Schéma funkce a) pasivního systému b) aktivního systému

2.2.1. Dálkoměrné metody měření

2.2.1.1. Kódová metoda měření

Metoda je založena na měření vzdálenosti mezi družicemi a přijímačem pomocí signálu z družic. Jednotlivé signály, přesněji dálkoměrné kódy, jsou základem určení času vyslání jednotlivých částí kódů vysílačem družice. Přijímačem jsou ve vstupních obvodech identifikovány dálkoměrné kódy jednotlivých družic, ze kterých je zjištěn čas odeslání a čas příjmu. Z toho přijímač určí časový rozdíl Δt_i na základě jehož, je schopen určit vzdálenost d_i , tj. vzdálenost mezi přijímačem a družicí. Za ideálního stavu, který znázorňuje Obr. 4a by byla vzdálenost získána dosazením do jednoduché rovnice [8]:

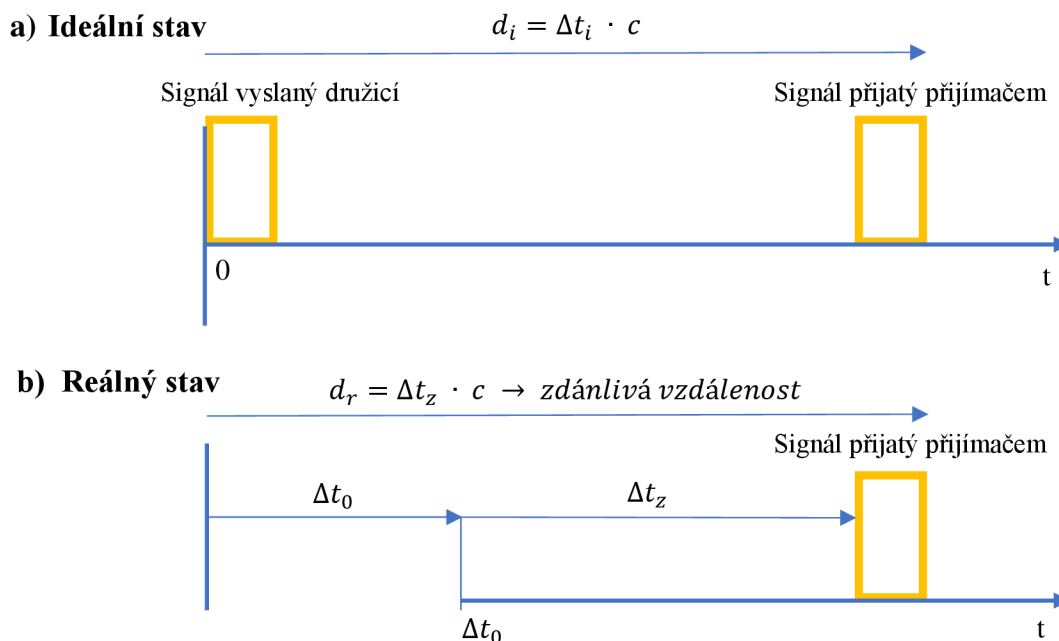
$$d_i = \Delta t_i \cdot c \quad (2.2)$$

, kde d_i ...vzdálenost za ideálního stavu,

Δt_i ...časový rozdíl mezi vysláním a příjmem signálu,

c ...rychlost šíření rádiových vln \approx rychlost světla $3 \cdot 10^8$ m/s.

Zde však nastává ne jeden problém. Čas, se kterým pracují družice není shodný s časem přijímače, resp. přijímač není schopen synchronizovat svůj generátor času s generátorem času družice. Stabilita frekvence atomových hodin je asi milionkrát vyšší než stabilita frekvence hodin přijímače. Pokud by se oscilátor přijímače dopustil při měření chyby půl microsekundy, poloha by byla určena s přesností 150 m, což je nepřijatelné. Přijímač je schopný určit opakovací periodu chodů dálkoměrných kódů, ale nikoliv přesný moment, kdy jednotlivé kódy byly družicí vyslány. Vypočtenou vzdálenost d_r proto nazýváme „zdánlivou vzdáleností“ (viz. Obr. 4b)



Obr. 4 Skutečnost kódových měření (převzato z [2] a upraveno)

Pro přesná i standardní měření, ale potřebujeme vědět polohu co nejpřesněji. Z toho důvodu vstupuje do výpočtu polohy, kromě třech neznámých souřadnic polohy přijímače, i neznámý čas Δt_0 , který určuje začátek vyslání kódu. Pro lepší představu lze využít Obr. 4b. Protože však oscilátory v přijímačích jsou nestabilní a nejsou schopny mít přesně stejnou opakovací periodu kódů, jako mají družice mění se časový údaj Δt_0 pro každou družici v každém opakovacím cyklu. Rovnice vzdálenosti přijímač-družice opravená o hodnotu Δt_0 vypadá následovně:

$$d_s = \Delta t_z \cdot c + \Delta t_0 \cdot c \quad (2.3)$$

, kde d_s ...skutečná vzdálenost družice-přijímač,
 Δt_z ...zdánlivý čas chodu signálu,
 Δt_0 ... časový posun mezi časem přijímače a časem systému.

Avšak ani v tento moment se nejedná o jasně a pevně daná čísla. Měření vychází z předpokladu, že může dojít k „zanedbatelné“ chybě při zpracovávání informací v obvodech přijímače. V měřeních není zahrnuta chyba např. ionosféry a také místa, kde se v okamžik měření přijímač nachází [8][11][25].

2.2.1.2. Fázová metoda měření

Metoda je postavena na sledování nosné vlny signálu družice, kdy přijímač při fázových měřeních počítá vlnové délky nosné vlny na trase družice-přijímač. Počet vlnových délek se skládá z celých vlnových délek a také z jejich desetinných částí. Zatím co ale desetinné části nosné vlny jdou přijímači určit bez problému, s počtem celých vlnových délek už to tak jednoduché není. Problém v jejich určení je nazýván „celočíslná nejednoznačnost“ a jeho řešení je poměrně náročné. Na toto téma již bylo vypracováno mnoho studií, které se zabývají možným řešením, např. zdroj [90] věnuje část své práce řešení této problematiky.

V okamžiku, kdy přijímač poprvé určí hodnotu celočíselné nejednoznačnosti může následně určovat změny fázového posunu, počty celých vln a sledovat změny svojí polohy. Pokud dojde k přerušení nosné vlny, tzv. fázovému skoku, vlivem zastínění antény nebo oslabení signálu, musí přijímač znovu začít měřit od současného fázového posunu a s tím určit i novou celočíselnou nejednoznačnost.

Velikosti vlnových délek nosných vln signálů družic se pohybují v řádech počátečních desítek centimetrů. Aplikujeme-li korektnost měření 1 až 2 % vlnové délky dostaneme přesnost měření polohy v řádech milimetrů [8].

2.2.1.3. Dopplerova metoda měření

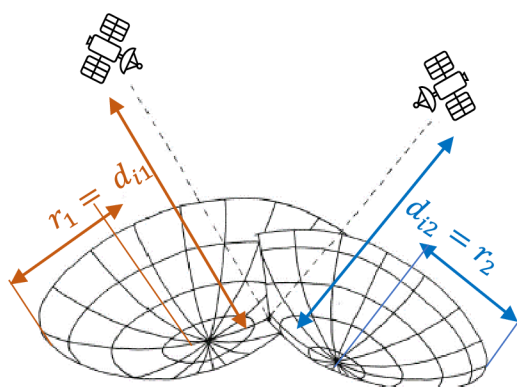
Princip měření spočívá ve využití Dopplerova jevu neboli frekvenčního posunu, který se mění na základě relativního pohybu družice vůči přijímači. V reálu je signál družice měřen po danou dobu přijímačem, který je schopen zjistit změny frekvence přijímaného signálu, a s tím zjistit svoji rychlost pohybu a polohu místa, kde se nachází.

I když z této metody jde určit polohu a rychlost pohybu přijímače, používá se hlavně ve dvourozměrném prostoru, např. v námořní navigaci. Pro leteckou navigaci byl tento způsob měření používán jako korekční prvek pro jiné navigační systémy [2][7][8].

Na principu měření Dopplerova posunu frekvence fungovaly systémy TRANSIT nebo Parus.

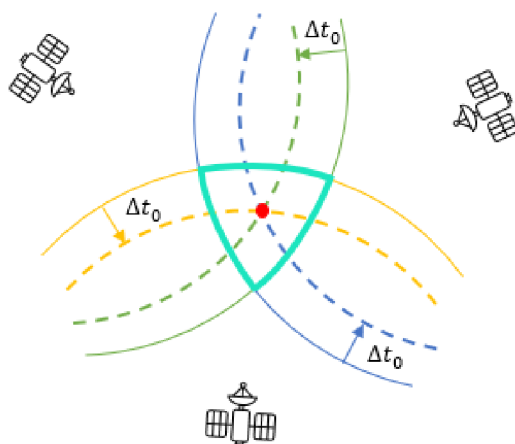
2.2.2. Trilaterace (výpočet polohy uživatele)

Kdyby šlo považovat měření vzdáleností přijímač-družice za naprosto přesná tzn. neexistovala by nesynchronnost času (viz kapitola 2.2.1.1.), ani neexistovalo nic, co by signál ovlivňovalo (např. průchod ionosférou, náhodný šum), stačily by na určení polohy tři družice. To znamená, že by se přijímač vždy nacházel na kulové ploše s poloměrem r_1 až r_3 , o stejné velikosti, jako vzdálenosti přijímač-družice d_{i1} až d_{i3} . Poloha přijímače by byla v bodě vzniklém protnutím kulových ploch (pro lepší představu lze využít Obr. 5, který znázorňuje určení polohy pomocí dvou družic). V praxi vzniknou body dva, jeden bod je však vzdálen tisíce kilometrů daleko (lze říci, že se nachází v nekonečnu) od povrchu Země, a tedy nebrán v úvahu.



Obr. 5 Určení polohy přijímače pomocí dvou družic (převzato z [8] a upraveno)

Vlivem nesynchronnosti času, fyzikálních vlivů a obvodu přijímače se ideálnímu, výše popsanému stavu, nelze přiblížit. Na určení polohy má však největší vliv časová nesynchronnost. Pro její eliminaci byla zavedena čtvrtá neznámá Δt_0 , která udává posun mezi časem přijímače a časem družice. Pokud by časový posun vynásobený rychlostí světla $\Delta t_0 \cdot c$ nebyl zaveden, vznikl by místo jednoho určitého bodu, kde by se přijímač nacházel, trojúhelník s mnoha možnostmi polohy, jak lze vidět na Obr. 6¹.



Obr. 6 Závislost časového posumu Δt_0 na poloze

¹ Na Obr.6 je brána v úvahu pouze ideální geometrie, tzn. polohové čáry se protínají pod úhlem 90° . Pokud je geometrie nerušená, tzn. polohové čáry se protínají pod jinými úhly, roste polohová chyba měření. Pro více informací lze využít literární zdroj [25].

Po zavedení neznámé Δt_0 vznikne soustava tří rovnic o čtyřech neznámých. Z tohoto důvodu je nutné do výpočtu zahrnout i čtvrtou družici. Výslednou polohu tedy zjistíme dosazením jednotlivých údajů do čtyř rovnic o čtyřech neznámých.

$$d_1 = \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2} + \Delta t_0 \cdot c \quad (2.4)$$

$$d_2 = \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2} + \Delta t_0 \cdot c \quad (2.5)$$

$$d_3 = \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2} + \Delta t_0 \cdot c \quad (2.6)$$

$$d_4 = \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2} + \Delta t_0 \cdot c \quad (2.7)$$

, kde $d_1, d_2, d_3, d_4 \dots$ zdánlivé vzdálenosti přijímač-družice,

$X, Y, Z \dots$ souřadnice polohy přijímače,

$x_i, y_i, z_i \dots$ souřadnice polohy družic,

$\Delta t_0 \dots$ časový posun mezi časem přijímače a časem systému,

$c \dots$ rychlost šíření rádiových vln \approx rychlost světla $3 \cdot 10^8$ m/s.

Výsledným řešením rovnic je stanovena poloha přijímače vzhledem ke středu Země, tj. v geocentrickém souřadnicovém systému. K určení polohy na povrchu Země je však nutné převést geocentrické souřadnice do geografických a respektovat i profil terénu v místě polohy pod letadlem [2], [6] a [8].

3. Historie globální navigačního družicového systému

Začátek vývoje GNSS se připisuje 60. létům 20. století. Myšlenky družicové navigace se objevují již v průběhu první poloviny 20. století, avšak pro realizaci nebyla elektronika dostatečně vyspělá. Vynález tranzistoru, jako polovodičové součástky, v roce 1947 znamenal velký pokrok v tomto odvětví. Následná snaha o minimalizaci rozměrů vedla ke vzniku integrovaných obvodů, které podpořily další vývoj [2][3].

Velkým zlomem pro vývoj GNSS byl rok 1957, kdy došlo k vypuštění první umělé družice Sputnik I. Signály, které byly z družice přijímány, položily základy vývoji družicové navigace na principu Dopplerova posunu frekvence. Vycházelo se ze zjištění, že pokud je známá poloha přijímače je možné zjistit parametry oběžné dráhy při prvním průletu družice, právě na základě Dopplerova posunu. Toto zjištění na sebe nenechalo dlouho čekat. Za nedlouho bylo na stejném základě, ale opačném principu, tzn. známé jsou parametry oběžné dráhy a poloha družice a neznámá je poloha přijímače, spuštěn vývoj prvního družicového navigačního systému TRANSIT [8].

Jako podklady pro následující kapitoly byly použity literární prameny [2], [4], [8], [9] a [15].

3.1. TRANSIT

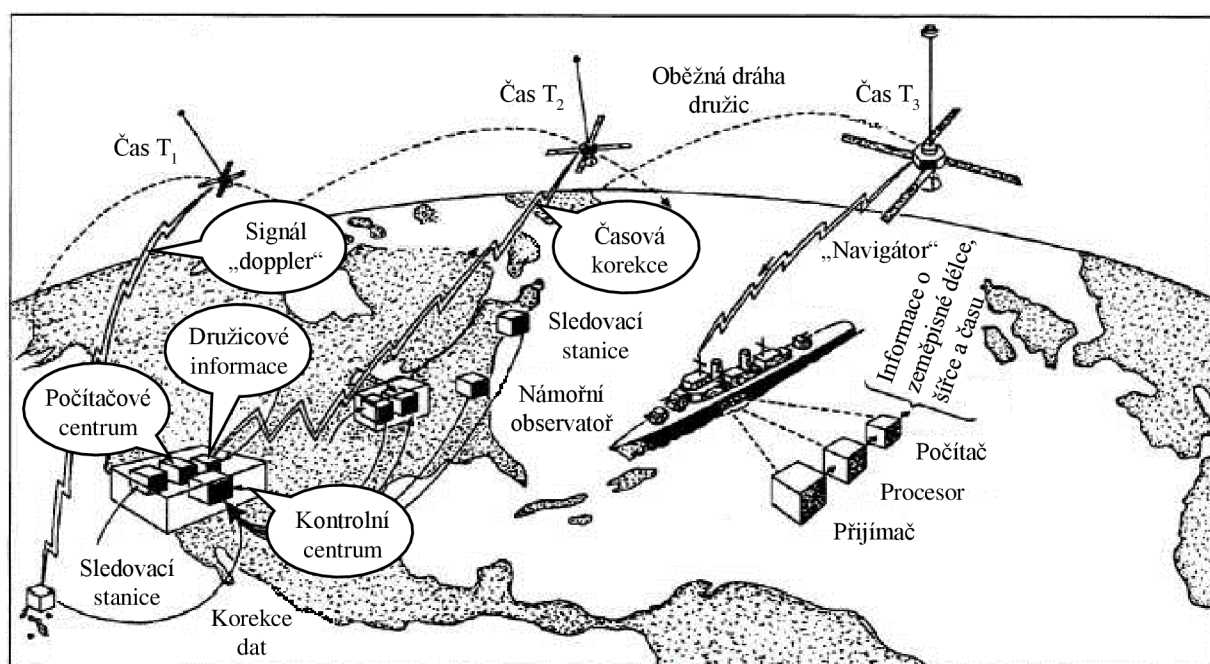
Přelom 50. a 60. let se nese ve znamení vývoje prvního dopplerovského družicového navigačního systému TRANSIT, známého také jako NNSS. Ten byl určen hlavně pro potřeby amerického námořnictva, čímž byl vývoj do jisté míry ovlivněn.

První družicový prototyp, Transit 1A, byl vypuštěn v září 1959. Mise byla ovšem neúspěšná, družice se nedostala na oběžnou dráhu Země. Druhý prototyp, Transit 1B, byl úspěšnější a o rok později, 13. dubna 1960, se dostal do výšky 1075 km. Ve stejný rok byly uskutečněny první úspěšné zkoušky systému. Samotný systém byl spuštěn roku 1964. Pro civilní sektor byl zpřístupněn až v roce 1967, zde se využíval zejména pro námořní potřeby. Nevýhodou systému byly dvourozměrné souřadnice, což znemožnilo systém plnohodnotně používat v letecké navigaci, proto zde byl použit jako korekční prvek pro navigační systémy.

TRANSIT obsahoval 6 družic z toho 3 pracovaly aktivně a 3 byly v záloze na oběžné dráze. Družice pracovaly ve výšce 1075 km (nízká oběžná dráha – LEO) a jeden oběh Země trval přibližně 1 hodinu a 47 minut, přičemž zachycení signálu trvalo nejdéle 18 minut. Poté se muselo čekat na opětovné zachycení, mnohdy, až několik hodiny. Vzhledem ale k hlavnímu využití nebyly v té době, leckdy dlouhé intervaly, považovány za velký problém.

Vysílací kanály pracovaly na kmitočtech $149,988 \approx 150$ MHz (velmi krátké vlny, dále jen VHF) a $399,968 \approx 400$ MHz (ultra krátké vlny, dále jen UHF). Řídící segmenty, které byly pouze na území USA, upravovaly informace, skládající se z opravy času a oběžné dráhy družic, jednou za 12 hodin. Přesnost zaměření se s postupem času vyvíjela od původních stovek až po desítky a jednotky metrů. Počáteční chyby systému pramenily z nepřesných korekčních informací, posílaných družicemi. To bylo později zdokonaleno umístěním stanice na jasně danou polohu, která dokázala určit odchylku informací. Systém dokázal určit přesný čas na kterémkoli místě na světě.

Roku 1996, po více než 30 letech aktivní funkce, byl systém uveden mimo provoz.



Obr. 7 Popis funkce systému TRANSIT (převzato z [10] a upraveno)

Na tento úspěšný systém navázal v roce 1972 navigační systém Timation. Zkušenosti z obou systémů přispěly k budoucímu projektu Navstar GPS.

3.2. Vojenský Parus = civilní Tsikada

Navigační systém, vytvořený v první polovině 70. let 20. století, téměř obdobný výše zmíněnému systému TRANSIT, vytvořila ruská, dříve sovětská, armáda. První družice, pracující na kmitočtech 150 MHz (VHF) a 400 MHz (UHF), jejichž měření polohy bylo založeno na Dopplerově jevu, byly v utajení vypuštěny roku 1967. Tento program měl nést jméno Parus. Civilní Tsikada, ekvivalent vojenského Parusu, byla zaměřena na obchodní námořní dopravu a pro Akademii věd. Její vývoj začal v roce 1974, v době, kdy měla již být uskutečněna velká většina přípravných prací v rámci vojenského programu Parus. Během doby existence bylo na oběžnou dráhu vypuštěno přes 130 družic, avšak složení konstelace bylo pouze ze čtyř družic, umístěných na nízké oběžné dráhy ve výšce 1 000 km nad Zemí. Schopnost určovat polohu se pohybovala v řádech stovek metrů. Malá přesnost a špatné pokrytí neumožňovalo poskytovat zvyšující se nároky na navigaci.

Je možné se domnívat, že Tsikada byla pouze záminkou pro utajení systému Parus, který oficiálně Rusko nikdy nepřiznalo. Toto tvrzení podporuje fakt, že zdroj [15] uvádí cituji -
„Tsikada poskytovala navigaci jak pro sovětské námořnictvo, tak pro komerční lodní dopravu.“

Systém je předchůdcem vyspělejšího globálního navigačního systému GLONASS, o kterém bude více popsáno v následující kapitole 4.

V minulosti bylo více pokusů o vývoj GNSS napříč všemi kontinenty. Ty se však dostaly mnohdy jen do stádia přípravných testů nebo zůstaly v tzv. papírové podobě.

Tab. 1 Projekty nerealizovaných GNSS

Geostar	Mělo se jednat o zpoplatněný civilní navigační systém. Americká společnost však zkrachovala.
Locstar	Myšlenka západoevropských zemí. Projekt nebyl nikdy realizován.
Granat	Německý projekt. Realizovány jen počáteční testy.
Navsat	Evropský návrh vesmírné agentury ESA

4. GLONASS

GLOBALNAYA NAVIGATSIONNAYA SPUTNIKOVAYA SISTEMA je ryze Ruský globální navigační družicový systém, o jehož vývoj se zasadilo ruské ministerstvo obrany, dříve Sovětský svaz. Stejně jako GPS byl i GLONASS vyvíjen pro vojenské potřeby a je také jeden ze dvou plně funkčních systémů GNSS na světě, jehož předchůdcem byl navigační systém Tsikada.

Práce na projektu GLONASS začaly v roce 1970, hlavním cílem byla možnost přesné navigace kdekoli na Zemi. O šest let později, roku 1976, byl projekt schválen a z papírových 2D verzí se během krátké doby staly skutečné družice ve vývojových centrech, první odstartovala roku 1982. Plné operability, tedy 24 družic na oběžné dráze, bylo dosaženo rokem 1995. Životnost družic byla velmi krátká, 3 až 4 roky, maximálně. Během následujících let v důsledku hospodářské krize vznikla řada problémů, kdy bylo financování kosmického projektu GLONASS omezeno. Vyvrcholení přišlo na přelomu tisíciletí, v kosmickém segmentu se nacházelo pouze 6 funkčních družic (pozn. literární pramen [2] uvádí 8 družic, literární pramen [55] uvádí 7 družic). Možnost využití v praxi byla prakticky nulová.

Rozhodnutí o znovuoobnovení celého systému přišlo v roce 2001 na základě speciální programu „*Federal Dedicated Program Global Navigation System – 2002-2011*“, který měl zajistit dostatek financí na obnovu systému GLONASS do 10 let. První výsledky byly vidět v roce 2003, kdy je vypuštěna, po dlouhé pauze, první družice.

Konstelace 24 družic dosáhl systém v roce 2011. Do provozu byl systém oficiálně uveden až v roce 2015 [2], [16], [54], [55] a [56].

Z pohledu civilního užívání, rozdíly v určování polohy systémem GLONASS nebo systémem GPS nejsou pro normální používání významné, a jde spíše o odlišnosti v řádech desítek centimetrů. Avšak pro celkově přesnější určení polohy je vhodné mít přijímač s možností kombinací signálů od více systémů, čímž se zaručí větší přesnosti.

Pro následující kapitolu budou použity literární prameny [16], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61] a [62].

4.1. Etapy vývoje GLONASS

- **Generace 0 1982 ~ 1985 „fáze experimentálního testování“**

V říjnu roku 1982 došlo k vypuštění první testovací družice *Block I* na oběžnou dráhu Země a během následujících 3 let bylo do vesmíru vyneseno dalších 18 družic. První testovací konstelace, která obsahovala 4 družice, byla dosažena do konce roku 1984.

Nevýhodou těchto družic byla velmi krátká životnost, navrhována pouze na dobu jednoho roku. Nad očekávání se však průměrná životnost družic pohybovala okolo 14 měsíců.

