

Příspěvek Geodetické observatoře Pecný k monitorování otevřené služby Galileo

Ing. Michael Kala, Ing. Jan Douša, Ph.D.,
Ing. Pavel Václavovic, Ph.D.,
Ing. Petr Bezděka, Ing. Lewen Zhao, Ph.D.,
Geodetická observatoř Pecný,
Výzkumný ústav geodetický,
topografický a kartografický, v. v. i.

Abstrakt

Geodetická observatoř Pecný (GOP), součást Výzkumného ústavu geodetického, topografického a kartografického, v. v. i. (VÚGTK) se podílí na monitorování Galileo Open Service (OS) v rámci podpory členských států pro Referenční centrum Galilea (GRC) ve třech hlavních úlohách: 1) kontrola kvality globálních multi-GNSS dat, 2) konsolidace navigačních dat a referenčních produktů oběžných drah a hodin družic GPS a Galileo a 3) určování klíčových indikátorů pro monitorování dostupnosti a polohové přesnosti Galileo OS. Systém monitorování GOP je nezávislý na ostatních příspěvcích ve smyslu použitých nástrojů (G-Nut software), referenčních produktů (vlastní přesné dráhy a hodiny družic) a konsolidovaných „broadcast“ navigačních dat (BRDC).

Galileo Open Service Navigation Performance Monitoring supported by Geodetic Observatory Pecný

Abstract

Geodetic Observatory Pecný contributes to the monitoring of the Galileo Open Service within the Member States support of the Galileo Reference Centre in three main tasks: 1) monitoring the quality of global multi-GNSS data, 2) consolidation of navigation data and reference GPS and Galileo satellites orbit and clock products, and 3) estimating key-parameter indicators for the Galileo OS navigation performance monitoring. The GOP chain of processes is independent from other contributions in terms of the tools (G-Nut software), reference products (rapid precise satellite orbits and clocks), and consolidated broadcast navigation data (BRDC files).

Keywords: GNSS, Galileo, satellite orbits and clocks, navigation, performance monitoring

1. Úvod

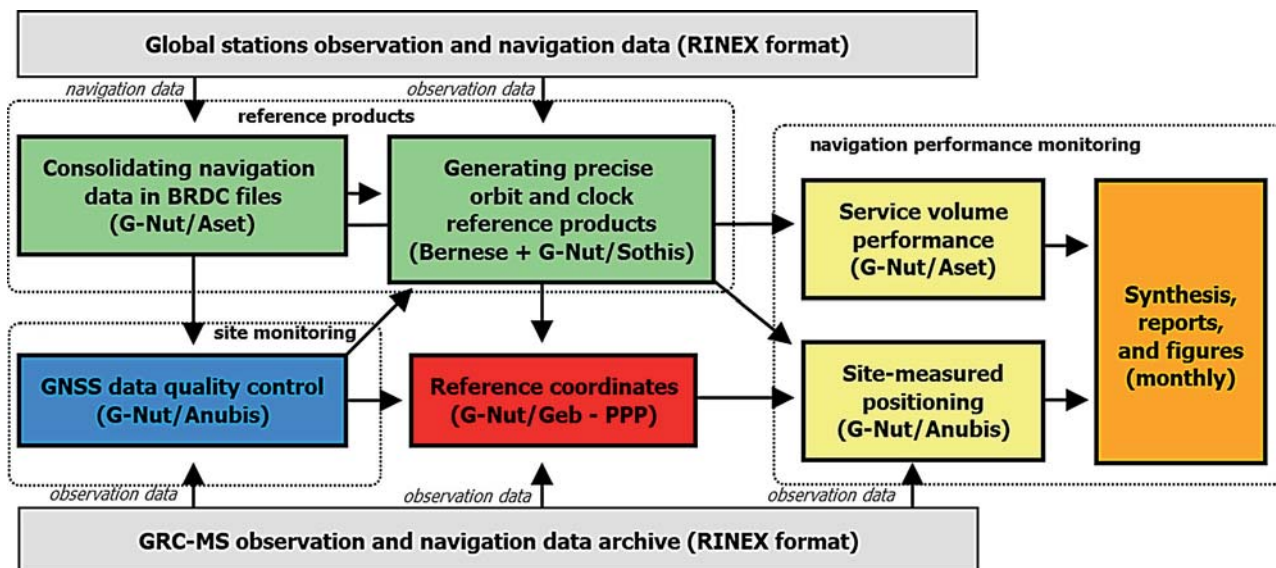
Navigační systém Galileo bude poskytovat několik typů služeb značnému počtu uživatelů po celém světě. Dostupnost a přesnost jednotlivých služeb je proto žádoucí nepřetržitě sledovat. Od října 2018 se Geodetická observatoř Pecný (GOP) při Výzkumném ústavu geodetickém, topografickém a kartografickém, v. v. i. podílí na nezávislém monitorování dostupnosti a přesnosti otevřené služby Galileo - Open Service (OS). Tato činnost je vykonávána v rámci projektu GRC-MS, podpory členských států Referenčního Centra pro Galileo (GRC, Galileo Reference Center) [1], [2]. GRC bylo založeno v nizozemském Noordwijku v roce 2018 Agenturou pro evropský globální navigační družicový systém (GSA, European GNSS Agency), jejímž nástupcem se později stala Agentura Evropské unie pro kosmický program (EUSPA, European Union Space Programme). Článek popisuje implementaci příspěvků GOP poskytované v rámci GRC-MS:

- Kontrola kvality multi-GNSS dat z přibližně 65 referenčních stanic.
- Poskytování referenčních produktů:
 - Konsolidovaná vysílaná navigační data (soubory BRDC) [3],
 - Přesné parametry oběžných drah a korekce hodin pro aktivní družice systémů GPS NAVSTAR a Galileo.
- Monitorování klíčových indikátorů pro Galileo OS:
 - Dostupnost služby v rozsahu definovaném specifikací,
 - Přesnost určování polohy.

Monitorování Galileo OS bylo navrženo jako zcela nezávislé jak na vlastním systému, tak jiných monitorovacích

službách a produktech. Obr. 1