- **Generace I. 1985 ~ 2005 „GLONASS“**

Hlavním rozdílem mezi družicemi generace 0 a generace I. bylo prodloužení provozní životnosti. Generace I. se dělila na typy družic *Block IIa*, *IIb* a *IIc*. U družic *Block IIc*, vysílaných na oběžnou dráhu od roku 1988, se životnost prodloužila na 3 roky, v provozu se však nakonec pohybovaly až 5 let. (pozn. družice *Block IIa* měly stejnou konstrukci jako *Block I* a jejich životnost měla být také pouze jeden rok, průměrně se však v provozu vyskytovaly až 17 měsíců). S generací I. došlo k časovým a frekvenčním úpravám standardů včetně zvětšení frekvenční stability o jeden řád. Družice *Block IIc* byly vysílány až do roku 2005.

V roce 1988 Sovětský svaz oznámil, že družicový navigační systém bude volně přístupný i široké veřejnosti. Samozřejmě byl vyhrazený vysílací signál pro civilní používání. Po zániku Sovětské svazu, roku 1991, vytvořilo nově vzniklé Rusko konstelaci 10 ~ 12 družic, která měla za úkol ověřit funkčnost systému. Ruský prezident, Boris Jeltsin, po ukončení testů, roku 1993, prohlásil systém za plně funkční.

Během počátečního vývoje systému se došlo ke zjištění, že signály z družic ve vysílacím pásmu 1 610,6 ~ 1 613,8 kHz interferují² se signály pro radioastronomická pozorování, což byl značný problém. Až po protestech mezinárodní vědecké komunity Rusko, roku 1993, odsouhlasilo úpravu vysílacích signálů, aby nadále nedocházelo k interferencím. Součástí souhlasu byl i celkový přesun signálů z frekvencí přiřazeným radioastronomickým pozorování.

Konečné konstelace 24 družic bylo úspěšně dosaženo koncem roku 1995, po umístění posledních tří družic. Začátkem roku 1996 byl systém GLONASS prohlášen za plně funkční. Problémy nastaly, když starší družice začaly selhávat a nové se na orbity nevysílaly tak často, jak bylo původně plánováno, tj. nejméně dvě vyslání družic ročně (pozn. během let 1996 až 2001 byly vyslány pouze dvě sady po třech družicích, což nestačilo k udržení konstelace o počtu 24 družic). Úpadek systému byl následkem hospodářské krize v Rusku, která značně omezila financování kosmického průmyslu. Možným řešením se zdálo uzavření dohody s Evropskou unií, kde se jednalo o zařazení programu GLONASS pod vyvíjející se program Galileo nebo s Čínou o možném spolufinancování programu GLONASS. Ani jedno z možných řešení se neuskutečnilo a systém zůstával nadále nečinný s nejnižším obsazením 6 družic v konstelaci k roku 2001. Ruská vláda na základě federálního programu „*Global Navigation System – 2002-2011*“ oznámila v roce 2001 znovuoobnovení systému GLONASS, a to nejspíše do 10 let.

- **Generace II. 2003 ~ 2016 „GLONASS – M³“**

Druhá generace družic byla vyvíjena od roku 1990. K jejich prvnímu vyslání na oběžnou dráhu došlo až roku 2003 a poslední roku 2016 (lze se domnívat, že dlouhodobý vývoj byl zpříčiněn hospodářskou krizí). Vybavení družic sice bylo modernizováno (odrazové plochy pro laserové měření – geodetické účely, přesnější atomové hodiny, ...), ale model stále vycházel z předešlé série „GLONASS“. Součástí modernizace byl nový vysílací signál FDMA⁴ pro civilní uživatele, u posledních 8 družic signál CDMA⁵. Provozní životnost družic byla navrhována na 7 let.

První výsledky federálního programu byly vidět již v roce 2003, kdy došlo k vyslání družice „GLONASS – M“ na oběžnou dráhu. Během dalšího 1,5 roku provedlo Rusko 31 startů s 81 družicemi, z čehož pouze 2 družice byly typu „M“. Z 81 vyslaných družic bylo konce roku 2005 funkčních 14. Následující roky se ekonomika prudce zvedla a financování kosmického programu GLONASS se zdvojnásobilo, tj. na 320 milionů USD.

² Jde o vzájemné ovlivňování signálů, které se na přijímači střetávají a způsobují zesilování nebo zeslabování signálu a směšování frekvencí.

³ Označení „M“ je zkratkou „modernizace“.

⁴ FDMA je zkratkou pro Frequency Division Multiple Access. Tento přístup znamená, že každé družici je přidělena frekvence z určitého vysílacího pásma tzv. frekvenční dělení, ale všechny družice mají stejný PRN kód. Signály FDMA využívaly staré typy družic GLONASS, od typu „M“ začaly všechny družice vysílat i CDMA signály. Dnes je dělení podle FDMA již zastaralé a jeho náhradou je CDMA [63].

⁵ CDMA je zkratkou pro Code Division Multiple Access. Vysílání je založeno na rozdílných PRN kódech, přičemž družice vysílají na jednom nosném signálu. Každá družice má svůj vlastní nezaměnitelný PRN kód, aby nemohlo dojít k záměně a tím i k chybám v měření (viz kapitola 2.2.1) [63].

Prezident, Vladimir Vladimirovich Putin, v roce 2007 zrušil omezení pro civilní uživatele a signál, dříve určený jen pro armádu, zpřístupnil i civilním uživatelům. Přesnost určení polohy vzrostla na 10 m (do té doby se přesnost pohybovala v řádu 30 m).

S rokem 2008 bylo 16 družic na oběžných dráhách, z toho 4 ve fázi testování a 12 v plném provozu. Na pokrytí Ruska to však stále nestačilo, minimální počet družic v provozu by musel dosáhnout 18. Oznámení plné operability, tedy 24 správně umístěných a provozuschopných družic, přišlo v roce 2011, o rok později, než se předpokládalo. Oficiálně byl systém uveden do provozu až o 4 roky později, tedy v roce 2015 a navíc se 3letým zpožděním. I přes 100 % funkčnost kosmického segmentu byly důvodem zpoždění testy pozemní infrastruktury, které nespĺňovaly počáteční požadavky Ministerstva obrany. V průběhu 4 let byl kosmický segment využíván pro vývojové a vědecké práce.

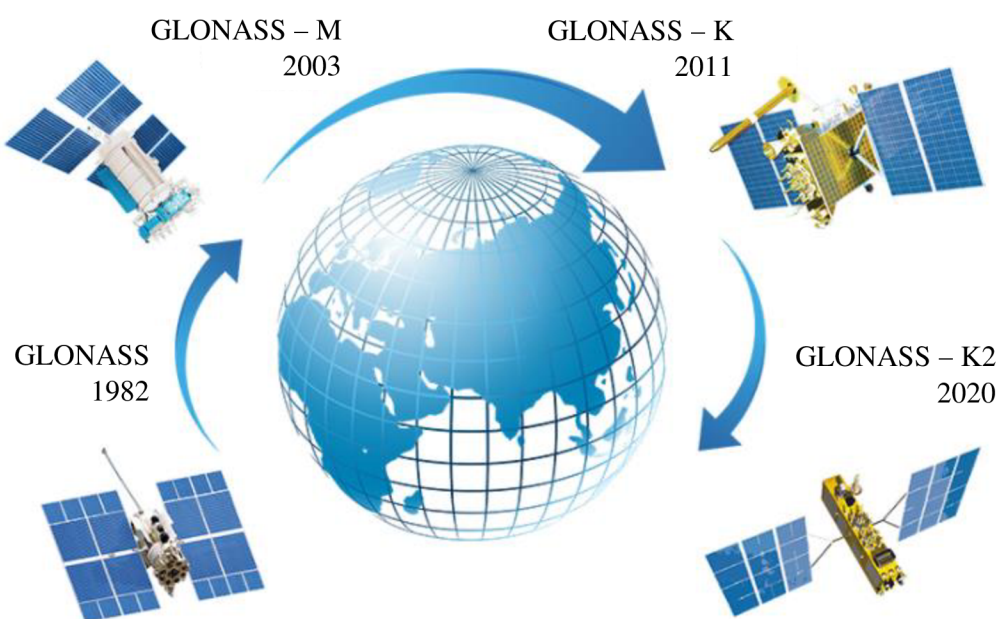
- **Generace III. 2011 ~ 2018 „GLONASS – K“**

V pořadí třetí generace družic byla poprvé vyslána oběžnou dráhu v roce 2011 a naposledy 25. října 2020.

Družice „K“ jsou vybaveny modernějším zařízením, které umožňuje práci ve vakuu, čímž je hmotnost družic, díky absenci přetlakového zařízení, snížena téměř o 35 % dosavadní hmotnosti, tj. na 935 kg. Nově byla prodloužena provozní životnost na 10 let a přidány další civilní signály. Všechny družice již umí vysílat typ signálu CDMA. Modernizací prošla i navigační zpráva. Družice typu „K“ jsou také prvními typem družic GLONASS obsahující systém Cospas-Sarsat⁶ (SaR), který přijímá nouzové signály.

- **Generace IV. 2017 + „GLONASS – K2“**

Družice „K2“ jsou poslední a nejnovější družice, které se nachází ve stavu vývoje. Modernizace by se měla dotknout všech částí družice, od přesnějších atomových hodin přes avioniku až po solární panely. Plánovaný vzhled a vývoj družic lze vidět na Obr. 8. První vyslání družic je naplánováno na rok 2022. Opět by měly přibýt přidány další navigační signály, jejíž počet by se tímto zvedl na 9.



Obr. 8 Vývoj družic systému GLONASS (převzato z [60] a upraveno)

⁶ Cospas Sarsat je družicový mezinárodní záchranný systém, který lokalizuje rádiové nouzové signály.

4.1.1. Směr vývoje po roce 2018

Směr vývoje po roce 2018 je zaměřen na novou generaci družic „K2“, která by měla přinést větší přesnost měření polohy, a také přechod na CDMA vysílání na frekvenci L1 a L3.

I přes rozsáhlou komercializaci a nasazení sankcí listinou „*About use of GLONASS in technical system and transport vehicles*“ v roce 2010, zůstává GLONASS oproti americkému GPS stále v pozadí vědění, a tak se stále snaží o větší propagaci systému. Jedním z možného řešení je zásahem do letecké dopravy. To se týká převážně duálního přijímače GLONASS-GPS. Samotné Rusko již tyto přijímače využívalo k roku 2018 na více než 600 svých letadlech. Ve výsledcích se ukázalo, že tyto přijímače zvýšily stabilitu nároků na GNSS, a to v ohledech integrity, dostupnosti, přesnosti a nepřetržitosti tam, kde docházelo k rušení signálu GLONASS nebo GPS. Zvýšení stability těchto kritérií by znamenalo velký potenciál pro VNAV (*Vertical NAVigation*), a to jak v ohledu traťové navigace, tak v ohledu navigace v blízkosti letiště. Bez pomoci systému SBAS (*Satellite Based Argumentation System*) nebo GBAS (*Ground Based Argumentation System*) by bylo možné provést vertikální proceduru přesného přiblížení na přistání.

Kombinací dvou různých signálů od dvou různých systémů by umožnilo nepřetržitou navigaci bez možnosti výpadků, pokud by nedošlo k chybě v samotné avionice. To potvrzují případy z roku 2014 a 2016, kdy v roce 2014 došlo k výpadku systému GLONASS a v roce 2016 k výpadku GPS. Ani v jednom z případů piloti nezpozorovali selhání či rušení ukazatele polohy letounu. Tyto přijímače byly vyvinuty na základě norem ruského letectví. EUROCONTROL má však budoucí vizi přijímače, který umožní přijímat všechny čtyři GNSS a to GPS, GLONASS včetně Galilea a BeiDou, které nejsou pro leteckou dopravu ještě zpřístupněny, přičemž z každého systému bude přijímat 2 signály. Tato avionika, která se údajně již vyvíjí, by se měla jmenovat DFCM neboli *Dual Frequency Multi Constellation*. Provozní zavedení se udává mezi roky 2025 až 2028.

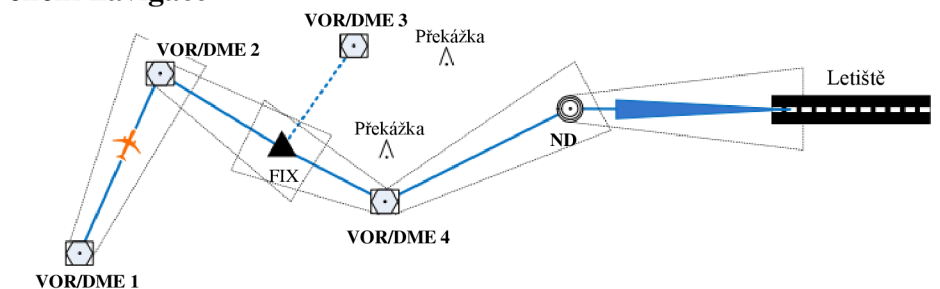
Problémem, a to nejen avioniky DFCM ale i pouze duálního přijímače GLONASS-GPS, zůstává, aby se všechny státy společně dohodly na požadavcích pro používání GNSS. Avionika by měla splňovat nejenom národní požadavky a standardy jednoho státu, ve kterém jsou přijímače vyráběny, a tím je v případě duálního přijímače Rusko, ale i států, kde se letoun bude pohybovat a také musí splnit standardy ICAO [56], [61] a [64].

4.1.2. Místo GLONASS v navigačních metodách

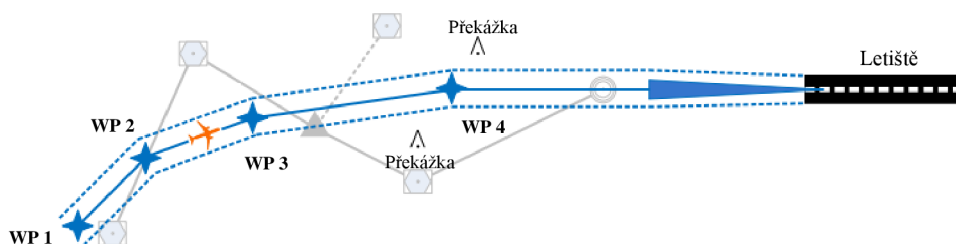
Obecně lze říct, že se systémy GNSS nejvíce využívají v navigačních metodách PBN (*Performance Based Navigation*), které jsou založeny na zvýšení efektivnosti tratí letu. Tuto metodu navigace dnes známe pod pojmem „navigace podle výkonnosti“. Dříve velmi využívaná konvenční navigace, umožňovala pouze lety „od majáku k majáku“, letové trasy prodlužovala, omezovala (navigační zařízení vždy nešlo optimálně umístit – překážky, hluk, ...), a tím do jisté míry ovlivňovala komfortnost letecké dopravy. Rozdíl provedení letu mezi konvenční navigací a navigací podle výkonnosti zobrazuje Obr. 9.

Navigační metoda PBN se dále dělí na dva typy navigačních způsobů, tj. RNP (*Required Navigation Performance*) a RNAV (*Area Navigation*). Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma způsoby je, že u RNP je vyžadováno sledování výkonnosti navigačních prvků s povinností upozornit na chybu, jestliže dojde k překročení stanovené meze v indikaci navigačních údajů [78]. Navigační způsob RNAV lze využívat ve vzdušných prostorech, které mají dobré pokrytí radarovými službami. Požadavky na výkonnost signálů systémů GNSS budou dále rozebrány v kapitole 6.

Konvenční navigace



Navigace podle výkonnosti



Obr. 9 Rozdíl provedení letu mezi konvenční a navigací podle výkonnosti
(převzato z [78] a upraveno)

Použití GNSS v navigační metody PBN vyžaduje, aby letadlo, resp. palubní přijímač, splňoval funkce RAIM (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*) a AAIM (*Airborne Autonomous Integrity Monitoring*). Funkce RAIM je založena na sledování 4 + 1 družic, tzn. jedna družice je záložní pro případ poruchy jedné ze 4 využívaných družic. Avšak pro zachování funkce RAIM, v případě poruchy další družice, je sledována ještě další družice, tzn. 4 + 2 družice. Funkce AAIM slouží k porovnávání údajů z GNSS s údaji z pozemních či palubních navigačních zařízeních. V případě velkých odlišností údajů z GNSS se přechází na jiné navigační systémy. Důvodem přechodu je, že přijímače GNSS nejsou certifikovány. Jak je zmíněno v předchozí podkapitole 4.1.1, globální přechod na duální přijímače GNSS je zatím krokem blízké budoucnosti. Prozatím se převážně v dopravní letecké přepravě využívají přijímače GPS. Přijímače GLONASS, popř. duální přijímače, jsou situovány převážně na území Ruska či Společenství nezávislých států (Bělorusko, Uzbekistán, Kazachstán.)

S využitím systémů GNSS se nesetkáme pouze při vedení po trati, ale i ve fázi přiblížení na přistání při použití systému LPV (*Localiser Performance with Vertical Guidance*). Svoji podstatou je způsob přiblížení velmi podobný přibližování podle ILS, avšak místo pozemní navigační infrastruktury využívá družicové systémy. I když se na LPV nevztahují standardy pro přesné přiblížení musí být pilot informován o odchylce sestupového kurzu a sestupové dráhy. LPV přiblížení není omezeno maximálním počtem naváděných letadel. Pro dodržení přibližovacích minim, uvedených v přibližovacích mapách letišť, je nutné využít rozšířených systémů GNSS, a to buďto GBAS nebo SBAS. Z tohoto důvodu je použití systému GLONASS při LPV přiblížení v mnoha částech světa téměř nemožné. Podporu SBAS systém GLONASS prozatím získal pouze v Indii (MSAS) a ani samotné Rusko zatím nemá vlastní SBAS v provozu. Aktuálně by měl být ruský SBAS, systém SDCM, ve fázi testování a měl by být také jedním z mála, který bude podporovat jak GLONASS, tak GPS. V testech jsou také zapojeny duální přijímače GLONASS-GPS [79][80]. Podobné omezení jako má systém GLONASS u SBAS má i u GBAS, zde to má však malý háček. V případě GBAS nejde o to, že

by pozemní přijímače signál GLONASS přijímat nemohly, ale o to, že dle zdroje [81] chybí pro systém GLONASS potřebné standardizační dokumenty.

Uplatnění GNSS ve fázi přibližování můžeme dále najít v navigačních systémech:

- a) **BARO-VNAV** (*BARometric Vertical NAVigation*) neboli **LNAV/VNAV** (*Lateral and Vertical NAVigation*) je vedení na přiblížení v horizontální rovině pomocí GNSS a rozšiřovacích systémů a ve vertikální rovině pomocí barometrického výškoměru,
- b) **LP** (*Localiser Performance*) vedení na přistání je založeno na využívání GNSS a rozšiřovacích systémů sloužící k horizontálnímu vedení na přistání,
- c) **LNAV** (*Lateral NAVigation*) vedení na přistání je nezákladnější využití GNSS, jehož základní signály slouží pouze k horizontálnímu vedení na přistání.

Všechna vedení na přistání pomocí GNSS jsou řazena mezi nepřesná přístrojová přiblížení (*Non Precision Approach – NPA*).

Využití systému GLONASS při jednotlivých typech vedení na přistání či po trati je dnes velmi omezené z důvodu nedostatečně rozvinuté infrastruktury. Osobně se domnívám, že pokud nedojde k implementaci duálních přijímačů nebo přijímačů DFCM je použití systému GLONASS v letectví velmi omezené, a to především pouze na jistou část světa. Rusko samo uvedlo, že ve svých letadlech přešlo z přijímačů GPS na přijímače GLONASS. Důvodem byla možnost opětovného zavedení selektivní dostupnosti u GPS, která byla v průběhu dosavadních let, dle zdroje [84], již mnohokrát lokálně uskutečněna. Z dnešního hlediska dvou plně funkčních GNSS, které našly uplatnění v globální infrastruktuře jsou, výše zmíněné, informace o využití systému GLONASS v letectví velmi překvapující. Minimální využití systému GLONASS v letectví potvrzuje i minimum zdrojů, které se vůbec o tomto využití systému GLONASS zmiňují.

4.2. Signály GLONASS

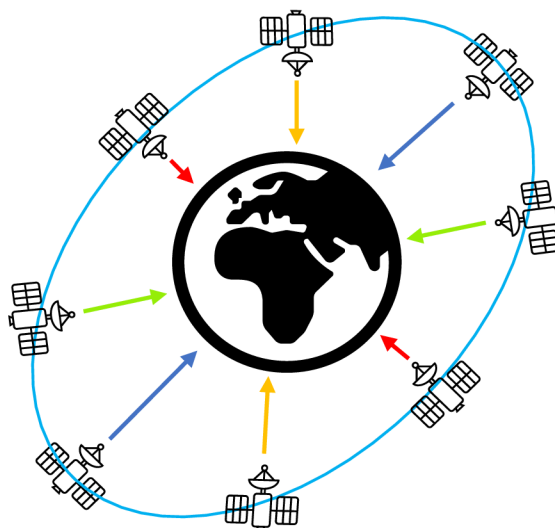
S postupnou modernizací systému GLONASS se stále zvyšují počty vysílaných signálů, a to jak volně dostupné signály, tak signály s nutností oprávnění od ruského Ministerstva obrany. Signály jsou však rozděleny nejen podle druhu uživatele, ale i podle způsobu přenosu informací k uživateli (viz Tab. 2).

Tab. 2 Rozdělení signálů podle uživatelů a způsobu přenosu informací

Rozdělení podle uživatele ----- Způsob přenosu informací	Standardní navigace „Open Access Signals“	Přesná navigace „Restricted Access Signals“
FDMA	L1OF L2OF	L1SF L2SF
CDMA	L1OC ⁷ L2OC L3OC	L1SC ⁸ L2SC

Dříve systém GLONASS používal pro přenos informací výhradně frekvenční dělení (FDMA) vysílacího pásma. Problém tohoto přenosu je v šířce přiděleného vysílacího pásma. Jednotlivé nosné signály družic od sebe musí být dostatečně daleko, aby nedocházelo k významnější interferenci, to znamená, že je jejich počet omezen. U systému GLONASS to je v případě pásma L1 – 1 602 MHz pouze 14 kanálů s odstupem po 0,5625 MHz. Pro konstelaci družic, o minimální počtu 24, bylo řešením jedné nosné frekvence pro dvě, proti sobě ležící, družice na jedné oběžné dráze (vychází se z faktu, že uživatel, potažmo přijímač, neuvidí nikdy tyto dvě družice naráz). Pro lepší představu lze využít Obr. 10.

Dnes však GLONASS využívá i novější přenos informací pomocí CDMA, kde se využívá pseudonáhodných kódů, přiřazených každé družici zvlášť. Zatím jsou přenášeny pouze dva signály na tomto principu přenosu informací, v budoucnu je plánován přenos až čtyř signálů [63], [16].



Obr. 10 Schéma funkce FDMA přenosu informací v systému GLONASS

⁷ Volně přístupný signál L1OC bude přístupný až s novou generací družic „GLONASS – K2“.

⁸ Signál L1SF, pro uživatele s oprávněním, bude přístupný s novou generací družic „GLONASS – K2“.

4.2.1. FDMA signály

Mezi FDMA signály patří signály L1 a L2 s koncovkou „F“, které systém vysílá od úplného začátku. Civilním uživatelům byl jistou dobu přístupný pouze signál L1 a až s družicemi „GLONASS – M“ přibyl i signál L2, tj. od roku 2003.

Jak bylo zmíněno v úvodu kapitoly tyto signály přenáší informace pomocí dělení vysílacího kanálu s jistými odstupy, a to na základě rovnice [70]:

$$f_{k_n} = f_{0_n} + k \cdot \Delta f_n \quad (4.1)$$

, kde f_{k_n} ... označení vysílacího pásma (L1, L2),

f_{0_n} ... frekvence středu vysílacího pásma,

k ... frekvenční kanál $\langle -7; 6 \rangle$,

Δf_n ... separace vysílacích kanálů.

Nízký počet frekvenčních kanálů je dán interferencí signálů. Původně měla každá družice v konstelaci svůj přiřazený vysílací kanál a systém GLONASS tedy využíval jejich plný možný počet. Po zjištění problému interference signálů s frekvencemi vyhrazenými radioastronomickým pozorováním, musel být upraven počet kanálů a rozsah vysílacího pásma L1. Původních 0 ~ 24 kanálů se změnilo -7 ~ 6. Rozsah pásma L1 se z 1 602,0 ~ 1 608,8 MHz změnil na 1 598,1 ~ 1 605,4 MHz. Změna vysílacích kanálů byla provedena i v pásmu L2. V Tab. 2 je možné vidět detaily pásem L1 a L2.

Tab. 3 Charakteristika pásem L1 a L2 v modulaci FDMA

Pásmo	Střed vysílacího pásma [MHz]	Rozsah kanálu [MHz]	Separace [MHz]	Frekvenční kanály (k)	Rovnice [MHz] $f_{k_n} = f_{0_n} + k \cdot \Delta f_n$
L1O	1 602,0	1 598,0625 ~ 1 605,3750	± 0,5625	$\langle -7; 6 \rangle$	$L1 = 1\ 602 \pm k \cdot 0,5625$
L2O	1 246,0	1 242,9375 ~ 1 248,6250	± 0,4375	$\langle -7; 6 \rangle$	$L2 = 1\ 246 \pm k \cdot 0,4375$

S postupnou modernizací a přibývajícím signály CDMA je možné, že systém GLONASS zcela upustí od FDMA přenosu dat.

- **Pásmo L1O – 1 602,0 MHz a L2O – 1 246,0 MHz**

Obě pásma, L1 i L2, jsou využívány oběma skupinami uživatelů. Modulace signálu je ale přizpůsobena každému zvlášť. Stejně jako GPS využívá GLONASS PRN kódy, které jsou přizpůsobeny konečnému uživateli.

Standardní navigace (SN) využívá C/A kód obdobný C/A kódu využívaným v GPS. Obsah kódu je 511 bitů, které se opakují každou milisekundu. Oproti GPS mají všechny družice stejný C/A kód, ale jinou nosnou frekvenci. C/A kód je dostupný v obou vysílacích pásmech, L1 i L2.

Přesná navigace (PN) je možná pouze s P-kódem jehož délka je 33 554 432 bitů. K opakování kódu však dochází každou sekundu (ve skutečnosti byl interval opakování 6,57 sekund, kód je ale zkrácen tak, že k opakování dochází každou sekundu). Stejně jako C/A kód

mají všechny družice společný P-kód, vysílaný na různých frekvencích v obou vysílacích pásmech L1 a L2.

Z důvodu striktně armádního používání Rusko nikdy nevydalo oficiálně žádné bližší informace k P-kódu. Pravdivost těchto údajů není nikde potvrzena a všechny údaje vycházejí pouze z analýz nezávislých organizací či z individuálních studií jednotlivců [2], [8], [16] a [70].

4.2.2. CDMA signály

Signály CDMA se v systému GLONASS vyskytují až od roku 2011, kdy s novou řadou družic „K“ přišel nový vysílací signál L3⁹ a u posledních pár družic i L2. Zavádění nových signálů CDMA je vždy plánováno až s novými typy družic. Důvodů zavedení CDMA signálů je hned několik:

- větší odolnost proti rušení signálů,
- zvýšená přesnost určování polohy,
- lepší oddělení služeb pro standardní a přesnou navigaci,
- zajištění kompatibility s ostatními GNSS.

I v této formě přenosu informací jsou zachovány zvláště dostupné informace pro civilní uživatele (*standardní navigace*) a zvláště pro armádu a uživatele oprávněné ruským Ministerstvem obrany (*přesná navigace*). V Tab. 4 je možné vidět CDMA signály, které již v provozu jsou nebo se teprve připravují na uvedení do provozu.

Tab. 4 Signály CDMA

Pásmo	L1O	L2O	L3O	L5O (Safety of Life)
Frekvence [MHz]	1 600,995	1 248,060	1 202,025	1 176,450
Status	zavedení s družicemi „K2“	V provozu	V provozu	Ve vývoji
Přístup	SN a PN	SN a PN	SN	SN a PN

- **Pásmo L1O – 1 600,995 MHz**

Jde o vysílací pásmo, které se teprve na uvedení do provozu připravuje. Podle dokumentu, vydaného v roce 2016, bude délka PRN kódu 1 023 bitů s opakovací periodou 2 ms.

- **Pásmo L2O – 1 248,060 MHz**

O pásmo L2 se dělí obě skupiny uživatelů. C/A kód, určený civilním uživatelům, je tvořen kombinacemi z 10 230 bitů, trvající okolo 1 ms, s periodou opakování 20 ms.

Specifikaci kódu pro uživatele, využívající přesnou navigaci, nebo nastíněné informace nebylo možné nikde dohledat.

- **Pásmo L3O – 1 202,025 MHz**

Pásmo L3 je určeno pouze civilním uživatelům. Délka přenášeného informačního kódu je 10 230 bitů, s trváním okolo 1 ms. Obdobou signálu L3O je signál L2C u GPS.

⁹ V případě signálu L3 šlo o nové zavedení vysílacího frekvenčního pásma, přiřazeným družicím GLONASS, které se nachází hned vedle pásem E5b (Galileo) a B2 (BeiDou).

- **Pásmo L50 – 1 176,450 MHz Safety of Life**

O vysílacím pásmu L5 je dostupná pouze informace, že je v budoucím plánu vysílacích signálů. Nacházet se bude v mezinárodně chráněném civilním pásmu určeném výhradně pro leteckou navigaci.

Pro tuto kapitolu byly použity literární zdroje [70], [71], [72], [73] a [74].

4.3. Navigační zpráva GLONASS

Navigační zprávy jsou nezbytnou informací pro určování polohy. Aktualizaci zpráv provádí řídicí stanice minimálně jednou za den (efemeridy a časové parametry se aktualizují nejméně jednou za 30 minut). Zpráva je následně, prostřednictvím vysílačů, předána družicím, které ji šíří k přijímačům.

Obsah navigační zprávy:

- parametry oběžné dráhy, tzn. efemeridy,
- stav družice¹⁰,
- odklon družicového času¹¹ od systémového času GLONASS¹² a od UTC,
- datum v rámci 4letého období,
- almanach¹³.

Obsah je dále dělen na provozní informace, tj. informace o družici jejíž signál přijímáme, a neprovozní informace, tj. almanach o 5 dalších družicích. Dříve existoval v systému GLONASS pouze jeden druh navigační zprávy, která má pevně danou vysílací strukturu. S postupnou modernizací a rozvojem systému se s částečným přechodem na nové vysílání zavedla i nová navigační zpráva, tvořena proudem textových řetězců, vysílaných nezávisle na pořadí.

4.3.1. Navigační zpráva FDMA

Navigační zpráva signálů FDMA je složena ze superrámců, obsahující 5 rámců a 15 podrámců, které mají pevně určené pořadí a opakují se v pravidelných intervalech, jak lze vidět na Obr. 11. Zpráva je dlouhá 7 500 bitů a její délka vysílání je 2,5 minuty (délka vysílání jednoho rámce je 30 s, tj. 2 s na každý podrámec). Rychlost přenosu je 50 b/s.

Jednotlivé podrámce nesou odlišné informace. Podrámce 1. až 4. nesou okamžité informace a efemeridy o družici, jejíž signál se právě přijímá. Tyto tzv. provozní informace jsou nezbytné k určení polohy a z tohoto důvodu se opakují každých 30 s. Podrámce 5. až 15. nesou almanach, obsahující neprovozní informace o dalších pěti družicích, informaci o převodu systémového času na UTC a oznámení odklonu od systémového času. Úprava efemerid probíhá jednou za 30 minut a jejich platnost je ± 15 minut od aktualizace.

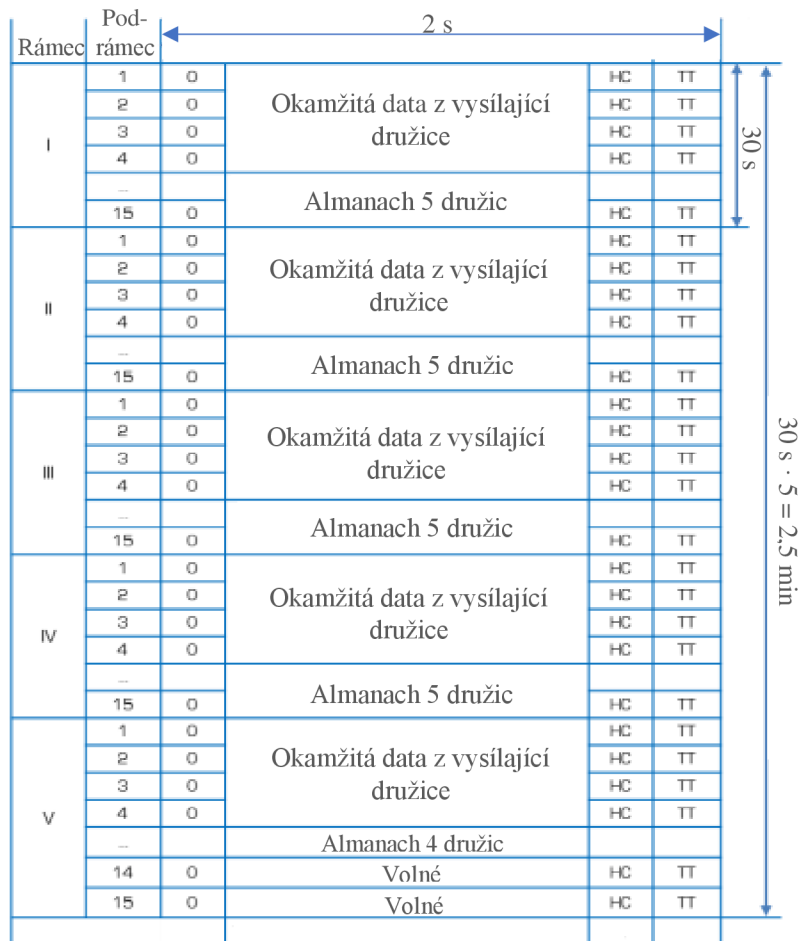
¹⁰ Stav družice je monitorován jak samotnou družicí, tak pozemním segmentem. To znamená, že pokud družice sama nevyhodnotí problém a nepřejde do stavu „odstavena“, může řídicímu centru trvat zjištění a odstavení družice 2,5 minut nebo až 16 hodin.

¹¹ Čas, podle kterého se družice řídí, se odvíjí podle atomových hodin, které má na palubě. Přesnost určení času družicí je $5 \cdot 10^{-13}$.

¹² Systémový čas je určován stanicí „Central Clock“ s přesností $5 \cdot 10^{-14}$. Od UTC má systémový čas GLONASS rozdíl 3 h.

¹³ Almanach je seznam informací o efemeridách a stavech všech družic, nacházejících se na oběžných drahách. To umožňuje rychlejší vyhledávání družic, které jsou pro přijímač viditelné [8].

Důležitou informací pro uživatele je, že navigační zpráva FDMA neobsahuje žádnou ionosférickou korekci, což pro neduální přijímače znamená větší odchylky od správně určené polohy. Maximální obsah navigační zprávy FDMA je omezen počtem 24 družic.



Obr. 11 Vzhled FDMA navigační zprávy

Informace o navigační zprávě pro přesnou navigaci nebyly nikdy zveřejněny. Na veřejnost se však dostalo pár informací od výzkumných skupin, které měly snahu o dekódování této zprávy. Údajně navigační zpráva obsahuje superrámce, složené ze 72 rámců a 5 podrámců. Jeden rámec se vysílá 10 s a celkový čas přenosu zprávy je 12 minut [8], [55], [71] a [75].

4.3.2. Navigační zpráva CDMA

Nový typ navigačních zpráv je přenášen CDMA signály, prozatím pouze pásmem L3 (pozn. pásmo L2 nepřenáší žádnou navigační zprávu, ale pouze PRN kód). Nová zpráva je vysílána flexibilnější formou využitím textových řetězců v rámci, které nebudou mít jasně dané pořadí. Jejich obsah je definován identifikačním číslem, podle kterého se určuje důležitost zpráv, a tudíž i pořadí vysílání. Problémem, se kterým se budou uživatelé setkávat je, že postupnou modernizací CDMA navigačních zpráv a přibýváním nových identifikačních čísel, tzn. nových řetězců s novými ID, nebudou moct přijímače, navržené před jejich zavedením, tyto informace zpracovat. Pokud však nedojde k radikální změně navigačních zpráv, přijímač bude fungovat stále stejně a neznámé typy řetězců bude ignorovat. Navigační zpráva navíc není omezena maximálním počtem možných družic a lze ji zkrátit či prodloužit, což u původní

navigační zprávy nelze. Nově zprávy můžou přenášet informace o rotaci Země, modely ionosféry, dlouhodobé parametry oběžných drah a zprávy Cospas-Sarsat.

Signál L3O přenáší navigační zprávu aktuálně složenou z 8 rámců (v budoucnu bude obsahovat 10 rámců, které pokryjí 30 družic) obsahujících 6, 300bitových, řetězců. Rychlost přenosu je 100 b/s. Celou zprávu, obsahující 14 400 bitů, přijímač získá za 2,24 minut.

Signál L1O, jehož vysílání bude zahájeno současně s uvedením do provozu družic „K2“, má přenášet navigační zprávu dlouhou 12 000 bitů. Rychlost přenosu je stejná jako u L3O, ale počet přenášených bitů je 12 000.

4.4. Segmenty GLONASS

- **Kosmický segment**

Družice se nachází na 3, téměř kruhových, oběžných drahách, ve výšce 19 100 km nad Zemí, s inklinací $64,8^\circ$ vzhledem k rovníku. Vzájemné posunutí oběžných drah je 120° . Družice jsou rozmístěny přibližně po 8^* na každé oběžné dráze s 45° rozestupy (*na drahách 2. a 3. nachází 10 družic – 18.2.2021), přičemž jsou polohy družic na jejich oběžné dráze vždy posunuty o 15° vůči druhé oběžné dráze. Doba jednoho oběhu družice trvá 11 hodin 15 minut a 44 sekund. Rychlost letu družice je přibližně 3,9 km/s. Zajímavostí konstelace družic GLONASS je, že každých 8 dní jsou polohy družic na obloze stejné.

Kosmický segment GLONASS je ke dni 18.2.2021 složen z 28 družic, z toho je v provozu pouze 23. V příloze 4 lze najít, které družice jsou v provozu, prochází údržbou nebo jsou ve fázi testování k datu 18.2.2021. Protože v současné době je v provozu pouze 23 družic, namísto minimálně 24, je 100 % celosvětové pokrytí jistým otazníkem [16], [57], [69].



Obr. 12 Schéma konstelace družic GLONASS [57]

- **Řídicí segment**

Původně se řídicí segment, včetně všech jeho součástí, rozkládal pouze na území Ruska, což značně omezovalo kontrolu kosmického segmentu, kdy až po dobu 16 hodin byly jednotlivé družice mimo dosah. I přes značnou modernizaci řídicího segmentu, se stále jeho značná část rozkládá na Ruském území. Nově by mělo dojít k rozšíření monitorovacích a komunikačních stanic nejen na území Ruska, ale i do jiných částí světa. V polovině roku 2019 generální ředitel pro mezinárodní spolupráci, Sergej Savelyev, oznámil, že se jedná s Asijskými, Africkými

a Asijsko-pacifickými regiony. Novinkou roku 2019 bylo uzavření dohody s Argentinskou komisí pro Letecký Výzkum, jejíž součástí je rozšíření pozemních stanic na území Argentiny.

Řídicí segment GLONASS se skládá z jednoho, hlavního, řídicího centra (*System Control Center – SCC*) a pozemního velitelství (*Ground Command Facilities – GCF*) ležících poblíž Moskvy. Systém neobsahuje záložní řídicí stanici. Dále z šesti stanic TT&C (*Telemetry, Tracking and Command Station*), jejichž součástí jsou i komunikační stanice (*Uplink station*), dvou stanic pro laserová měření (*Laser Ranging Station – LRF*), monitorovacích (*SIS Monitoring Facilities – SMF*) a měřících stanic, které se rozkládají na území Ruska a Společenství nezávislých států. Řídicí segment dále obsahuje stanici pro sledování a synchronizování času (*Time Scale Monitoring Facilities – TMF a Central Synchronizer – CS*). Rozmístění jednotlivých stanic na území Ruska lze vidět na Obr. 13.

Řídicí segment uskutečňuje následující kroky:

- monitoruje konstelaci družic a předává jim upravené parametry,
- provádí údržbu atomových hodin,
- vytváří navigační zprávy, které předává družicím,
- provádí údržbu družic, pokud vykazují anomálie.

Bližší popis funkcí jednotlivých složek pozemního segmentu obsahuje Příloha 5.

Jedním ze zajímavostí řídicího segmentu jsou stanice pro laserová měření, které pomocí odrazu laseru od družice (přesněji od odražeče laserových paprsků) dokáže velmi přesně určit vzdálenost družice, z čehož se poté stanoví parametry oběžné dráhy [2], [8], [16], [67] a [68].



Obr. 13 Rozmístění jednotlivých celků řídicího segmentu GLONASS (převzato z [86] a upraveno)

- **Uživatelský segment**

Stejně jako všechny družice systémů GNSS jsou i družice systému GLONASS při komunikaci s uživateli aktivní. Přijímač přijímá signály z právě viditelných družic a na základě skupiny, do které uživatel spadá, přijímač dle druhu signálu určuje svoji polohu, čas a datum.

Po jistou dobu byl uživatelský segment GLONASS velmi omezený, a to hlavně v době, kdy obnovení systému a jeho následující vývoj byl velmi nejasný. V té době nebyl vývoj

dokonce zavedl záruku na přijímače GLONASS. Pokud by systém zanikl, neměl být problém s bezplatnou výměnou přijímače za jiný. Na podporu komercializace a propagace systému byla vydána listina „*About use of GLONASS in technical system and transport vehicles*“, což znamenalo zavedení 25 % cla na všechna zařízení, která přijímají pouze signály GPS, a to od malých přijímačů až po automobily. Ovlivněna byla i výroba v Rusku. Výrobci museli do zařízení aplikovat minimálně duální přijímače GLONASS-GPS [2], [8], [65] a [66].

Dnes nalezneme duální přijímače asi téměř všude. Jejich výhodou je přesněji určitelná poloha přijímačem (čím více signálů, tím přesněji je poloha určena), a také zkrácení doby vyhledávání potřebného počtu družic k určení polohy. Ovšem i přes rozsáhlé využívání přijímačů GLONASS nebo duálních přijímačů GLONASS-GPS v zařízeních, užívaných každý den, např. v mobilních telefonech, nemá mnoho uživatelů o tomto navigačním systému povědomí.

5. Používané systémy GNSS

5.1. Galileo

Je první evropský globální navigační družicový systém, který byl vyvinut se zaměřením na civilní uživatele, pod jejíž kontrolou je i chod systému. Velkou výhodou systému je nezávislost na vojenských systémech GNSS, kdy vlivem mezinárodních konfliktů, může dojít k vypnutí systémů pro civilní uživatele nebo velkému ovlivnění zaměření polohy [31].

První myšlenky o tvorbě evropského GNSS se připisují konci 90. let, kdy britský politik Niel Kinnock, pracující jako dopravní komisař, volal po samostatnosti a nezávislosti na americkém systému GPS či ruském systému GLONASS. A je to i sám Kinnock, kdo podává v únoru 1999 vlastní návrh družicového systému Galileo. Realizaci ale komplikuje teroristický útok v roce 2001 na Světové obchodní centrum „*World trade center*“, kdy ministerstvo obrany USA v čele s Paulem Wolfowitzem oznámilo, že v civilním projektu Galileo vidí značnou hrozbu zneužití. Velká přesnost zaměření polohy, a navíc stejné frekvenční pásmo vysílání, bylo pro USA téměř nepřijatelné. Evropa však zaujala opačný postoj a po řadě mezinárodních jednání byly vztahy urovnány. Celý projekt Galileo je od roku 2007 kompletně pod záštitou Evropské unie s hlavním administrativním centrem v Praze. Podrobnější vývoj popisuje literární zdroj [91].

Systém Galileo měl vejít do úplné funkčnosti s rokem 2020. Díky tomuto systému, by každá cesta, ať už je vedena kamkoliv, měla být určena s větší přesností než pomocí systému GPS či GLONASS. Efektivnějším by se systém měl ukázat i v záchranných službách, dopravě a zemědělství. Galileo, v plném provozu, má být interoperabilní¹⁴ s dosavadními GNSS → GPS a GLONASS.

5.1.1. Etapy vývoje Galileo

- **Fáze „Testování“ 2005 ~ 2011**

První experimentální družice, GIOVE – A a GIOVE – B, které měly začít průzkum, byly vyslány v roce 2005 a 2008. Jejich úkolem byla nejen charakteristika vyšších oběžných drah¹⁵ ale i zátěžová zkouška vybavení družic (atomové hodiny, družicový počítač a jiné), které musí podléhat značnému slunečnímu a vesmírnému záření. Životnost družic byla plánovaná na 27 měsíců, obě ale překonaly hranici 4 let. V testování byly také první signály družic, které rezervovaly frekvence Mezinárodní telekomunikační unie.

S prvními družicemi také začala výstavba pozemní infrastruktury, jež umožňovala řízení a komunikaci s družicemi [32] [33].

- **Fáze „In – Orbit“ 2011 ~ 2014**

O této fázi se lze hovořit jako o fázi „ověřování oběžné dráhy“. Skládala se ze čtyř provozních družic vyslaných na oběžnou dráhu Země. První dvojice byla vyslána v roce 2011, druhá v roce 2012. Konstelace čtyř družic již umožňovala třírozměrnou navigaci a její možnou korekci [34]. Druhá dvojice navíc obsahovala vyhledávací a záchranné transpondéry systému Cospas-Sarsat. Novinkou byla možnost odpovědi na tísňové volání ve smyslu - „*SOS přijata, pomoc je na cestě*“ [35].

¹⁴ Interoperabilitu lze chápat jako schopnost spolupracovat a vzájemně se doplňovat v práci.

¹⁵ Charakteristikou oběžných drah družic Galileo je myšleno prostředí, ve kterém se družice budou pohybovat a jak budou tímto prostředím ovlivněny (magnetické pole, slunečné a vesmírné záření, ...). [33].

Cílem konstelace bylo ověření funkčnosti kosmického a pozemního systému i za sníženého počtu družic. Průměrná přesnost zaměření polohy byla 9 m vertikálně a 8 m horizontálně za pomoci čtyř družic. Zpřesnění zaměření se očekávalo po postupném doplnění družic do konečné konstelace 24 družic a rozšířením pozemní infrastruktury [35] [36]. V roce 2014 byl systém ve fázi „*In – orbit*“ prohlášen za výborný.

- **Fáze „Předprovozní“ 2014 ~ 2016**

K původním čtyřem družicím bylo doplněno dalších 14 a celkový počet družic vzrostl na 18. Osmnáct družic již umožňovalo, aby byly v roce 2016 částečně zprovozněny služby, které systém Galileo poskytuje. Mezi ně patřila pátrací a záchranná služba „*Cospas-Sarsat*“, otevírací navigační služba „*Open Service*“, která je volně dostupná a navigace PRS „*Public Regulated Service*“ pro uživatele s příslušným oprávněním.

V průběhu vývoje konstelace družic v předprovozní fázi, došlo k velkému růstu pozemní infrastruktury po celém světě [37][40].

- **Fáze „V plném provozu“ 2016 ~ 2021?**

Systém Galileo měl být v oficiálně plném provozu s rokem 2020, kdy měl počet družic dosáhnout 24. Na oběžné dráze však stále chybí dvě družice a spuštění systému je odloženo na rok 2021. Zástupci systému Galileo, zabývající se rozvojem systému ve směru logistiky a dopravy, oznámili - „*Není to jen o vyslání družic na oběžnou dráhu, potřebujeme tyto satelity mít v provozu odzkoušené natolik, abychom mohli deklarovat jejich spolehlivost.*“ [38]. Je tedy možné, že ani v roce 2021 nebude systém oficiálně zprovozněn.

Začátkem roku 2020 byl přijat zpětný signál na nouzové volání SOS, čímž byla služba „*Search and Rescue Service*“ prohlášena za plně funkční [39].

5.1.2. Signály Galileo

Jednotlivé signály jsou vysílány ve frekvenčním pásmu 1,1 ~ 1,6 GHz. Důvodem volby jsou ultra krátké vlny (cca 30 ~ 15 cm), které jsou minimálně ovlivňovány atmosférickými podmínkami v blízkosti Země a ionosférickou vrstvou. Frekvence signálů, na niž družice vysílají, jsou odvozeny z tzv. základní frekvence¹⁶. f_0 .

$$f_0 = 10,23 \text{ MHz}$$

Signály, které družice vysílají umožňují poskytovat až 5 druhů služeb [41]:

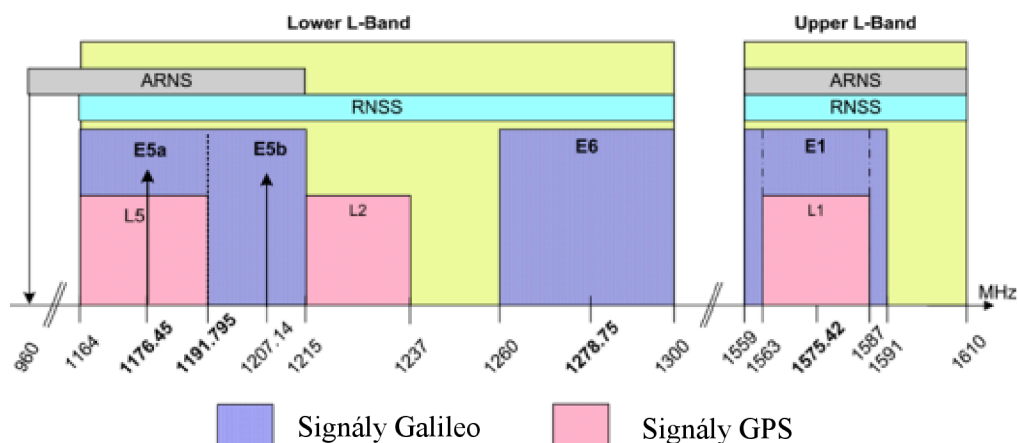
- a) základní služba (*Open Service – OS*),
- b) Safety-Of-Life (*SOL*),
- c) komerční služba (*Commercial Service – CS*),
- d) veřejná regulovaná služba (*Public Regulated Service – PRS*),
- e) Search and Rescue Service (*SAR*).

Systém vysílá čtyři frekvenční pásma E5a, E5b, E6 a E1, která jsou umístěna ve frekvenčním spektru RNSS¹⁷, z čehož E5a, E5b a E1 jsou navíc i v ARNS¹⁸ (viz. Obr. 14) [43].

¹⁶ Základní frekvence je převzata z frekvence atomových hodin s přesností 10⁻¹³ sekund [2]. Modulace informací na nosnou vlnu probíhá v mnoha krocích dělením a násobením základní frekvence.

¹⁷ RNSS (*Radio Navigation Satellite Services*) je část „Globální kritické infrastruktury“ určující frekvenčním spektrum pro družicové systémy. Spektrum je přírodně chráněno, aby nemohlo dojít k rušení signálů, které ohrožuje až znemožňuje fungování radionavigačních služeb [42].

¹⁸ ARNS (*Aeronautical Radio Navigation Services*) je frekvenční spektrum určené pro civilní letectví [43].



Obr. 14 Schéma rozmístění frekvencí Galileo (převzato z [43] a upraveno)

I zde platí, že k rozpoznání signálů z jednotlivých družic je potřebné, aby měla každá družice svůj kód signálu. Zde se dojde ke dvěma možnostem – dlouhý kód nebo krátký kód? Dlouhý kód je výhodný pro detekci opravdu slabých signálů, což umožňuje kvalitní příjem signálů v budovách měst, resp. na špatně přístupných místech. Rozpoznání kódu je však zdouhává, protože existuje více variant než u krátkého kódu. Krátký kód je sice rychle rozpoznatelný, ale jeho nevýhoda spočívá v možné záměně družic přijímačem. Stejná délka jednotlivých kódů signálů není možná kvůli různorodému používání systému. V letectví je nutné svoji pozici vědět nejlépe hned, na nic se zde nemůže čekat, ale člověk ve městě chvilku počkat může. Tento problém se musel vyřešit použitím různých dlouhých kódů na více rozdílných frekvencích signálů. Důvodem více frekvencí je i ionosférická korekce. Zatím co signály s nižším kmitočtem mají větší zpoždění, signály s vyšším kmitočtem proklouznou ionosférou docela snadno. Díky tomu je kombinací příjmu dvou různých signálů ionosférické zpoždění odstraněno¹⁹. Z obou výše uvedených důvodů jsou služby Galileo vysílány obecně pomocí dvou signálů.

Základní služba (Open Service) je dostupná na frekvencích pásmech E1, E5a a E5b. Signály lze využívat jednotlivě nebo je kombinovat. Pro nejúčinnější ionosférickou korekci se udává kombinace signálů E1 a E5a, jinak je použita korekce nesena v navigační zprávě. Pro nejpresnější zaměření polohy je možné použít trojkombinace signálů.

Safety-Of-Life je zavedena ve vysílacích pásmech vyhrazených letecké dopravě. Oproti základní službě bude navíc signál přenášet informace o integritě systému (vysvětlení pojmu viz. kapitola 6.2.)

Komerční služba (Commercial Service) je realizována hlavně v pásmu E6, avšak data pro komerční využití lze přenášet i frekvenčními pásmy základní služby [44].

Veřejně regulovaná služba (Public Regulated Service), využívající pásma E1 a E6, má přístup povolený pouze autorizovaným uživatelům → policie, pohotovostní služby a jiné. Signály by měli být chráněny proti spoofing²⁰ a rušení²¹ [47].

Search and Rescue Service je mezinárodní služba poskytující lokalizaci nouzových signálů. Jak již bylo zmíněno, Galileo je první družicový systém, který umožňuje zpětnou vazbu na nouzové signály [44].

¹⁹ Větší rozdíl mezi frekvencemi přijímaných signálů má za následek účinnější odstranění vlivu ionosféry.

²⁰ Spoofing znamená vysílání zavádějící signálů pseudodružicemi → chybně určená polohy.

²¹ Rušení znamená znemožnění využívání signálů vlivem interference s jinými, úmyslně vysílanými, signály.

High Accuracy Service je doplňkovou službou základní navigace zpřesňující zaměření polohy pod 20 cm. I přes volný přístup k této službě je možné ji kódovat, a tím podléhat kontrole přístupu. Přenášet se má pomocí frekvenčního pásma E6 [45][46].

Tab. 5 Shrnutí využívání pásem

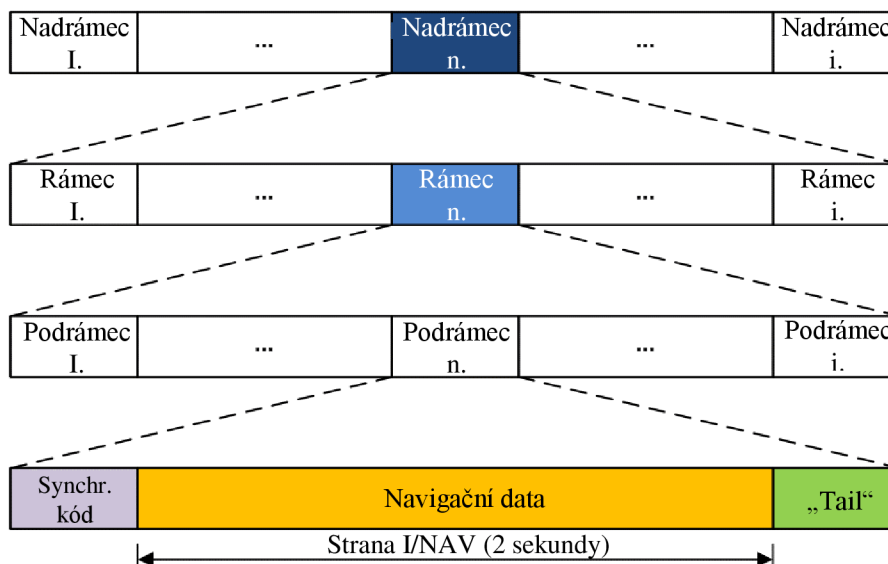
Pásmo	Dělení ²²	Frekvence [MHz]	Využití
E1	E1 – A, B, C.	1575,420 MHz	OS, PRS, SOL, (CS)
E5a	E5a – I, Q.	1176,450 MHz	OS, SOL, (CS)
E5b	E5b – I, Q.	1207,140 MHz	OS, SOL, (CS)
E6	E6 – A, B, C.	1278,750 MHz	PRS, CS

5.1.3. Navigační zprávy Galileo

Navigační zprávy jsou děleny na čtyři typy dle cílové skupiny uživatelů:

- F/NAV, vysílaná E5a – I, slouží k základní navigaci,
- I/NAV, vysílaná na E5b a E1 – B, je určena základní a komerční službě,
- C/NAV, poskytovaná E6 – B, poskytuje doplňující informace komerční službě,
- G/NAV, přenášející se signály E1 – A a E6 – A, slouží veřejné regulované službě.

Struktura I/NAV a F/NAV je svým uspořádáním stejná jako na Obr. 15. Rozdíl se nachází v počtu jednotlivých částí, jejich časem trvání, a hlavně v obsahu informací jejich stran.



Obr. 15 Struktura zpráv I/NAV a F/NAV (převzato z [53] a upraveno)

- **I/NAV (Integrity NAVigation message)**

Obsahuje informace o integritě systému a během krátké doby informuje uživatele o změnách kvality informací [2]. Zpráva je složena z tzv. nadrámců (1 nadrámec = 720 sekund),

²² Dělení pásem slouží k rozdělení informací, které ponese, např. E1 – A je datový kanál určen službě PRS [2].

z níž každý má 24 rámců (1 rámeček = 30 sekund), které jsou složeny z 15 stran s dobou vysílání 2 sekund. Rychlost přenosu je 125 b/s na kanálech E1 – B a E5b – I.

Zprávy I/NAV obsahují dva druhy stran:

- Nominální strana, trvající 2 sekundy, předává informace trvající po 1 sekundě, frekvenci E5b – I a E1 – B. Strany jsou označeny jako „sudé“ a „liché“.
- Výstražná strana, trvající 1 sekundu a obsahující dvě části, vysílá stejné informace na obou kanálech E5b – I a E1 – B. Dělení stran na „sudé“ a „liché“ [43].

Pro přesnější představu vzhledu stran I/NAV viz. Příloha 1.

- **F/NAV (Freely accessible NAVigation message)**

Navigační zpráva F/NAV je určena pro základní navigaci. Skládá se z rámců (1 rámeček = 600 sekund), 12 podrámců (1 podrámeček = 50 sekund) a pěti stran trvající po 10 sekundách. Přenosová rychlost je 25 b/s na vysílacím kanálu E5a – I.



Obr. 16 Vzhled "strany" F/NAV (převzato z [48] a upraveno)

První díl strany obsahuje synchronizační kód, který umožňuje přijímači rozeznat začátek strany. Typ strany určuje, co bude obsaženo v následujících informacích:

- strana – časová a ionosférická korekce, „zdraví“ družice a platnost dat,
- strana – efemeridy (část 1. ze 3.) a systémový čas Galileo (GST),
- strana – efemeridy (část 2. ze 3.) a systémový čas Galileo (GST),
- strana – efemeridy (část 3. ze 3.), časový rozdíl GST – UTC/GPS a TOW GPS,
- strana – almanachy.

Následuje kód CRC, který má na starosti detekci bitů obsahující možnou chybu, a jako poslední díl strany je „Tail“, sloužící přijímači k dokončení dekódování FEC²³ [43]. Aktualizace informací probíhá každé 3 hodiny, ale jejich platnost jsou 4 hodiny pro případ náhlého krátkodobého výpadku systému [2][43].

Přesný vzhled navigační zprávy F/NAV je možné si prohlédnout v Příloha 3.

- **C/NAV (Commercial NAVigation message)**

Je zpráva určena pro komerční službu obsahující doplňující informace např. meteorologické informace, dopravní informace a mnohé další.

- **G/NAV (Governmental NAVigation message)**

Je navigační zpráva se zaměřením na veřejně regulovanou službu, jejíž přístup je povolen pouze autorizovaným uživatelům [2].

Více informace ke zprávám C/NAV a G/NAV nebylo dohledáno. Žádný dokument o těchto signálech doposud nebyl vydán nebo není volně přístupný.

²³ FEC (*Forward Error Corection*) neboli samoopravný kód je schopnost/funkce opravit chybu v nesené informaci/zprávě bez nutnosti dalšího jejího opakování. Množství chyb, které je kód schopný opravit do původní podoby je dáno jeho charakteristikou.

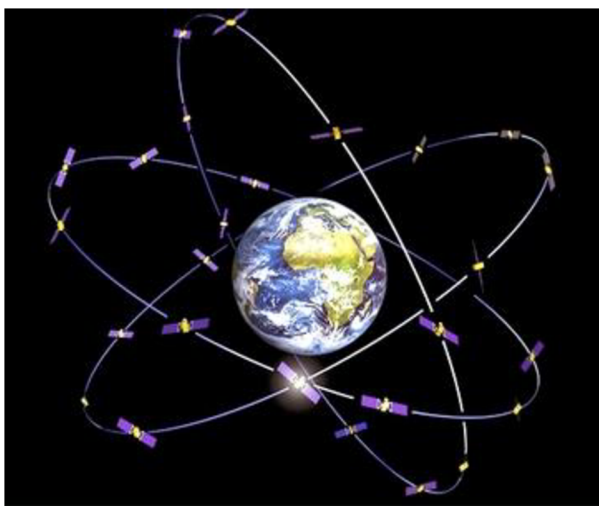
5.1.4. Segmenty Galileo

Pro následující části byly použity zdroje [48], [51], [52] a [53]

- **Kosmický segment**

System Galileo bude v plném nasazení až bude konstelace obsahovat 30 družic, tzn. 24 bude plně funkčních a 6 záložních. Jejich výška nad povrchem Země je 23 222 km. Družice jsou rozmístěny na třech oběžných drahách posunuty vůči sobě o 120° s inklinací 56° vzhledem k rovníku. Doba jednoho oběhu je 14 hodin a 4 minuty. Na každé dráze bude rozmístěno 10 družic s tím, že osm bude aktivních a dvě družice budou v záloze.

Ke dni 30.11.2020 je 22 družic na oběžných drahách a v provozu, které se mohou využívat pro navigaci. System však není oficiálně uveden do provozu. Pro letectví a dopravu celkově je využívání tohoto systému pouze na vlastní nebezpečí, tudíž se v žádné případě nedoporučuje.



Obr. 17 Vzhled konstelace Galileo [49]

- **Řídicí segment**

Má za úkol nepřetržitě sledovat konstelaci družic a upravovat údaje v navigačních zprávách. Řídicí centra (*Ground Control Center*) jsou dvě, v Itálii (Fucino) a Německu (Oberpfaffenhofen). Dále se řídicí segment skládá ze šestnácti monitorovacích stanic (*Sensor Station*), které sbírají data a dále je distribuují do řídicích center, čtyř komunikačních stanic (*Uplink Station*), které nahrávají opravená data do systému družic. Na Obr. 18 je možné vidět vzhled monitorovací stanice na Špicberkách. Poslední jsou stanice telemetrie, sledování a kontroly (*Telemetry, Tracking & Control station*), které přijímají telemetrická data z družic a udržují družice a celou konstelaci ve správném chodu.

Řídicí segment je rozšířen o další centra či stanice, které doplňují a zlepšují chod systému:

- Evropské servisní centrum GNSS,
- Centrum geodetických referenčních služeb,
- Časový servis,
- Bezpečnostní monitorovací centrum Galileo,
- Search and Rescue centrum,
- Referenční centrum Galileo.



Obr. 18 Monitorovací stanice SvalSat, Špicberky [50]

- ***Uživatelský segment***

Bude či již je složen z přijímačů a uživatelů, které mají potřebně vybavení umožňující příjem signálů Galileo. Aktivní zapojení systému Galileo mezi ostatní systémy GNSS by mělo přinést v civilním využití přesnější a lépe dostupná data o poloze přijímače, a to i v místech, kde se mnohdy vyskytuje vícecestné šíření, které negativně ovlivňuje měření, např. města.

System bude poskytovat čtyři hlavní služby:

- a) základní službu,
- b) komerční službu,
- c) veřejně regulovanou službu,
- d) Safety-of-life.

Jejich využití se očekává v široké škále uživatelů od transportní dopravy, přes stavební práce až po obyčejnou turistiku či cestu na dovolenou, a to ať už řidičem v autě nebo posádkou, při letu do vzdálené destinace.

Kde dne 14.04.2021 je na orbitech Galileo umístěno 22 provozuschopných družic a s napětím se čeká, kdy dojde k vypuštění posledních dvou a následně na jejich uvedení do provozu, čímž by systém mohl být oficiálně spuštěn pro všechny potenciální uživatele.

5.2. Navstar GPS

Navstar GPS, celým jménem Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System, je americký družicový globální navigační systém, který byl od počátku vyvíjen pro vojenské potřeby, jako jeho navigační předchůdce TRANSIT (kapitola 3.1.).

Vývoj začal v roce 1973, ve moment, kdy se sloučily projekty Timation a System 621B, který spadal pod Americké vzdušné síly. Tento krok, Ministerstva obrany USA, byl důvodem k vytvoření jednotného navigačního systému, pro všechny armádní uživatele [16]. K zásadní změně došlo roku 1983, kdy sovětský stíhač sestřelil civilní letadlo. Všichni pasažéři, včetně posádky zemřeli. Tehdejší Americký prezident, Ronald Regan, reaguje zpřístupněním GPS pro civilní navigaci, po oficiálním dokončení systému [2].

Projekt Navstar spadal až do roku 2019 pod organizaci JPO²⁴ (Joint Program Office), kdy byl vývoj a každodenní provoz předán Vesmírným silám Spojených států amerických (USSF), které spadají také pod ministerstvo obrany [16].

Tento systém je po celém světě nejvíce známým druhem navigace a uživateli jsou lidé po celém světě. GPS používáme v podstatě v neomezené míře, od zjištění trasy k nové kavárně, přes cestu do zahraničí za novými poznatky po výzkumné práce v rozmanitých odvětvích.

5.2.1. Etapy vývoje GPS

- **Etapa č. I 1973 ~ 1979 „Blok I“**

Hlavním zaměřením této etapy bylo ověření primárních funkcí systému. První testovací družice byly vypuštěny roku 1974 avšak ani jedna ze dvou družic oficiálně nespadała do programu GPS [8]. Od roku 1978 bylo úspěšně vypuštěno z plánovaných čtyř družic nakonec 10, nazývaných „Blok I“. Jejich životnost se pohybovala okolo 3 let, ale pár družic fungovalo ještě 10 let po jejich vypuštění. Poslední byla z provozu vyřazena roku 1995 [18]. Výhodou těchto družic byl neomezený signál, tzn. nebyl opatřen selektivní dostupností²⁵.

- **Etapa č. II 1979 ~ 1985**

Tyto roky se nesly ve znamení budování řídicího segmentu. Ve vývoji a testování byly navíc i armádní přijímače GPS. V roce 1980 se začíná s vývojem družic „Blok II.“ [11].

- **Etapa č. III 1985 ~ 1994 „Blok III/ IIA“**

V roce 1989 byla vyslána první družice „Blok II“ na oběžnou dráhu Země. Desátá až dvacátá devátá spadala do „Blok IIA“. Tyto družice umožňovaly až 180 dní trvající nepřetržitou navigaci bez zásahu řídicího centra.

Roku 1993 byly poprvé, na celém světě po dobu 24 hodin, dostupné třírozměrné souřadnice. Signály družic byly pro civilní sektor opatřeny selektivní dostupností z důvodu možnosti zneužití [20]. Navíc došlo k ochraně signálu, tzv. anti-spoofing²⁶.

- **Etapa č. IV 1994 ~ 2016 „Blok IIR/ IIR-M/ IIF“**

Následný vývoj umožnil družicím vzájemně komunikovat, určovat vlastní polohy a na základě jednotlivých informací upravovat navigační data. Družice „Blok IIR“ umožňovaly pracovat v případě potřeby v autonomním režimu po dobu 180 dní. Za normálních podmínek, ale komunikovaly s řídicím segmentem jednou za 14 dní. Později došlo k implementaci nového

²⁴ JPO je zkratka pro kosmickou divizi velitelství systémů vzdušných sil USA [11].

²⁵ Pojem selektivní dostupnost (*Selective Availability*) znamená úmyslně chybné určení polohy přijímače [8].

²⁶ Anti-spoofing je ochrana signálu proti jeho zneužití jinými uživateli, tzn. znemožnění manipulace se zaměřením polohy (do systému nemohou být vnášena nepravdivá data z pseudosatelitu).

civilního signálu L2C. Jako poslední v této etapě byly družice „*Blok IIF*“, které přinesly další, v řadě třetí, civilní signál L5 [8][16].

V roce 2000 byla zrušena selektivní dostupnost pro civilní uživatele, je však možné ji opětovně aktivovat. Lokálně byla použita v roce 2015 při výcviku NATO ve Skotsku [19].

- **Etapa č. V 2016 ~20... „*Blok III/ IIF*“**

Čím dál větší modernizace družic přináší stále nové a větší možnosti využití signálů a samotného systému. Dojít má k propojení GPS a Galileo novým civilním signálem L1C [21].

K poslednímu vypuštění družice „*III*“ má dojít roku 2023, přičemž vyslání družic „*IIF*“ je plánováno nejdřív na rok 2034. Životnost obou typů družic je odhadována na 15 let [16].

5.2.2. Signály GPS

Na začátku je důležité zmínit, že GPS se dělila a nadále dělí na dva uživatelské sektory:

- a) standardní služba navigace SPS (*Standard Positioning Service*),
- b) přesná služba navigace PPS (*Precision Positioning Service*).

Z toho plynou i odlišná vysílací pásma pro tyto dvě skupiny. Pásmo L1 je určeno pro oba sektory, pásmo L2 je určeno pouze pro armádu a pro uživatele s oprávněním americké vlády. Rozdíl v zaměření SPS a PPS jsou řádově metry, zatím co u SPS je poloha určena s přesností jednotek metrů, tak u PPS jsou to desítky centimetrů [8]. Sektor SPS byl v minulosti úmyslně opatřen selektivní dostupností, chyba zaměření polohy klesla až na stovky metrů. Důvodem zavedení byla ochrana před zneužitím značně přesného určení polohy nepřitelem [2].

S vývojem GPS se postupně navrhuje nové, civilní pásma, které mají za úkol zlepšit přesnost a kvalitu zaměření polohy. Mezi tyto pásma patří L1C, L2C a pásmo L5, které je zaměřeno na zkvalitnění letecké navigace.

- **Pásmo L1 - 1575,420 MHz a L2 – 1227,600 MHz²⁷**

Pásmo L1 je využíváno oběma, výše zmíněnými, sektory. Modulace je tedy přizpůsobena každému zvlášť, v obou případech se ale využívají pseudonáhodné signály²⁸, zjednodušeně PRN (*Pseudo Random Noise*) [23]. Pásmo L2 je v podstatě nepřetržitě využíváno pouze pro armádní účely.

SPS využívá tzv. C/A kód (*Coarse/Acquisition*) je složen je z 1023 bitů, jejíž délka přenosu trvá 1 milisekundu. Jednotlivé družice mají různé pořadí jedniček a nul neboli bitů, a tedy svůj vlastní C/A kód. Tento kód není nikterak limitován nebo kódován, dostupnost je tedy civilními uživateli v podstatě neomezená.

PPS pracuje s P(Y)-kódem (*Precision code*) jehož délka přenosu je možná až přibližně 267 dnů. Výhoda samotného P-kódu spočívá v modulaci na obou nosných frekvencích a v použití delšího kódu, který je přenášen rychleji. P-kód je však dodatečně kódován Y kódem, který je každý týden jiný. Výsledný P(Y)-kód je anti-spoofing a může ho využívat pouze armáda a pověřeni uživatelé. Samotný P-kód je dostupný i pro civilní uživatele, ve chvíli aktivace Y-kódu, však dochází k zamezení přístupu z důvodu nedostatečného vybavení (Y – kód je aktivován takřka trvale) [2][8][22][25].

²⁷ Na obě pásma L1 a L2 je namodulován navíc M-kód (*Military code*) vytvořený výhradně pro armádní potřebu o neznámé délce. Přijímače těchto signálů jsou schopny rozpoznat a eliminovat falešné signály [24].

²⁸ Pseudonáhodný signál je signál skládající se ze sekvencí „zapnuto“ a „vypnuto“ jdoucí po sobě tak rychle, že může vypadat jako náhodný elektrický šum [23].

- **Pásmo L2C – 1227,600 MHz**

Je v pořadí druhý civilní signál vyvinutý hlavně pro komerční potřeby, který k 9. září 2020 vysílá již 21 družic. V kombinaci se signálem L1 C/A a dvoufrekvenčním přijímačem umožňuje stejně přesnou navigaci, jako je tomu u armádní navigace. Výhodou nového signálu je umožnění ionosférické korekce, která poskytuje zvýšenou přesnost měření.

K úplnému uvedení do provozu, tzn. vysílání signálu 24 družicemi, by měl vstoupit do roku 2023 [27].

- **Pásmo L5 - 1176,450 MHz Safety-Of-Life**

Se nalézá v mezinárodně chráněném civilním pásmu určeném výhradně pro leteckou navigaci. Při kombinaci s pásmem L1 kódu C/A je opět docíleno ionosférické korekce, tudíž větší přesnosti, a odolnosti signálu proti rušení.

Signál je nyní vysílán 14 družicemi v tzv. předprovozu, jeho využívání je pouze na vlastní nebezpečí. V plném provozu by signál L5 měl být do roku 2027.

- **Pásmo L1C – 1575,420 MHz**

Patří mezi nejnovější civilní signály, jehož vývoj byl směřován ke kompatibilitě se systémem Galileo. Schopnost systémů efektivně spolupracovat by mělo přinést zlepšení mobilní navigaci ve městech i dalších hůře přístupných místech. I přesto, že bude vysílán ve stejném pásmu L1 jako kód C/A neměl by s ním být zaměňován²⁹.

Signál měl být k dispozici koncem roku 2020, avšak k 9. září 2020 disponovaly pouze dvě družice „Blok III“ možností vysílání tohoto signálu [27].

- **Pásmo L4 – 1841,400 MHz**

Je vyhrazeno pro vojenské a vědecké výzkumy. Z výzkumného hlediska je toto pásmo vyhrazeno pro pozorování ionosférické vrstvy, která má za následek brždění signálu. Chyba vlivem zpomalení signálu může dosáhnout hodnoty 1 ~ 50 m. Výsledkem těchto pozorování jsou tedy ionosférické korekce, které jsou vnášeny do systému.

- **Pásmo L3 – 1379,913 MHz**

Je využíváno k přenosu dat sledovaných startů balistických střel, detekci jaderných výbuchů a jiných vysokoenergetických zdrojů, tzn. není určeno pro navigační účel [2].

Tab. 6 Přehledová tabulka pásem

Pásmo	Frekvence [MHz]	Využití
<i>L1</i>	1575,420	Civilní i vojenské použití (<i>SPS i PPS</i>)
<i>L1C</i>	1575,420	Kompatibilita se signálem Galileo (<i>SPS</i>)
<i>L2</i>	1227,600	Vojenská navigace (<i>PPS</i>)
<i>L2C</i>	1227,600	Komerční využití (<i>SPS</i>)
<i>L3</i>	1379,913	Sledování nebezpečných dějů (<i>PPS</i>)
<i>L4</i>	1841,400	Sledování ionosférické vrstvy (<i>PPS</i>)
<i>L5</i>	1176,450	Letecká doprava (<i>SPS</i>)

²⁹ Kód C/A zůstane zachován pro zpětnou kompatibilitu.

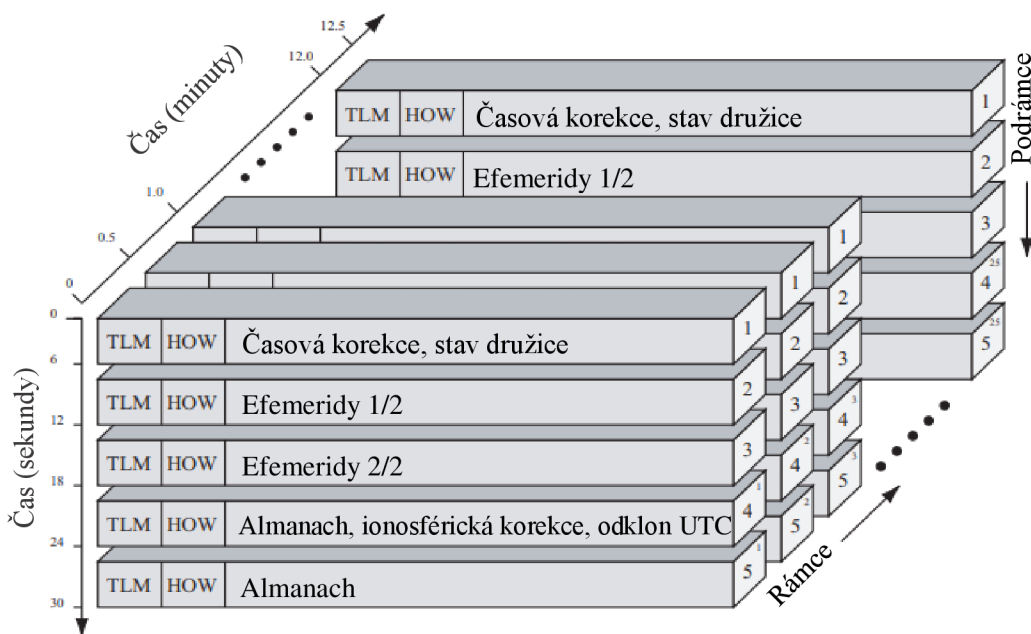
5.2.3. Navigační zpráva GPS

Součástí signálů jsou i navigační zprávy s dělením informací pro civilní uživatele (*CNAV – Civilian NAVigation message*) a armádní uživatele (*MNAV – Military NAVigation message*).

Informace nacházející se v navigační zprávě [8]:

- parametry oběžné dráhy družice tzv. efemeridy ve dvou částech,
- stav družice,
- korekce atomových hodin, odklon času od UTC,
- ionosférická korekce.
- almanach.

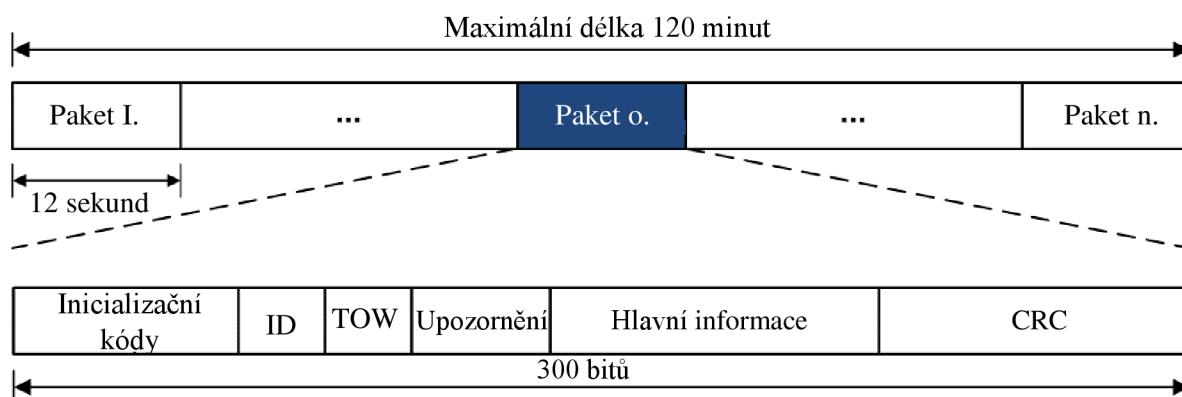
Stará navigační zpráva LNAV je vysílána ve formátu 25 rámců, přičemž každý rámeček je složen z 5 podrámečků (1 podrámeček obsahoval 10 slov o 300 bitech). První tři podrámečky se neustále opakují v každém rámečku, 4. a 5. podrámeček mají, v každém z 25 rámečků, stejnou strukturu, ale odlišné informace. Délka navigační zprávy je 37 500 bitů, rychlost přenosu je 50 b/s, vysílání LNAV tedy trvá 12,5 minuty (Obr. 19).



Obr. 19 Schéma navigační zprávy (převzato z [28] a upraveno)

Každý podrámeček začíná slovem TLM (*Telemetry word*). První třetina, preambule, slouží k synchronizaci, zbylé dvě třetiny jsou určeny službě PPS. Druhým navazujícím slovem neboli číslem, je HOW (*Handover word*), které udává čas GPS ($TOW - Time Of Week$)³⁰ a číslo podrámeček v rámci, aby přijímač poznal, který se právě vysílá [28].

³⁰ Čas systému GPS je udáván v týdnech a sekundách. K restartu dochází každých 1 024 týdnů. Čas GPS a UTC není synchronizován, jejich rozdíl je obsažen v navigační zprávě [25]. Poslední, v pořadí 3. časové období, začalo 6. dubna 2019.



Obr. 20 Vzhled modernizované navigační zprávy GPS

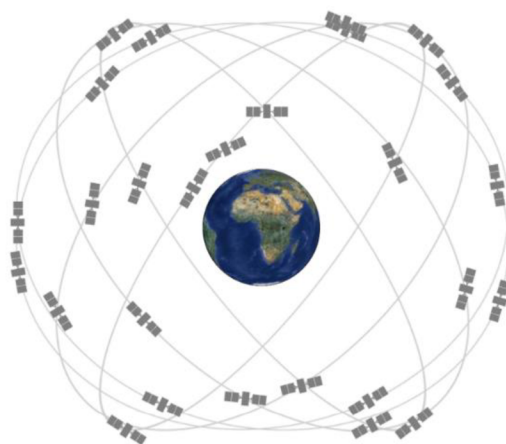
Nová navigační zpráva CNAV, kterou lze vidět na Obr. 20, má stejný obsah, její vysílání je však efektivnější. Namísto opakování rámců a jejich podrámců v pevném pořadí, jako je tomu u původní navigační zprávy, používá CNAV 300bitové komunikační pakety o délce 12 sekund. Jednotlivé pakety lze vysílat v různém pořadí, podle důležitosti zprávy, kterou nesou s variabilní možností opakování [30]. Každý paket obsahuje inicializační kódy, ID typu zprávy, čas týdne *TOW*, upozornění, hlavní informace, které mají dosahovat větší přesnosti, a jako poslední CRC³¹. Typů zpráv může být až 63, v současném předprovozu je však využíváno 14 typů ID (viz. Příloha 1). Zbývající typy jsou ponechány pro budoucí využití [29].

Navigační zprávy, pakety, se mohou lišit podle typu signálu, který je přijímán. Struktura však zůstává převážně stejná. K odlišnostem může patřit obsah hlavních informací, které se určují hlavně s ohledem na cílovou skupinu, a délka vysílání.

5.2.4. Segmenty GPS

- **Kosmický segment**

Je sestaven ze 30 družic, nacházejících se na šesti oběžných drahách vzdálených přibližně 20 200 km. Oběžné dráhy s inklinací 55° vůči rovníku, vzájemně posunuty o 60°. Počet družic nacházejících se na jednotlivých drahách v současné době je přibližně 5. Jejich doba oběhu je rovna polovině siderického dne, tedy 11 hodin a 58 minut a rychlost letu je přibližně 3,1 km/s [26][27]. V provozu je vždy minimálně 24 družic, přičemž z každého místa na Zemi musí přijímač zachytit signál alespoň od čtyř družic.



Obr. 21 Schéma uspořádání družic GPS [30]

³¹ CRC neboli *Cyclic Redundancy Check* slouží k rozpoznání chyb v průběhu transferu informací [29].

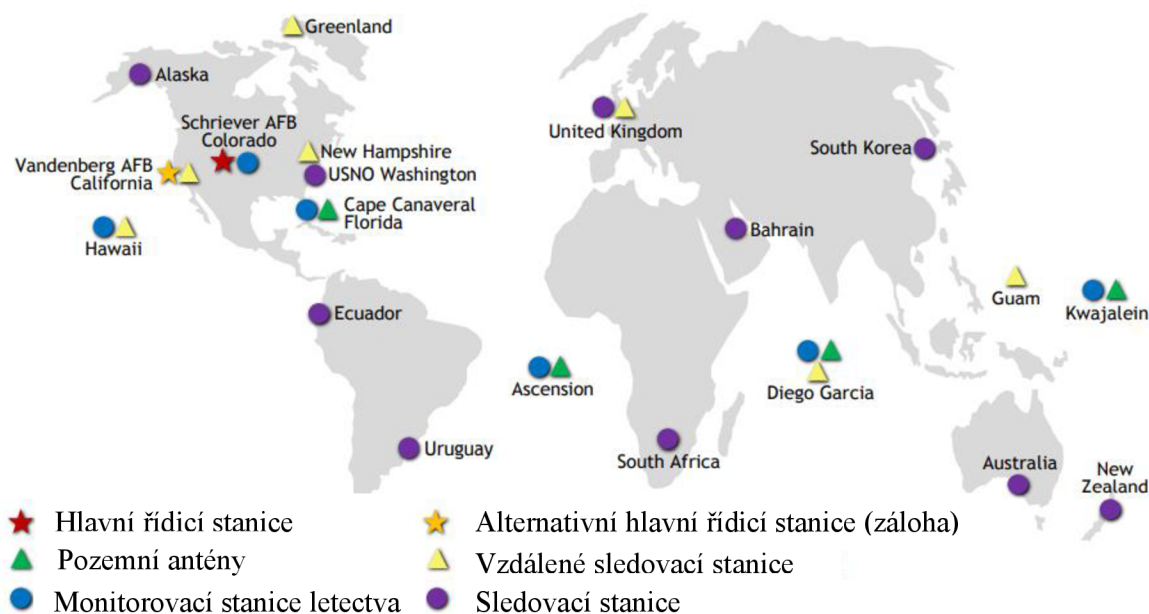
- **Řídicí segment**

Odpovědnost řídicího segmentu spočívá v monitorování, velení a řízení konstelace družic GPS, což zajišťují jednotlivé celky, rozmístěné po celé planetě [16]. Hlavní řídicí stanice se nachází na letecké základně Schriever v Colorado Springs, záložní řídicí stanice je umístěna v Kalifornii. Zbývající část tvoří šestnáct monitorovacích stanic a jedenáct antén (viz Obr. 22).

Hlavní řídicí stanice GPS uskutečňuje následující kroky:

- počítá přesné umístění družic na oběžné dráze, tzn. upravuje jejich parametry,
- vytváří navigační zprávy, které jsou následně družicím předány,
- monitoruje vysílání družic a stav jednotlivých družic,
- provádí údržbu satelitů, pokud vykazují anomálie,
- rozmísťuje družice pro optimální udržení konstelace.

Všechny informace předávané družicím jsou zálohovány na alternativní řídicí stanici [27]. Pokud dojde k odstavení řídicího segmentu, družice budou komunikovat pouze mezi sebou a pracovat v tzv. autonomním režimu přibližně 180 dní.



Obr. 22 Rozmístění jednotlivých celků řídicího segmentu [27]

- **Uživatelský segment**

Je složen z přijímačů a uživatelů, které jej obsluhují. Pomocí signálů vyslaných z družic, přijímač na základě přijatých informací určí polohu, čas a rychlost. Čím více signálů je schopen přijímač zachytit, tím je přesněji určena poloha uživatele. V kapitole 5.2.2 je popsáno, jak se uživatelský segment dělí s ohledem na přijímané signály.

GPS ovlivnila velmi efektivně také celý letecký provoz. Došlo k vylepšení letových tras, čímž bylo docíleno úspory času i peněz. Pozitivním je také rozšíření GPS do všech fází letu, které se využije hlavně v oblastech, kde chybí pozemní zařízení. Modernizace GPS v oblasti letectví stále nekončí a je jen otázkou, jaká vylepšení přinese signál L5 až bude oficiálně uveden do provozu.

6. Zhodnocení systémů GNSS

Tato kapitola se zaměřuje na zhodnocení jednotlivých specifík GNSS systémů GLONASS, GPS a Galileo. Systémy jsou srovnány z hlediska dostupnosti, integrity, nepřetržitosti a přesnosti, které se řadí k nejdůležitějším parametrům všech GNSS.

6.1. Dostupnost

Dostupnost lze chápat i jako **teorii spolehlivosti**, která procentuálně udává míru času, kdy je systém, v daném prostoru, k dispozici. 100 % dostupnost znamená mít systém k dispozici kdekoliv, každou minutu dne, po celý rok, tak to po technické stránce nefunguje. Existují místa, kde signál vypadává, není dostupný vůbec nebo naopak je dostupný skoro vždy. Vyjádření „skoro“ můžeme definovat jedním jednoduchým vzorcem, kterým lze procentuálně určit dobu, po kterou systém fungoval a po kterou byl nedostupný.

$$\text{dostupnost [\%]} = \left(\frac{D_d}{D_d + D_n} \right) \cdot 100 \quad (6.1)$$

, kde D_d ...celková doba dostupnosti,

D_n ...doba, po kterou byl systém nedostupný.

Následující tabulka Tab. 7 ukazuje, kolik hodin dostupnosti či nedostupnosti odpovídá procentuálnímu vyjádření spolehlivosti systému za jeden rok. Existují tabulky, které podle procentuální dostupnosti klasifikují zařízení nebo systémy jako „vysoce dostupné“ s maximální pravděpodobností výpadku 0,1 % [77]. Všechna GNSS se prozatím pohybují v pravděpodobnosti výpadku okolo 5 %, tzn. dostupnost všech 24 družic v daném prostoru a čase za jeden rok je pouze 95 %, v případě systému Galileo je to pouze 87 %.

Tab. 7 Dostupnost systémů (převzato z [82] a upraveno)

Dostupnost [%]	K dispozici [hodiny]	Nedostupný [hodiny]	Nedostupnost [dny]
95,0	8 322,00	438,00	18,250
99,0	8 672,40	87,60 (87 h 36 min)	3,650
99,9	8 751,20	8,76 (8 h 46 min)	0,365
100,0	8 760,00	0,00	0,00

Pro leteckou dopravu je stanovená dostupnost, daná legislativou ČR, 99,0 ~ 99,999 % [76]. Tyto hodnoty jsou však vázány na okamžitou dostupnost v daném místě a čase. Okamžitou dostupností je myšleno, že i přes celosvětový náhlý pokles dostupnosti, jak lze vidět na Obr. 24, je dostupnost v ČR stále téměř 100 %.

Na Obr. 23 lze vidět stav dostupnosti jednotlivých GNSS v 09:00 UTC, dne 10.03.2021. Zobrazené systémy GNSS, udávají dostupnost 100 %, tzn. jejich signál (L1) byl v tuto dobu dostupný po celém světě, ale i přes to mohla být mnohá měření nepoužitelná. Pokud se podíváme pod dílčí části Obr. 23, lze najít i hodnotu PDOP, tzv. *polohové ředění přesnosti*, které má s dostupností úzkou s kontinuitou. PDOP určuje stupeň přesnosti měření polohy v závislosti na uspořádání družic, kdy nejnižší hodnota zaručuje nejvyšší přesnost měření. Hraniční hodnota klesání dostupnosti ze 100 % nastane pokud PDOP > 6.

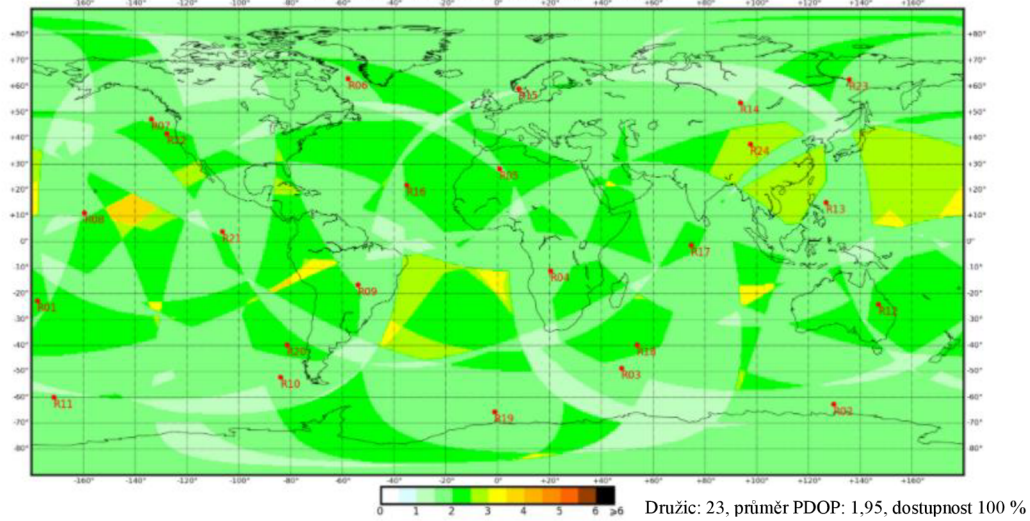
Kvalita měření polohy systémy GNSS vzhledem k hodnotě PDOP udává Tab. 8.



GLONASS

L1 GLONASS PDOP, úhel > 5°, PDOP_{max} = 6, 10.03.2021, 09:00 UTC

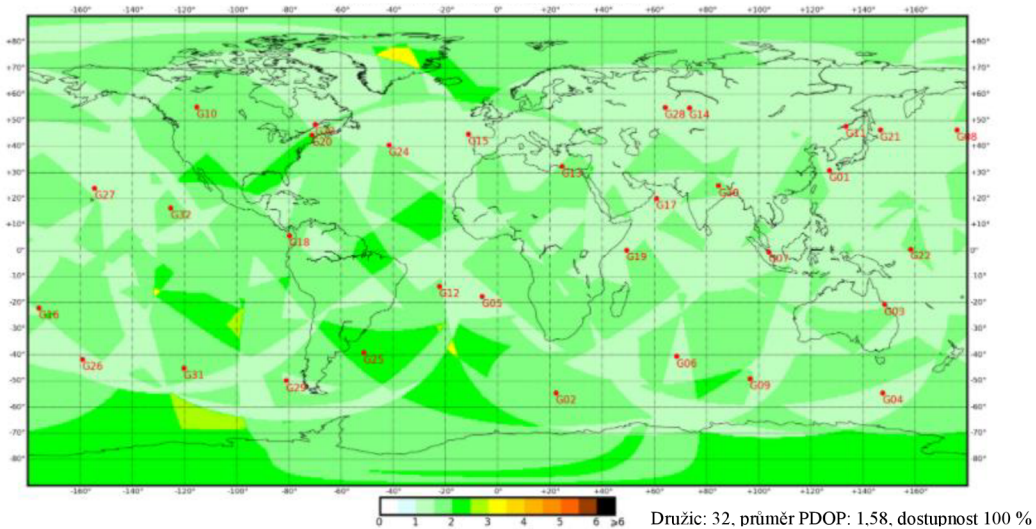
a



GPS

L1 GPS PDOP, úhel > 5°, PDOP_{max} = 6, 10.03.2021, 09:00 UTC

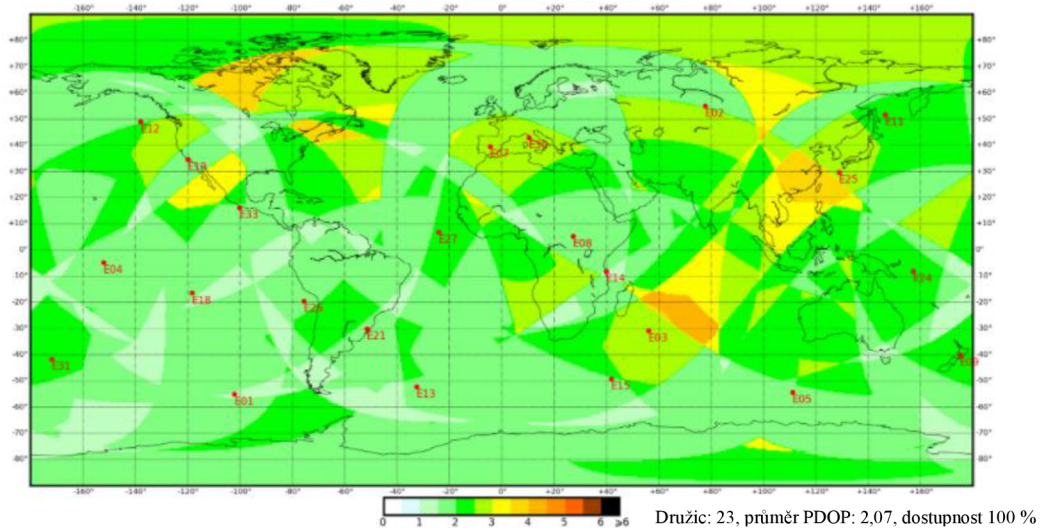
b



Galileo

L1 Galileo PDOP, úhel > 5°, PDOP_{max} = 6, 10.03.2021, 09:00 UTC

c



Obr. 23 PDOP pro GLONASS, GPS a Galileo v 09:00 UTC, dne 10.03.2021
(převzato z [82] a upraveno)

Tab. 8 Stupně dostupnosti systému (převzato z [83] a upraveno)

PDOP	Hodnocení stupně dostupnosti	Charakteristika přesnosti měření polohy
1	Výborný	Nejvyšší možná dostupnost systému.
1-2	Ideální	Systém lze využít ve všech aplikacích, kromě velmi přesných.
2-5	Dobry	Minimální dostupnost systému pro přesná měření.
5-10	Horší	Určení polohy použit vyžaduje korekce měření.
10-20	Špatný	Měření slouží pouze k velmi hrubým odhadům polohy.
>20	Velmi špatný	Systém je nedostupný. Dochází k odchýlkám až 300 m.

I přes 100 % dostupnost všech GNSS se ani v jednom systému během dne průměrná hodnota PDOP neshodovala. U GLONASS se pohybovala většinu dne na hodnotě 1,95 a v 17:00 UTC dokonce došlo k poklesu dostupnosti na 99,99 %. Průměr PDOP u GPS během dne nekolísala a zůstal na stálé hodnotě 1,58 a až k večerním hodinám poklesl na 1,59. Systému Galileo se průměr PDOP měnil proměnlivě po celý den. Ráno dosahoval nejhorších hodnot a během dne měnil k lepšímu až do 17:00 UTC, kdy hodnota opět klesla, ale ve 20:00 UTC se opět zlepšila. Pro podrobnější průběh průměrných hodnot PDOP během dne lze využít Tab. 9.

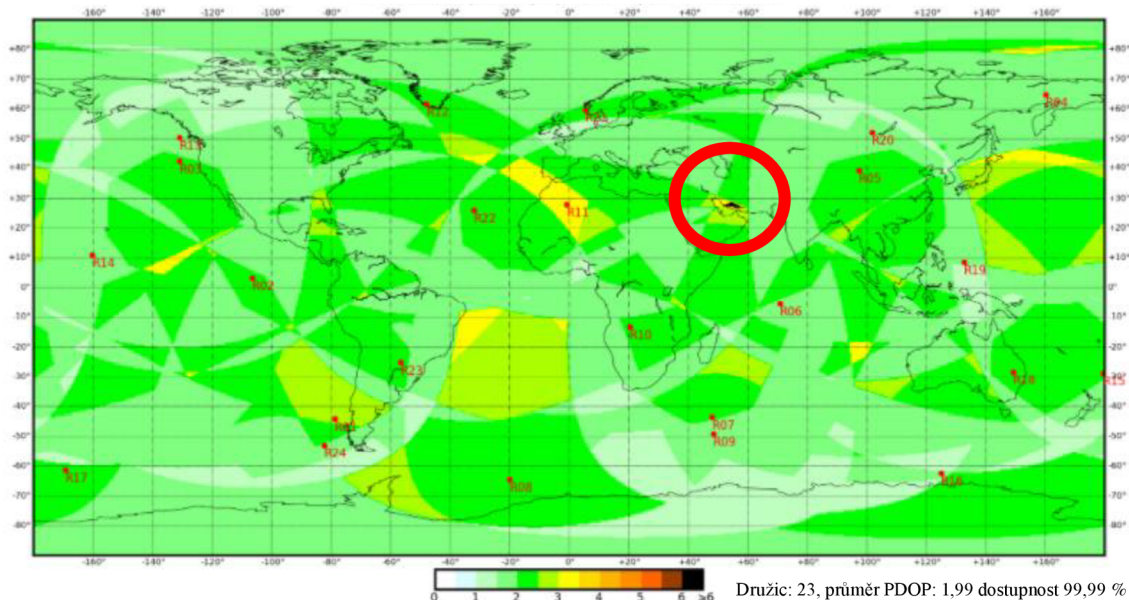
Z pohledu 100 % dostupnosti na kvalitu měřených obstaral ve sledovaný den nejlépe systém GPS. V průběhu dne nevystoupil ze stupně „ideální“ dostupnosti, čemuž odpovídá Obr. 23b, který se v průběhu dne výrazně neměnil. Systém GLONASS se celý den pohyboval průměrem hodnot PDOP na rozhraní „ideální“ a „dobrá“ dostupnost (viz Obr. 23a). V 17:00 se však na Obr. 24, v přímořské části Iráku ukázala část, kde odpovídala PDOP > 6 a dostupnost systému klesla na 99,99 %, tzn. nenastalo globální pokrytí (přesnost měření klesla pod únosnou mez). Systém Galileo z rána zaostával na stupni dostupnosti „dobry“, ale již po 11 h dopolední odpovídal stupni „ideální“. Ranní hodnoty PDOP byly nejhorší v Severní Americe a v Asii a jejím okolí (viz Obr. 23c), a ani během průběhu dne se hodnoty na severu Ruska moc nelepšily. Nutno připomenout, že systém Galileo oproti systémům GLONASS a GPS stále není oficiálně uveden do provozu, a i přes to si vede mezi ostatními systémy GNSS obstojně. V porovnání se systémem GLONASS nedošlo u systému Galileo v průběhu dne k poklesu dostupnosti.

Tab. 9 Průběh hodnot PDOP dne 10.03.2021 u systémů GLONASS, GPS a Galileo (převzato z [82] a upraveno)

Čas (UTC)	GLONASS	GPS	Galileo
09:00	1,95	1,58	2,07
11:00	1,99	1,58	1,97
13:00	1,95	1,58	1,98
17:00	1,99 (dostupnost 99,99 %)	1,58	2,01
20:00	1,95	1,59	1,94

GLONASS

L1 GLONASS PDOP, úhel > 5°, PDOP_{max} = 6, 10.03.2021, 17:00 UTC



Obr. 24 Pokles dostupnosti GLONASS v 17:00 UTC (převzato z [82] a upraveno)

Systémy byly sledovány ještě pár následujících dní. Dostupnost u systémů GPS a Galileo byla neměnná, tedy 100 %. Průměrné hodnoty PDOP u GPS zůstaly stejné jako v Tab. 9 a ani u systému Galileo se nedocházelo k výrazným změnám. K poklesu dostupnosti došlo u systému GLONASS hned několikrát v průběhu následujících 2 dnů od záznamů. Dostupnost se během dní pohybovala na hodnotách od 99,94 % do 100 %. Je možné, že pokles dostupnosti v mnohých částech světa má spojitost s jednou chybějící funkční družicí. Mnohdy však nastal nad částmi oceánů, kde se výskyt letecké dopravy příliš neočekává.

6.2. Integrita

Integritou systému je myšlena poruchovost neboli *stupeň spolehlivosti* a spíše než to, je integritou myšlena časová prodleva ohlášení poruchy nebo snížení přesnosti dat přenášené systémem. Být informován o výpadku nejlépe hned je požadavkem každého uživatele jakéhokoliv zařízení či systému stejně, jako je důležitým požadavkem správná a 100 % funkčnost systému. Představa je to hezká, ale v případě samostatných systémů GNSS, prozatím, těžce realizovatelná. Zde se chybu v lepším případě dozvíme za pár sekund až několik málo minut, v horším až za několik hodin, což pro přesné navigační systémy, s dobou ohlášení chyby 2 s, je nepřijatelné. Přesto se s GNSS používanou pro přesnou navigaci do budoucna počítá. Prozatím je maximálně možného stupně integrity GNSS dosahováno monitorovacími stanicemi, rozmístěnými po celém světě, a podpůrnými systémy (SBAS, GBAS a ABAS). Ty zvyšují stupeň integrity a jsou schopny upozornit na možnou chybu v toku informací. V Tab. 10 jsou uvedeny požadavky na integritu GNSS pro leteckou dopravu, které jsou limitem pro používání družicové navigace v letecké dopravě. Za jiných okolností smí být GNSS použita pouze jako doplňková nikoliv jako plnohodnotná navigační služba.

Z pohledu integrity je velmi složité porovnávat jednotlivé systémy GNSS. Důvodem jsou chybějící podklady u systému GLONASS a Galileo, které by uváděly hodnoty integrity a časovou prodlevu upozornění. Lze se však domnívat, že časová prodleva velmi záleží na

rozmístění dílčích částí pozemního segmentu a rozšiřujících systémů, z čehož by pravděpodobně nejhůře vyšel systém GLONASS. Jistou roli hraje i druh chyby, která může za pokles integrity. Družice jsou schopny spolu komunikovat, předávat si informace a do jisté míry svoji funkci monitorovat sami. Otázkou tedy zůstává, k jak velké chybě musí dojít, aby sama družice vyhodnotila nekorektnost informací, resp. jak je možné, že mnohdy družici odstaví až pozemní segment.

Tab. 10 Legislativní požadavky na integritu GNSS (převzato z [76] a upraveno)

Fáze letu	Integrita	Časová prodleva upozornění na chybu
Let po trati	$1 - 10^{-7}/h$	5 minut (v konečné fázi tratě 15 s)
Přístrojové a přesné přiblížení	$1 - 2 \cdot 10^{-7}/h$ (na každé přiblížení)	6 s

Z výše uvedených důvodů budou přiblíženy složky integrity, které mají včas upozornit na očekávané selhání systému.

- Probability of a Major Service Failure* neboli *pravděpodobnost závažného selhání*. Hodnota, udávaná formou pravděpodobnosti, značí možné překročení maximální únosné odchylky polohy (*SIS URE NTE Tolerance*) bez předchozího varování, tzn. nemusí dojít k předchozímu upozornění, protože chyba nebude detekována.
- Time to Alert (TTA)* neboli *čas do výstrahy*. Je časové okno, ve kterém musí být vysláno upozornění na závažný pokles přesnosti údajů. Pokud dojde, v čase určeném, (TTA) upozornění na pokles integrity je to definováno jako „*událost integrity*“ nikoliv jako „*selhání integrity*“.
- SIS URE NTE Tolerance (Signal In Space User Rang Error Not To Exceed Tolerance)* udává toleranci odchylky měření, jejímž překročením klesá integrita systému. U systému GLONASS je maximální možná odchylka 70 m, u systému GPS 48 m. Pro systém Galileo nebylo možné hodnotu dohledat [86] [87]. V letectví jsou tyto hodnoty vázány fázemi letu. Následující Tab. 11 udává limity výstrahy na integritu pro systémy GNSS v jednotlivých fázích letu.

Tab. 11 Legislativní limity výstrahy v letectví pro GNSS (převzato z [76] a upraveno)

Fáze letu	Limit výstrahy horizontálně	Limit výstrahy vertikálně
Let po trati		
a) VP – oceánský a kontinentální s nízkou hustotou provozu	a) 4 NM	a) N/A
b) VP – kontinentální	b) 2 NM	b) N/A
c) Konečná fáze	c) 1 NM	c) N/A
Přiblížování		
a) NPA	a) 0,3 NM	a) N/A
b) APV-I	b) 130 ft	b) 164 ft
c) APV-II	c) 130 ft	c) 66 ft
d) Přesné přiblížení CAT I	d) 130 ft	d) 115 ~ 33 ft

6.3. Kontinuita

Kontinuita či **spojitost** systému znamená, že informace přenášené systémem budou k dispozici pořád, tzn. systém je schopný fungovat bez náhodného výpadku. Zároveň se počítá s tím, že systém bude zachovávat určitý stupeň přesnosti dat, což má úzké spojení s integritou systému. Selhání kontinuity upozorňuje na snížení korektnosti informací nebo na náhlý výpadek či pokles výkonnosti systému. O přerušení kontinuity se v letectví můžeme dozvědět formou zpráv NOTAM, které upozorňují na možný výpadek systému a také na plánované odstávky systému. Níže uvedená Tab. 12 udává hodnoty kontinuity pro jednotlivé fáze letu, přičemž nižší hodnota pro let po trati je dána jako minimální pro použití systémů.

Tab. 12 Legislativní stanovení kontinuity GNSS (převzato z [76] a upraveno)

Fáze letu	Kontinuita
Let po trati	$1 \sim 1 \cdot 10^{-4}/h$ až $1 \sim 1 \cdot 10^{-8}/h$
Přístrojové a přesné přiblížení	$1 \sim 8 \cdot 10^{-6}$ na 15 s

Plánovaná přerušení provozu systémů GPS a GLONASS musí být oznámena, v obou případech, s předstihem nejméně 48 hodin. V případě včasného upozornění na odstávku to není bráno jako selhání kontinuity. Neplánované, náhlé selhání kontinuity musí být hlášeno co nejdříve od zjištění.

Tab. 13 Pravděpodobnost kontinuity každou hodinu dne pro systém GLONASS a GPS (převzato z [86] a [87] a upraveno)

Systém	Pravděpodobnost kontinuity
GLONASS	$\geq 99,8 \% / h$ → možnost 0,12 s travajícího sehlání
GPS	$\geq 99,98 \% / h$ → možnost 0,012 s travajícího selhání

Lze si všimnout, že v Tab. 13 chybí informace o systému Galileo, které dle dokumentu [85] budou součástí novějšího vydání. Samotná Tab. 13 udává pravděpodobnost kontinuity systémů v průběhu každé jedné hodiny systémů GLONASS a GPS. Přičemž možnost náhlého selhání kontinuity je u systému GLONASS 0,20 %, u systému GPS 0,02 %, čemuž odpovídají i časové hodnoty v tabulce.

Možnost porovnat hodnoty dané systémovými dokumenty s hodnotami danými legislativou ČR je komplikovaná z důvodu nedohledatelnosti hodnot pravděpodobnosti kontinuity dané Tab. 12 v procentuálních ani časových hodnotách.

6.4. Přesnost

Přesnost je parametrem udávajícím maximální možnou celkovou chybu měření systému. U GNSS je přesnost poměrem mezi skutečnou polohou a polohou měřenou. Korektnost polohových údajů musí být dána s minimálně 95 % pravděpodobností požadované přesnosti na GNSS. Ke zhoršení přesnosti dochází vlivem ionosférických změn, které způsobují nejvýznamnější chyby, chyb v efemeridách a času, vícecestným šířením, a jiné. Zároveň příjem

signálu ovlivňují i manévry letounu, kdy může dojít k „ukrytí“ palubní antény GNSS před družicemi. Maximální možnou odchylku danou GNSS od přesné polohy letounu pro leteckou dopravu udává Tab. 14.

Tab. 14 Legislativní požadavky přesnosti na GNSS (převzato z [76] a upraveno)

Fáze letu	Horizontální přesnost (95 %)	Vertikální přesnost (95 %)
Let po trati	2 NM konečná fáze 0,4 NM	N/A
Přístrojové a přesné přiblížení	52 ft	66 ft – APV-I 26 ft – APV-II 20 ft ~ 13 ft – přesné přiblížení

K přehledu přesností systémů GNSS byly hodnoty převzaty z posledních vydaných dokumentů systémů, týkajících se signálu pro standardní navigaci (základní službu u systému Galileo). Hodnoty jsou průměrem za jeden rok, kdy s 95 % pravděpodobností měřené hodnoty nedosahovaly odchylek větších, než jsou hodnoty uvedeny v Tab. 15 pro jednotlivé systémy. Z uvedených hodnot vyplývá, že největších průměrných přesností měření polohy za uplynulý rok dosahoval systém GLONASS. Naopak nejlépe z pohledu největší chyby v určení polohy vyšel systém Galileo, jehož maximální polohové odchylky jsou téměř o polovinu menší. Systém GPS, i přes mnohdy udávanou největší přesnost v systémech GNSS, se s přesností polohy pohybuje uprostřed. Z pohledu legislativy na GNSS je dle uvedených hodnot v Tab. 15 schopný pouze systém Galileo splnit požadavky pro přístrojové přiblížení (APV-I) a to i bez rozšiřujících systémů³².

Tab. 15 Průměrná přesnost systémů GLONASS, GPS za rok 2020 a Galileo za rok 2019 (převzato z [85], [86] a [87] a upraveno)

Chyba určení polohy v 95 % měření	GLONASS	GPS	Galileo
Horizontálně (průměr)	≤ 5 m (16 ft)	≤ 8 m (26 ft)	≤ 7,6 m (24 ft)
Vertikálně (průměr)	≤ 9 m (29 ft)	≤ 13 m (42 ft)	≤ 12,8 m (41 ft)
Horizontálně (nejhůř)	≤ 12 m (38 ft)	≤ 15 m (48 ft)	≤ 8,2 m (26 ft)
Vertikálně (nejhůř)	≤ 25 m (80 ft)	≤ 33 m (106 ft)	≤ 15 m (48 ft)
Přesnost přenosu času	≤ 40 ns	≤ 30 ns	≤ 30 ns

³² Systém Galileo však stále není oficiálně uveden do provozu, proto ho není možné v letecké dopravě prozatím využívat!

7. Závěr

V současnosti si systémy GNSS našly uplatnění v mnoha technických i netechnických oblastech, kde značně posouvají hranice přesnosti zaměření polohy. Cílem této bakalářské práce bylo čtenáři podrobně přiblížit systém GLONASS, jakožto jeden ze čtyř systémů GNSS, který je pro mnohé uživatele neznámý, avšak jimi téměř každodenně používaný.

První část práce slouží k seznámení uživatelů se složením systémů GNSS a jejich principem práce a s typy měřících metod, které jsou nezbytné k určení polohy. Následuje stručný přehled historie systémů GNSS, které byly velmi důležitým milníkem k sestrojení globální družicových navigačních systémů tak, jak je známe dnes.

Dále se bakalářská práce zabývá hlavní problematikou, systémem GLONASS, která je členěna do několika podkapitol. Jejich témata se zabírají vznikem systému, vysílanými signály přes navigační zprávy až po jednotlivé dílčí systémové segmenty. Velký význam autor připisuje duálnímu přijímači GLONASS-GPS, který je rozebírán v kapitole 4.1.1 v níž uvedené informace mají velký potenciál pro budoucí rozvoj systému GLONASS v letectví. Zároveň kapitola 4.1.2 má čtenáři přiblížit velmi úzké využití systému v problematice letecké navigace, a to jak traťové, tak přibližovací. Lze však předpokládat, že s postupným rozvojem pozemní infrastruktury systému GLONASS a rozšiřujícího systému SBAS dojde i k velkému rozmachu na poli navigačních zařízení.

Součástí práce jsou i systémy GPS, který je pravděpodobně nejznámějším družicovým navigačním zařízením na světě, a Galileo, první civilní družicový navigační systém vyvíjený pod záštitou Evropské unie. Důvodem jejich zařazení do bakalářské práce bylo pozdější využití nejnovějších systémových dat, kdy autorka nechtěl hodnotit systémy bez jejich předchozího představení čtenáři. V samotném rozboru se práce také více zaměřuje na systém Galileo, který by měl velkým přínosem v civilním používání. Přičemž již dnes, kdy systém stále není oficiálně uveden do provozu, vykazuje velmi příznivé výsledky. O tom se lze přesvědčit v 5. kapitole, byť data o systému nejsou kompletní.

Samotná kapitola 6 se zaměřuje na porovnání systémů z hlediska nejdůležitějších kritérií, tj. dostupnost, integrita, kontinuita a přesnost. Informace v ní poskytnuté byly vyňaty jak z leteckého předpisu L10 pro Českou republiku [76], tak ze systémových dokumentů (systémový dokument pro systém GLONASS [86], systém Galileo [85] a systém GPS [87]). Nutno podotknout, že dokument systému Galileo neobsahoval všechny informace o rozebíraných kritériích. I přesto jsou i částečné informace o systému Galileo velmi slibné a lze s napětím očekávat, jaké přínosy bude mít tento systém v letecké dopravě. Naopak systém GLONASS byl, alespoň co se týče dostupnosti a obsazenosti oběžných drah, malým zklamáním. V otázce dostupnosti lze argumentovat tím, že systém byl mnohdy nedostupný v odlehlých částech světa. Po sledování průběhu dostupnosti následujících pár dní, po zaznamenání údajů v Tab. 9, si však jako autorka dovoluji oponovat. Není možné, aby systém, vedený jako „globální“ měl i když malé výpadky, a to nejenom v průběhu jednoho dne, ale i více, po sobě jdoucích dní. Zároveň se zde nabízí otázka, zda tyto výpadky nejsou způsobeny jednou chybějící družicí v konstelaci?

Z konečného pohledu na všechny výše popsané systémy lze očekávat, že jejich propojení, a to ať pomocí „sdílených“ frekvencí či společným přijímačem bude velkým přínosem pro všechna technická i netechnická odvětví. Z hlediska letectví pravděpodobně dojde k lepšímu a kvalitnějšímu přehledu o vzdušné situaci, čímž by se i letecké tratě mohly stát ještě efektivnějšími. Zároveň by měla vzrůst kvalita letecké navigace v samotném letadle, kde by se

jednotlivé systémy se společným přijímačem měly doplňovat a zvyšovat přesnost určení polohy bez významnějších chyb. Co se týče zařazení systémů GNSS ve fázi přibližování do tzv. přesných přístrojových přiblíženích, je krok budoucí, ale pravděpodobně ne moc vzdálený. Lze se domnívat, že tento krok bude velmi úzce spjat s přijímačem, jehož vývoj spadá pod EUROCONTROL.

Rychlost, jakou se systémy GNSS dnes vyvíjí je téměř blesková. Pokud se poohlédneme zpět do minulosti, kde jsme byli před 20 lety, a to v technice celkově, je spíše otázkou, kde za stejné časové období budeme v budoucnu.

Samotný přínos práce autorka vidí v ucelení informací o systému GLONASS, které jsou mnohdy neúplné, v jiném jazyku nebo zastaralé a nové informace jsou dohledatelné velmi obtížně. Přičemž i samotná oficiální webová stránka systému má obsahově rozdílné informace v anglické a ruském jazyce. Přínosem této práce může být pro studenty bakalářského oboru Profesionální pilot i magisterského oboru Technologie provozu letadlové a letištní techniky, jejichž předměty, zaměřené na radiokomunikaci, se systémy GNSS zabývají, a to převážně systémem GPS. Z tohoto pohledu by si student mohl rozšířit znalosti o systému GLONASS a z velké části i o systém Galileo, který by autorka jako plnohodnotné téma na bakalářskou práci navrhla za 2 až 3 roky, kdy systém bude snad již plně v provozu.

Z důvodu obsahově omezené kapacity bakalářské práce, která již byla překročena, by autorka budoucím studentům, kteří se zajímají o systémy GNSS nebo o budoucí rozvoj systému GLONASS doporučila se zaměřit na systém SDCM, tedy ruský rozšiřující systém SBAS. Také by bylo jistě vhodné se blíže zaměřit na duální přijímač GLONASS-GPS, jehož uvedení na trh bude jistě pro systém GLONASS velmi zásadní.

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Anglický název	Český název
AAIM	Airborne Autonomous Integrity Monitoring	autonomní monitorování integrity palubního přijímače GNSS
ABAS	Aircraft Based Augmentation system	rozšiřovací systém GNSS
APV	Approach Procedure with Vertical guidance	postup přiblížení s vertikálním vedením
b/s	Bit per second	bit za sekundu
BARO-VNAV	BARometric Vertical NAVigation	barometrická vertikální navigace
C/A kód	Coarse/Acquisition code	hrubý/dostupný kód
C/NAV	Commercial NAVigation message	navigační zprávy pro komerční službu (Galileo)
CDMA	Code Division Multiple Access	kódové dělení vysílacího pásma
CM	Commercial Service	komerční služba
CNAV	Civilian Navigation message	civilní navigační zpráva
CRC	Cyclic Redundancy Check	kontrola cyklickým kódem
CS	Commercial Services	komerční služba
ČR		Česká republika
DFCM	Dual Frequency Multi Constellation	Palubní přijímač signálů všech GNSS (právě ve vývoji)
DME	Distance Measuring Equipment	palubní dálkoměrné zařízení
DOD	Dilution Of precision	ředění přesnosti
ESA	European Space Agency	Evropská vesmírná agentura
F/NAV	Freely accessible NAVigation message	navigační zprávy pro základní navigaci (Galileo)
FDMA	Frequency Division Multiple Access	frekvenční dělení vysílacího pásma
FEC	Forward Error Correction	samoopravné kódy
ft	Feet	stopa
G/NAV	Govermental NAVigation message	navigační zprávy pro veřejně regulovanou službu (Galileo)
GBAS	Ground Based Augmentation System	pozemní rozšiřující systém
GLONASS	GLObalnaja NAVigacionnaja Sputnikovaja Sistěma	ruský globální družicový navigační systém GLONASS
GNSS	Global Navigation Satellite System	globální družicový navigační systém
HOW	Handover word	
I/NAV	Integrity NAVigation message	Navigační zpráva systému Galileo
ILS	Instrument Landing System	systém řízení přesného přiblížení na přistání



JPO	Joint Program Office	Kosmická divize velitelství systémů vzdušných sil USA
km	kilometre	kilometr
LEO	Low Earth Orbit	nízká oběžná dráha
LNAV	Lateral NAVigation	laterální navigace
LORAN	Long Range Navigation	hyperbolický systém daleké navigace
LP	Localiser Performance	výkonnost směrového majáku
LPV	Localiser Performance with Vertical guidance	výkonnost směrového majáku s vertikálním vedením
MHz	Megahertz	megahertz
MNAV	Military Navigation Message	vojenská navigační zpráva
NASA	National Aeronautics Space Administration	národní úřad pro letectví a vesmír
NATO	North Atlantic Treaty Organization	severoatlantická aliance
NAVSTAR GPS	Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System	americký globální družicový navigační systém GPS
NM	Nautical Mile	námořní míle
NOTAM	Notice(s) To Airman	letecká informační zpráva
NPA	Non-Precision Approach	nepřesné přiblížení na přistání
OS	Open Service	základní služba
PBN	Performance Based Navigation	navigace splňující požadované nároky na výkonnost
PDOP	Positon Dilution Of Precision	polohové ředění přesnosti
P-kód	Precision code	přesný kód
PPS	Precision Positioning Service	přesná služba navigace
PRS	Public Regulated Service	veřejná regulovaná služba
RAIM	Reciever Autonomous Integrity Monitoring	autonomní monitorování integrity přijímače
RNAV	Area Navigation	navigační způsob
RNP	Required Navigation Performance	požadovaná navigační výkonnost
SAR	Search And Rescue Service	pátrací a záchranná služba
SBAS	Satellite Based Augmentation System	družicový rozšiřující systém
SIS URE NTE Tolerance	Signal In Space User Rang Error Not To Exceed Tolerance	maximální tolerance odchylky měření
SOL	Safety-of-life	název vysílacího pásma vyhrazeného pro leteckou dopravu
SPS	Standard Positioning Service	standardní služba navigace



TLM	Telemetry word	synchronizační kód (GPS)
TOW	Time Of Week	čas týdne (GPS)
TRANSIT	Navy Navigation Satellite Systém	námořní navigační družicový systém
TT&C	Telemetry, Tracking and Command Station	stanice telemetrie, sledování a kontroly
TTA	Time To Alert	čas do upozornění
UHF	Ultra Hight Frequency	ultra krátké vlny
USD	U.S. Dolar	americký dolar
USSF	United States Space Force	Vesmírné síly Spojených států amerických
UTC	Coordinated Universal Time	koordinovaný světový čas
VHF	Very High Frequency	velmi krátké vlny
VNAV	Vertical Navigation	vertikální navigace
RNSS	Radio Navigation Satellite Services	globální kritická infrastruktura
ARNS	Aeronautical Radio Navigation Services	frekvenční spektrum pro civilní letectví
VP		vzdušný prostor

Seznam zkratk v rovnicích

Symbol	Název	Jednotka
d_k	konečná vzdálenost	[m]
t_p	doba přenosu signálu přijímač-družice	[s]
t_d	doba přenosu signálu družice-přijímač	[s]
c	rychlost šíření rádiových vln \approx rychlost světla $3 \cdot 10^8$ m/s.	[m/s]
d_i	vzdálenost za ideálního stavu	[m]
Δt_i	časový rozdíl mezi vysláním a příjmem signálu	[s]
d_s	skuteční vzdálenost přijímač-družice	[m]
Δt_0	časový posun mezi časem přijímače a časem systému	[s]
Δt_z	zdánlivý čas chodu signálu	[s]
d_1, d_2, d_3, d_4	zdánlivé vzdálenosti přijímač-družice	[m]
X, Y, Z	souřadnice polohy přijímače	[°, ', '']
x_i, y_i, z_i	souřadnice polohy družic	[°, ', '']
f_{k_n}	označení vysílacího pásma	
f_{0_n}	frekvence středu vysílacího pásma	[Hz]
k	frekvenční kanál $< -7; 6 >$	
Δf_n	separace vysílacích kanálů	[Hz]
f_0	základní frekvence 10,23 MHz	[Hz]
D_a	celková doba dostupnosti	[%]
D_n	doba, po kterou byl systém nedostupný	[s]

Seznam obrázků

- Obr. 1 Složení systémů GNSS (převzato z [11] a upraveno)
- Obr. 2 Schéma struktury GNSS
- Obr. 3 Schéma funkce a) pasivního systému b) aktivního systému
- Obr. 4 Skutečnost kódových měření (převzato z [2] a upraveno)
- Obr. 5 Určení polohy přijímače pomocí dvou družic (převzato z [8] a upraveno)
- Obr. 6 Závislost časového posunu Δt_0 na poloze
- Obr. 7 Popis funkce systému TRANSIT (převzato z [10] a upraveno)
- Obr. 8 Vývoj družic systému GLONASS (převzato z [60] a upraveno)
- Obr. 9 Rozdíl provedení letu mezi konvenční a navigací podle výkonnosti (převzato z [78] a upraveno)
- Obr. 10 Schéma funkce FDMA přenosu informací v systému GLONASS
- Obr. 11 Vzhled FDMA navigační zprávy
- Obr. 12 Schéma konstelace družic GLONASS [57]
- Obr. 13 Rozmístění jednotlivých celků řídicího segmentu GLONASS (převzato z [86] a upraveno)
- Obr. 14 Schéma rozmístění frekvencí Galileo (převzato z [43] a upraveno)
- Obr. 15 Struktura zpráv I/NAV a F/NAV (převzato z [53] a upraveno)
- Obr. 16 Vzhled "strany" F/NAV (převzato z [48] a upraveno)
- Obr. 17 Vzhled konstelace Galileo [49]
- Obr. 18 Monitorovací stanice SvalSat, Špicberky [50]
- Obr. 19 Schéma navigační zprávy (převzato z [28] a upraveno)
- Obr. 20 Vzhled modernizované navigační zprávy GPS
- Obr. 21 Schéma uspořádání družic GPS [30]
- Obr. 22 Rozmístění jednotlivých celků řídicího segmentu [27]
- Obr. 23 PDOP pro GLONASS, GPS a Galileo v 09:00 UTC, dne 10.03.2021
- Obr. 24 Pokles dostupnosti GLONASS v 17:00 UTC (převzato z [82] a upraveno)

Seznam tabulek

Tab. 1 Projekty nerealizovaných GNSS

Tab. 2 Rozdělení signálů podle uživatelů a způsobu přenosu informací

Tab. 3 Charakteristika pásem L1 a L2 v modulaci FDMA

Tab. 4 Signály CDMA

Tab. 5 Shrnutí využívání pásem

Tab. 6 Přehledová tabulka pásem

Tab. 7 Dostupnost systémů (převzato z [82] a upraveno)

Tab. 8 Stupně dostupnosti systému (převzato z [83] a upraveno)

Tab. 9 Průběh hodnot PDOP dne 10.03.2021 u systémů GLONASS, GPS a Galileo

Tab. 10 Legislativní požadavky na integritu GNSS (převzato z [76] a upraveno)

Tab. 11 Legislativní limity výstrahy v letectví pro GNSS (převzato z [76] a upraveno)

Tab. 12 Legislativní stanovení kontinuity GNSS (převzato z [76] a upraveno)

Tab. 13 Pravděpodobnost kontinuity každou hodinu dne pro systém GLONASS a GPS (převzato z [86] a [87] a upraveno)

Tab. 14 Legislativní požadavky přesnosti na GNSS (převzato z [76] a upraveno)

Tab. 15 Průměrná přesnost systémů GLONASS, GPS za rok 2020 a Galileo za rok 2019 (převzato z [85], [86] a [87] a upraveno)

Seznam příloh

Příloha 1 Typy ID používané v předprovozu CNAV [34]

Příloha 2 Vzhled strany navigační zprávy I/NAV [43]

Příloha 3 Vzhled navigační zprávy F/NAV [47]

Příloha 4 Status konstelace GLONASS k 18.2.2021 [69]

Příloha 5 Detailní přehled funkcí jednotlivých složek pozemního segmentu systému GLONASS (převzato z [86])

Seznam použité literatury

- [1] What is GNSS? *European global navigation satellite systems agency* [online]. Praha: European GNSS Agency, 2020 [cit. 2020-10-12]. Dostupné z: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss>
- [2] ŠEBESTA, Jiří. *Globální navigační systémy* [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-10-13]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~sebestaj/RAR/literatura/Globalni_navigacni_systemy.pdf. Skripta VUT. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky.
- [3] VALSA, J. a J. SEDLÁČEK. *Teoretická elektrotechnika 1*. Brno, 1997. Skripta VUT. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- [4] DANCIK, Robert J. *THE NAVY NAVIGATION SATELLITE SYSTEM (TRANSIT)* [online]. 1984, 4, 7 [cit. 2020-10-14]. Dostupné z: <https://www.jhuapl.edu/Content/techdigest/pdf/V05-N04/05-04-Danchik.pdf>
- [5] Global navigation satellite systems. *Eurocontrol* [online]. Belgie [cit. 2020-10-14]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/product/global-navigation-satellite-systems>
- [6] Evolution of the Global Navigation Satellite System (GNSS). *Geospatial world* [online]. Amersfoort, Nizozemsko, 2016 [cit. 2020-10-14]. Dostupné z: <https://www.geospatialworld.net/article/global-navigation-satellite-system-gnss/>
- [7] PALLA, Miroslav. *Srovnání globálních navigačních satelitních systémů GPS, GALILEO, GLONASS* [online]. Zlín, 2012 [cit. 2020-10-14]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/23413/palla_2012_bp.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky
- [8] RAPANT, Petr. *Družicové polohové systémy*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0124-8.
- [9] NAVIGATION SYSTEM: NAVY NAVIGATION SATELLITE SYSTEM. *Integrated Publishing* [online]. [cit. 2020-10-15]. Dostupné z: <http://electronicstechnician.tpub.com/14090/css/Navy-Navigation-Satellite-System-16.htm>
- [10] Multi GNSS support for IMS and LANTIME M-Series: GPS, Galileo, GLONASS and Beidou. In: *Meinberg* [online]. Bad Pyrmont, Germany, 2016 [cit. 2020-10-15]. Dostupné z: <https://www.meinbergglobal.com/english/news/multi-gnss-support-for-ims-and-lantime-m-series-gps-galileo-glonass-and-beidou.htm>
- [11] HRDINA, Zdeněk, Petr PÁNEK a František VEJRAŽKA. *Rádiové určování polohy (družicový systém GPS)*. Praha, 1995. Skripta ČVUT. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechniky.

- [12] An Introduction to GNSS. *Hexagon* [online]. Calgary, Canada: NovAtel, 2015 [cit. 2020-10-17]. Dostupné z: <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-1-gnss-overview/section-1>
- [13] Globální družicový polohový systém. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-10-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Glob%C3%A1ln%C3%AD_dru%C5%BEicov%C3%BD_polohov%C3%BD_syst%C3%A9m
- [14] MENDIZÁBAL SAMPER, Jaizki, Roc BERENGUER a Juan MELÉNDEZ. *GPS and Galileo: Dual RF Front-end receiver and Design, Fabrication, & Test: dual RF front-end receiver and design, fabrication, and test*. New York: McGraw-Hill, c2009. ISBN 978-007-1598-699.
- [15] Tsikada. *Astronautix* [online]. Mark Wade, 2019 [cit. 2020-10-21]. Dostupné z: <http://www.astronautix.com/t/tsikada.html>
- [16] KAPLAN, Elliott D. a Christopher J. HEGARTY. *Understanding GPS: principles and application*. 2nd ed. Norwood: Artech House, 2006. ISBN 1-58053-894-0.
- [17] Navstar. *Astronautix* [online]. Mark Wade, 2019 [cit. 2020-10-24]. Dostupné z: <http://www.astronautix.com/g/gpsblock1.html>
- [18] KVAPIL, Jiří. Kosmický segment GPS a jeho budoucnost. *Aldebran* [online]. 2005, 3(2) [cit. 2020-10-24]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_02_gps.php
- [19] GPS to be jammed in Scotland during Nato war games. *BBC* [online]. London: BBC Broadcasting House, 2015 [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: <https://www.bbc.com/news/uk-scotland-highlands-islands-34413696>
- [20] PAFKOVIČ, Roman. *Přehled a porovnání principů činnosti současných druhů GNSS ve světě* [online]. Brno, 2019 [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=192235. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav.
- [21] You Are Here: First Lockheed Martin-Built Next Generation GPS III Satellite Responding To Commands. *Lockheed Martin* [online]. Bethesda, Maryland, USA: Lockheed Martin, 2018 [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: <https://news.lockheedmartin.com/2018-12-23-You-Are-Here-First-Lockheed-Martin-Built-Next-Generation-GPS-III-Satellite-Responding-to-Commands>
- [22] A multi-antenna defense: Receiver – Autonomous GPS spoofing detection. *Inside GNSS* [online]. 2009, , 7 [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: http://web.stanford.edu/group/scpnt/gpslab/website_files/antispoofing/insideGNSS_rasd-montgomery.pdf

- [23] Pseudo random code. *Trimble* [online]. Sunnyvale, California: Trimble [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: https://www.trimble.com/gps_tutorial/sub_pseudo.aspx
- [24] What is M-Code? *EverithingRF* [online]. EverithingRF, 2019 [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-m-code>
- [25] VOSECKÝ, Slavomír. *Radionavigace*. Brno, 2011. Skripta VUT. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav.
- [26] WIEDERHOLT, L.F. a E.D. KAPLAN. *Understandin GPS: principles and applications: GPS system segments* [online]. The MITRE corporation, Intermetrics [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: https://content.schweitzer-online.de/static/catalog_manager/live/media_files/representation/zd_std_orig__zd_schw_orig/004/372/251/9780890067932_content_pdf_1.pdf
- [27] GPS. *GPS.gov* [online]. 2020 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- [28] BORRE, K. *A software-defined GPS and Galileo receiver: a single-frequency approach* [online]. Boston: Birkhäuser, c2007. ISBN 978-0-8176-4390-4.
- [29] USA. *Global Positioning System: Modernized civil navigation (CNAV) live-sky broadcast test plan*. In: . *gps.gov*, 2013. Dostupné také z: https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/cnav/L2C_L5_CNAV_Test_Plan.pdf
- [30] GPS Navigation Message. *ESA Navipedia* [online]. Paris: European Space Agency, 2018 [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Navigation_Message
- [31] Galileo. *European global navigation satellite systems agency* [online]. Praha: European GNSS Agency, 2020 [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/galileo/galileo-european-global-satellite-based-navigation-system>
- [32] GIOVE mission core infrastructure. *The european space agency* [online]. The european space agency, 2007 [cit. 2020-11-11]. Dostupné z: http://www.esa.int/Applications/Navigation/GIOVE_mission_core_infrastructure
- [33] What is Galileo? *The european space agency* [online]. The european space agency [cit. 2020-11-11]. Dostupné z: https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/What_is_Galileo
- [34] LIBERATORE, D. a Airbus defence and space. Galileo IOV Satellites. *Esa Navipedia* [online]. Esa Navipedia, 2014 [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_IOV_Satellites

- [35] Making the Galileo connection. *The european space agency* [online]. The european space agency, 2013 [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: http://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Making_the_Galileo_connection
- [36] Galileo Achieves In-Orbit Validation. *GPS world* [online]. GPS World, 2014 [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://www.gpsworld.com/galileo-achieves-in-orbit-validation/>
- [37] Galileo to enter initial operational capability phase with 4 satellite launch in Nov. *Geospatial world* [online]. Amersfoort, Nizozemsko, 2016 [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://www.geospatialworld.net/blogs/galileo-enter-initial-operational-capability-phase-4-satellite-launch-nov/>
- [38] SOUČEK, Ondřej. Zbylé satelity na oběžnou dráhu vyšleme ještě letos, věří Střelcová a Lopour z programu Galileo. *E15.cz* [online]. E15.cz, 2020 [cit. 2020-11-13]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/byznys/technologie-a-media/zbyle-satelity-na-obeznou-drahu-vysleme-jeste-letos-veri-strelcova-a-lopour-z-programu-galileo-1366637>
- [39] Galileo Return Link Service declared at European Space Conference. *European global navigation satellite systems agency* [online]. European global navigation satellite system agency, 2020 [cit. 2020-11-13]. Dostupné z: <https://www.gsa.europa.eu/newsroom/news/galileo-return-link-service-declared-european-space-conference>
- [40] Galileo Future and Evolutions. *Navipedia* [online]. Esa Navipedia, 2011 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Future_and_Evolutions#cite_note-Galileo_FOC-9
- [41] Services. *European Global Navigation Satellite Systems Agency* [online]. European GNSS Service Center, 2020 [cit. 2020-11-19]. Dostupné z: <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services>
- [42] BRAUMANN, Ingo. RNSS and the ITU Radio Regulations. *Inside GNSS* [online]. Inside GNSS, 2018 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://insidegnss.com/rnss-and-the-itu-radio-regulations/>
- [43] *Signal-in-space* [online]. 1. European Union, 2016, 88 s. [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SIS-ICD.pdf>
- [44] Galileo navigation signals and frequencies. *The European space agency* [online]. The European space agency [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Galileo_navigation_signals_and_frequencies
- [45] Galileo's High Accuracy Service: Field Experimentation of Data Dissemination Schemes. *Inside GNSS* [online]. New Jersey: Inside GNSS, 2020 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <https://insidegnss.com/galileos-high-accuracy-service-field-experimentation-of-data-dissemination-schemes/>

- [46] Galileo services. *European Global Navigation Satellite Systems Agency* [online]. European Global Navigation Satellite System Agency, 2020 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <https://www.gsa.europa.eu/galileo/services>
- [47] Public Regulated services. *European Global Navigation Satellite Systems Agency* [online]. European Global Navigation Satellite System Agency, 2020 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/public-regulated-service>
- [48] Galileo Navigation Message. *Navipedia* [online]. Navipedia, 2011 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Navigation_Message
- [49] Galileo bude přesnější, evropský navigační systém posílí čtyři satelity. *Novinky.cz* [online]. Česká tisková kancelář, 2018 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/internet-a-pc/clanek/galileo-bude-presnejsi-evropsky-navigacni-system-posili-ctyri-satelity-322155>
- [50] Managing signals at the top of the world. *The European space agency* [online]. The European space agency [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Space_for_Earth/Arctic/Managing_signals_at_the_top_of_the_world
- [51] PÁNEK, Petr a Alexander KUNA. Evropský družicový navigační systém GALILEO a jeho využití v metrologii času a frekvence. *Meteorologie v praxi*. Ústav fotoniky a elektroniky, AV ČR, 2016, (3/2016), 6.
- [52] Constellation Information. *European Global Navigation Satellite Systems Agency* [online]. European Global Navigation Satellite System Agency, 2020 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>
- [53] System. *European Global Navigation Satellite Systems Agency* [online]. European Global Navigation Satellite System Agency, 2020 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://www.gsc-europa.eu/galileo/system>
- [54] HARVEY, Brian. *The Rebirth of the Russian Space Program: 50 Years After Sputnik, New Frontiers*. Springer Science & Business Media, 2007. ISBN 978-0-387-71354-0.
- [55] GLONASS history. *Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing* [online]. Korolyov, Russia: Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing, 2005 - 2021 [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/>
- [56] GLONASS Future and Evolutions. *Navipedia* [online]. European space agency, 2011 [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Future_and_Evolutions

- [57] GLONASS Space Segment. *Navipedia* [online]. The european space agency, 2018 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Space_Segment
- [58] Разработчики объявили о завершении создания ГЛОНАСС. *LENTA.RU* [online]. LENTRA.RU, 2015 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://lenta.ru/news/2015/12/07/lonass/>
- [59] JOHNSON, Nicholas L. GLONASS Spacecraft. *GPS world*. Kaman Sciences Coproration, 1994, , 7.
- [60] WEIR, Fred. Russia's \$2 billion project to rival America's GPS suffers setback. *The Christian Science Monitor* [online]. Moscow, 2010 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.csmonitor.com/World/Europe/2010/1206/Russia-s-2-billion-project-to-rival-America-s-GPS-suffers-setback>
- [61] *Thirteenth Air Navigation Conference: Current status and evolution of the GLONASS constellation in support of a multi-system GNSS*. In: . Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2018, ročník 13.
- [62] HARVEY, Brian. *The Rebirth of the Russian Space Program: 50 Years After Sputnik, New Frontiers*. Springer Science & Business Media, 2007. ISBN 9780387713540.
- [63] CDMA FDMA Techniques. *Navipedia* [online]. The European space agency, 2020 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/CDMA_FDMA_Techniques
- [64] Moving from one GPS signal to eight signals from four constellations. *Eurocontrol* [online]. Eurocontrol, 2018, 8.6.2018 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/news/moving-one-gps-signal-eight-signals-four-constellations>
- [65] Сотовые и навигаторы без ГЛОНАСС обложат пошлиной в 25%. *Internet archive wayback machine* [online]. 2010, 17.října 2010 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20101028114025/http://top.rbc.ru/economics/27/10/2010/488865.shtml>
- [66] *GLONASS User Segment* [online]. Navipedia, 2011 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_User_Segment
- [67] Russia Plans to Deploy GLONASS Ground Stations Across Africa. *Space in Africa* [online]. Space in Africa, 2019 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://africanews.space/russia-plans-deploy-glonass-ground-stations-across-africa/>

- [68] GLONASS Ground Segment. *Navipedia* [online]. The European space agency, 2011 [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Ground_Segment
- [69] GLONASS STATUS. *Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing* [online]. Russia: Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing, 2021 [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/index.php>
- [70] RODRÍGUEZ, J.A. Ávila. GLONASS Signal Plan. *Navipedia* [online]. 2019. The European space agency, 2011 [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Signal_Plan#GLONASS_L1_Band
- [71] TEUNISSEN, Peter J.G. a Oliver MONTENRUCK, ed. *Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Switzerland: Springer International Publishing AG 2017, 2017. ISBN 978-3-319-42926-7.
- [72] RUSSIA. *INTERFACE CONTROL DOCUMENT: Code Division Multiple Access Open Service Navigation Signal in L3 frequency band*. In: . Moscow: Russian Rocket and Space Engineering and Information Systems Corporation, Joint Stock Company (Russian Space Systems, JSC) 2016, 2016, číslo 1. Dostupné také z: <http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-L3.-Edition-1.0-2016.pdf>
- [73] RUSSIA. *INTERFACE CONTROL DOCUMENT: Code Division Multiple Access Open Service Navigation Signal in L2 frequency band*. In: . Moscow: Russian Rocket and Space Engineering and Information Systems Corporation, Joint Stock Company (Russian Space Systems, JSC) 2016, 2016, číslo 1. Dostupné také z: <http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-L2.-Edition-1.0-2016.pdf>
- [74] RUSSIA. *INTERFACE CONTROL DOCUMENT: Code Division Multiple Access Open Service Navigation Signal in L1 frequency band*. In: . Moscow: Russian Rocket and Space Engineering and Information Systems Corporation, Joint Stock Company (Russian Space Systems, JSC) 2016, 2016, číslo 1. Dostupné také z: <http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-L1.-Edition-1.0-2016.pdf>
- [75] SUBIRANA, J. Sanz, JM. Juan ZORNOZA a M. HERNANDEZ-PAJARES. GLONASS Navigation Message. *Navipedia* [online]. The European space agency, 2011 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Navigation_Message. Poslední úprava 2012.
- [76] ČESKÁ REPUBLIKA. *Letecký předpis o civilní letecké telekomunikační službě L 10/I, svazek I-Radionavigační prostředky: Hlava 3 - specifikace radionavigačních zařízení*. In: . Ministerstvo dopravy České republiky, 2020. Dostupné také z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>

- [77] VARGAS, Enrique. *High Availability Fundamentals*. Palo Alto: Sun Microsystems, 2000.
- [78] VESELÝ, Petr. *ZAVEDENÍ POSTUPŮ NAVIGACE PODLE POŽADAVKŮ PBN (PERFORMANCE BASED NAVIGATION) NA REGIONÁLNÍM LETIŠTI*. Brno, 2015. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Prof. Ing. DUŠAN KEVICKÝ, CSc.
- [79] Localiser Performance with Vertical Guidance (LPV). *SKYbrary* [online]. SKYbrary, 2020 [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: [https://www.skybrary.aero/index.php/Localiser_Performance_with_Vertical_Guidance_\(LPV\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Localiser_Performance_with_Vertical_Guidance_(LPV))
- [80] Analysis on the Multi-Constellation SBAS Performance of SDCM in Korea. *Journal of Positioning Navigation and Timing*. 2016, 5(4), 11.
- [81] Innovation: Ground-Based Augmentation. *GPS world* [online]. GPS World, 2014 [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: <https://www.gpsworld.com/innovation-ground-based-augmentation/>
- [82] NAVIGATION SYSTEMS USER PERFORMANCE: POSITION DILUTION OF PRECISION FOR A GNSS USER (PDOP). *Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing* [online]. Korolyov, Russia: Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing, 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: https://www.glonass-iac.ru/en/BEIDOU/characteristic_en.php
- [83] What is DOP, PDOP, HDOP, VDOP and where can I find this information? *Marxact* [online]. Marxact [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://marxact.com/support/what-is-dop-pdop-hdop-vdop-and-where-can-i-find-this-information/>
- [84] Russian aircraft to replace GPS with GLONASS. *HBR Radiofrequency technologies* [online]. HBR Radiofrequency technologies, 2018, 27 March 2018 [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <https://halberdbastion.com/intelligence/news/russian-aircraft-replace-gps-glonass>
- [85] *OPEN SERVICE SERVICE DEFINITION DOCUMENT: EUROPEAN GNSS (GALILEO)*. In: . European Union, 2019, číslo 1.1. Dostupné také z: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD_v1.1.pdf
- [86] RUSSIA. *GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM GLONASS: OPEN SERVICE PERFORMANCE STANDARD (OS PS)*. In: . Krolev: Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing, 2020, číslo 2.2. Dostupné také z: https://www.glonass-iac.ru/GLONASS/stehos/stehos_en.pdf

- [87] *GLOBAL POSITIONING SYSTEM STANDARD POSITIONING SERVICE PERFORMANCE STANDARD*. In: . Washington: Department of Defense, 2020, ročník 5. Dostupné také z: <https://www.navcen.uscg.gov/pdf/gps/geninfo/2020SPSPPerformanceStandardFINAL.pdf>
- [88] SCHEIRICH, Petr. *Historie navigace*. 2019. Dostupné také z: <https://www.youtube.com/watch?v=cn1jf1mNcR8>
- [89] BŘEŇ, David. ELEKTŘINA A MAGNETIZMUS: XIII. Maxwellovy rovnice a elektromagnetické vlny. *Aldebran* [online]. 2006 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/elmg/kurz.php>
- [90] NAVRÁTIL, Václav. *Určování polohy dálkoměrnou metodou. Algoritmy a jejich přesnost*. [online]. 2015 [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/47181605.pdf>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechniky, Katedra radioelektroniky. Vedoucí práce Prof. Ing. František Vejražka, CSc.
- [91] MELLOW, Craig. Why Europe Wants its Own Satellite Navigation Program: The beginning of a new global navigation system, Galileo. *Air space* [online]. AIR & SPACE MAGAZINE, 2012, Duben 2012 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.airspacemag.com/space/the-galileo-project-4098287/>
- [92] SCHEIRICH, Petr. Jak se neztratit na moři: Námořní navigace ve staletích před GPS. *Vesmír* [online]. 2018, 01.10.2018, **2018**(10), 570-573 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2018/cislo-10/jak-se-neztratit-mori.html>

Přílohy

Příloha 1 Typy ID používané v předprovozu CNAV [34]

Msg Type	CNAV Message Title	Function/Purpose
0	Default	Default message (transmitted when no msg data is available)
10	Ephemeris 1	SV position parameters for the transmitting SV
11	Ephemeris 2	SV position parameters for the transmitting SV
12	Reduced Almanac	Reduced almanac data packets for 7 SVs
13	Clock Differential Correction	SV Clock differential correction parameters
14	Ephemeris Differential Correction	SV Ephemeris differential correction parameters
15	Text	Text, 29 eight-bit ASCII characters
30	Clock, IONO & Group Delay	SV Clock Correction Parameters, Ionospheric and Group Delay correction parameters (Inter-Signal Correction parameters)
31	Clock & Reduced Almanac	SV Clock Correction Parameters, Reduced almanac data packets for 4 SVs
32	Clock & EOP	SV Clock Correction Parameters, earth orientation parameters; ECEF-to-ECI coordinate transformation
33	Clock & UTC	SV Clock Correction Parameters, Coordinated Universal Time (UTC) Parameters
34	Clock & Differential Correction	SV Clock Correction Parameters, SV clock and Ephemeris differential correction parameters
35	Clock & GGTO	SV Clock Correction Parameters, GPS to GNSS Time Offset parameters.
36	Clock & Text	SV Clock Correction Parameters, Text, 18 eight-bit ASCII characters
37	Clock & Midi Almanac	SV Clock Correction Parameters, Midi Almanac parameters



Příloha 2 Vzhled strany navigační zprávy I/NAV [43]

4.3.2.2. Tail Bits

The tail bits field consists of 6 zero-value bits enabling completion of the FEC decoding of each page's information content in the user receiver.

4.3.2.3. I/NAV Page Part

The structure of the nominal I/NAV even and odd page parts on E5b-I and E1-B are defined in Table 35. A nominal page is composed by the two page parts (even and odd) transmitted sequentially over the same frequency ("vertical page").

E5b-I					Total (bits)		E1-B								Total (bits)	
Even/odd=0	Page Type	Data i (1/2)			Tail	120	Even/odd=1	Page Type	Data j (2/2)	Reserved 1	SAR	Spare	CRC _i	Reserved 2	Tail	120
1	1	112			6			1	1	16	40	22	2	24	8	
Even/odd=1	Page Type	Data i (2/2)	Reserved 1	CRC _i	Reserved 2	Tail	120	Even/odd=0	Page Type	Data k (1/2)					Tail	120
1	1	16	64	24	8	6			1	1	112					

Table 35. I/NAV Nominal Page with Bits Allocation

The parameters for the nominal page have the following meaning and related values:

- Even/Odd field (1 bit) to indicate the part of the page (0=even/1=odd) that is broadcast
- Page Type (1 bit) equal to 0 to indicate the nominal page type
- Data field composed of a nominal word (described in 4.3.5) of 128 bits (comprising 112 bits of data (1/2) and 16 bits of data (2/2))
- SAR data (22 bits) composed of SAR RLM data on E1-B only as defined in 4.3.7
- CRC (24 bits) computed on the Even/Odd fields, Page Type fields, Data fields (1/2 and 2/2), Spare field, SAR (on E1-B only) and reserved fields (Reserved 1 for E5b-I and Reserved 1 for E1-B). In nominal mode the CRC is computed for the Even and Odd parts of a page of the same frequency ("vertical CRC") and is always broadcast on the second part of the "vertical page".

Note: The Reserved 2 field on E5b-I and the Reserved 2 field on E1-B are not protected by the CRC.

- Tail bits (2*6 bits) as defined in 4.3.2.2. These fields are not protected by the CRC

The structure of the alert I/NAV even and odd page parts on E5b-I and E1-B are defined in Table 36. An alert page is composed by the two page parts (even and odd) transmitted at the same epoch over E5b-I and E1-B ("horizontal page").



ESb-I						E1-B									
Even/odd=0	Page Type	Reserved 1 (1/2)				Tail	Total (bits)	Even/odd=1	Page Type	Reserved 1 (2/2)		CRC	Reserved 2	Tail	Total (bits)
1	1	112				6		120	1	1	80		24	8	
Even/odd=1	Page Type	Reserved 1 (2/2)		CRC	Reserved 2	Tail	Total (bits)	Even/odd=0	Page Type	Reserved 1 (1/2)				Tail	Total (bits)
1	1	80		24	8	6		120	1	1	112				

Table 36. I/NAV Alert Page with Bits Allocation

The parameters for the alert page have the following meaning and related values:

- Even/Odd field to indicate the part of the page (0=even/1=odd) that is broadcast
- Page Type (1 bit) equal to 1 to indicate the alert page type
- CRC (24 bits) computed on the Even/Odd fields, Page Type fields and on Reserved 1 (1/2 and 2/2). In alert mode the CRC is computed for the Even/ Odd pages of both frequencies ESb and E1-B ("horizontal CRC").
- The Reserved 1 and Reserved 2 fields will be published in a future update of this ICD. Note that the reserved 2 fields are not protected by CRC.
- Tail bits (2*6 bits) as defined in 4.3.2.2.

4.3.3. I/NAV Nominal Sub-Frame Layout

In the nominal mode, the page sequence for I/NAV ESb-I and I/NAV E1-B components in every sub-frame is according to Table 37 where T_0 is synchronised with GST origin modulo 30 seconds

T_0 (GST ₀ sync) (s)	ESb Sub frame ID	ESb-I Page	ESb-I Content				E1-B Content						E1-B Page	E1B Sub frame ID
			Word 1 (1/2)	Res	CRC	Res	Spare Word (2/2)	Res	SAR	Spare	CRC	Res		
0	N	Even	Word 1 (1/2)				Spare Word (2/2)	Res	SAR	Spare	CRC	Res	Odd	N-1
1	N	Odd	Word 1 (2/2)	Res	CRC	Res	Word 2 (1/2)						Even	N
2	N	Even	Word 3 (1/2)				Word 2 (2/2)	Res	SAR	Spare	CRC	Res	Odd	N
3	N	Odd	Word 3 (2/2)	Res	CRC	Res	Word 4 (1/2)						Even	N
4	N	Even	Word 5 (1/2)				Word 4 (2/2)	Res	SAR	Spare	CRC	Res	Odd	N
5	N	Odd	Word 5 (2/2)	Res	CRC	Res	Word 6 (1/2)						Even	N
6	N	Even	Word 7 or 9 (1/2)*				Word 6 (2/2)	Res	SAR	Spare	CRC	Res	Odd	N



Příloha 3 Vzhled navigační zprávy F/NAV [47]

4.2.3. F/NAV Frame Layout

The F/NAV ESa-I message data packet transmission sequence is according to Table 26 where a whole frame is shown. Note that the odd numbered sub-frames contain the page type 5 and the even numbered sub-frames contain the page type 6. This allows the transmission of the almanacs for three satellites within two successive sub-frames (100 seconds). The parameter k is transparent for the user. It is set by the Galileo system for each of the active satellites, such as to improve almanac transport time by exploiting source diversity.

	Page Type	Page Content
Subframe 1	1	SVID, clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, Signal health status, GST and Data validity status
	2	Ephemeris (1/3) and GST
	3	Ephemeris (2/3) and GST
	4	Ephemeris (3/3), GST-UTC conversion, GST-GPS Conversion and TOW
	5	Almanac for satellite k and almanac for satellite $(k+1)$ part 1
Subframe 2	1	SVID, clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, Signal health status, GST and Data validity status
	2	Ephemeris (1/3) and GST
	3	Ephemeris (2/3) and GST
	4	Ephemeris (3/3), GST-UTC conversion, GST-GPS Conversion and TOW
	6	Almanac for satellite $(k+1)$ part 2 and almanac for satellite $(k+2)$
Subframe 3	1	SVID, clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, Signal health status, GST and Data validity status
	2	Ephemeris (1/3) and GST
	3	Ephemeris (2/3) and GST
	4	Ephemeris (3/3), GST-UTC conversion, GST-GPS Conversion and TOW
	5	Almanac for satellite $(k+3)$ and almanac for satellite $(k+4)$ part 1
Subframe 4	1	SVID, clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, Signal health status, GST and Data validity status
	2	Ephemeris (1/3) and GST
	3	Ephemeris (2/3) and GST
	4	Ephemeris (3/3), GST-UTC conversion, GST-GPS Conversion and TOW
	6	Almanac for satellite $(k+4)$ part 2 and almanac for satellite $(k+5)$
Subframe 5	1	SVID, clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, Signal health status, GST and Data validity status
	2	Ephemeris (1/3) and GST
	3	Ephemeris (2/3) and GST
	4	Ephemeris (3/3), GST-UTC conversion, GST-GPS Conversion and TOW
	5	Almanac for satellite $(k+6)$ and almanac for satellite $(k+7)$ part 1



	Page Type	Page Content
Subframe 6	1	SVID, clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, Signal health status, GST and Data validity status
	2	Ephemeris (1/3) and GST
	3	Ephemeris (2/3) and GST
	4	Ephemeris (3/3), GST-UTC conversion, GST-GPS Conversion and TOW
	6	Almanac for satellite (k+7) part 2 and almanac for satellite (k+8)
Subframe 7	1	SVID, clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, Signal health status, GST and Data validity status
	2	Ephemeris (1/3) and GST
	3	Ephemeris (2/3) and GST
	4	Ephemeris (3/3), GST-UTC conversion, GST-GPS Conversion and TOW
	5	Almanac for satellite (k+9) and almanac for satellite (k+10) part 1
Subframe 8	1	SVID, clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, Signal health status, GST and Data validity status
	2	Ephemeris (1/3) and GST
	3	Ephemeris (2/3) and GST
	4	Ephemeris (3/3), GST-UTC conversion, GST-GPS Conversion and TOW
	6	Almanac for satellite (k+10) part 2 and almanac for satellite (k+11)
Subframe 9	1	SVID, clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, Signal health status, GST and Data validity status
	2	Ephemeris (1/3) and GST
	3	Ephemeris (2/3) and GST
	4	Ephemeris (3/3), GST-UTC conversion, GST-GPS Conversion and TOW
	5	Almanac for satellite (k+12) and almanac for satellite (k+13) part 1
Subframe 10	1	SVID, clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, Signal health status, GST and Data validity status
	2	Ephemeris (1/3) and GST
	3	Ephemeris (2/3) and GST
	4	Ephemeris (3/3), GST-UTC conversion, GST-GPS Conversion and TOW
	6	Almanac for satellite (k+13) part 2 and almanac for satellite (k+14)
Subframe 11	1	SVID, clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, Signal health status, GST and Data validity status
	2	Ephemeris (1/3) and GST
	3	Ephemeris (2/3) and GST
	4	Ephemeris (3/3), GST-UTC conversion, GST-GPS Conversion and TOW
	5	Almanac for satellite (k+15) and almanac for satellite (k+16) part 1



	Page Type	Page Content
Subframe 12	1	SVID, clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, Signal health status, GST and Data validity status
	2	Ephemeris (1/3) and GST
	3	Ephemeris (2/3) and GST
	4	Ephemeris (3/3), GST-UTC conversion, GST-GPS Conversion and TOW
	6	Almanac for satellite (k+16) part 2 and almanac for satellite (k+17)

Table 26. F/NAV Frame Layout

4.2.4. F/NAV Page Contents

The following tables specify the contents of the F/NAV pages above allocated (see Chapter 5 for a description of the F/NAV pages contents).

Page Type 1: SVID, Clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, GST, Signal health and Data validity status

Type=1	SVID	IOD _{nav}	Clock correction				SISA(E1, E5a)	Ionospheric correction					BGD(E1, E5a)	E5a _{bits}	GST		E5a _{bits}	Spare	CRC	Tail	Total (bits)			
			t_{oc}	a_{j0}	a_{j1}	a_{j2}		Az	Ionospheric disturbance flag						WN	TOW								
6	6	10	14	31	21	6	8	11	11	14	1	1	1	1	1	10	2	12	20	1	26	24	6	244

Table 27. Bits Allocation for F/NAV Page Type 1

Page Type 2: Ephemeris (1/3) and GST

Type=2	IOD _{nav}	Ephemeris (1/3)						GST		CRC	Tail	Total (bits)	
		M_0	$\bullet \Omega$	e	$A/2$	Ω_0	$\bullet I$	WN	TOW				
6	10	32	24	32	32	32	32	14	12	20	24	6	244

Table 28. Bits Allocation for F/NAV Page Type 2

Page Type 3: Ephemeris (2/3) and GST

Type=3	IOD _{nav}	Ephemeris (2/3)							GST		Spare	CRC	Tail	Total (bits)	
		i_0	ω	Δn	C_{me}	C_{ur}	C_{rc}	C_{rs}	t_{oc}	WN					TOW
6	10	32	32	16	16	16	16	16	14	12	20	8	24	6	244

Table 29. Bits Allocation for F/NAV Page Type 3



Příloha 4 Status konstelace GLONASS k 18.2.2021 [69]

GLONASS CONSTELLATION STATUS, 18.02.2021

Total satellites in constellation	28 SC
Operational	23 SC
In commissioning phase	-
In maintenance	2 SC
Under check by the Satellite Prime Contractor	-
Spares	1 SC
In flight tests phase	2 SC

GLONASS CONSTELLATION STATUS AT 18.02.2021 BASED ON BOTH THE ALMANAC ANALYSIS AND NAVIGATION MESSAGES RECEIVED AT 15:00 18.02.21 (UTC) IN IAC PNT TSNIMASH

Orb. slot	Orb. pl.	RF chnl	# GC	Launched	Operation begins	Operation ends	Life-time (months)	Satellite health status		Comments
								In almanac	In ephemeris (UTC)	
1	1	01	730	14.12.09	30.01.10		134.3	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
2	1	-4	747	26.04.13	04.07.13		93.9	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
3	1	05	744	04.11.11	08.12.11		111.6	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
4	1	06	759	11.12.19	03.01.20		14.3	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
5	1	01	756	17.06.16	29.08.16		32.1	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
6	1	-4	733	14.12.09	24.01.10		134.3	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
7	1	05	745	04.11.11	18.12.11		111.6	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
8	1	06	743	04.11.11	20.09.12		111.6	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
9	2	-2	702	01.12.14	15.02.16		74.7	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
10	2	-7	723	25.12.07	22.01.08		157.9	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
11	2	00	705	25.10.20			3.6	-	- 15:11 18.02.21	Flight Tests
12	2	-1	758	27.05.19	22.06.19		20.6	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
13	2	-2	721	25.12.07	08.02.08		157.9	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
14	2	-7	752	22.09.17	16.10.17		40.9	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
15	2	00	757	03.11.16	27.11.16		27.6	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
16	2	-1	736	02.09.10	04.10.10		125.7	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
17	3	04	751	07.02.16	28.02.16		60.4	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
18	3	-3	754	24.03.14	14.04.14		82.9	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
19	3	03	720	26.10.07	25.11.07		159.9	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
20	3	02	719	26.10.07	27.11.07		159.9	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
21	3	04	755	14.06.14	03.08.14		60.3	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
22	3	-3	735	02.03.10	28.03.10		131.7	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
23	3	03	732	02.03.10	28.03.10		131.7	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
24	3	02	760	16.03.20	14.04.20		11.1	+	+ 15:11 18.02.21	In operation
15	2		716	25.12.06	12.10.07	24.11.16	169.9			Spares
22	3		731	02.03.10	28.03.10	02.06.20	131.7			Maintenance
11	2		753	29.05.16	27.06.16	19.11.20	56.7			Maintenance
20	3	-6	701	26.02.11			119.8			Flight Tests

Příloha 5 Detailní přehled funkcí jednotlivých složek pozemního segmentu systému GLONASS (převzato z [86])

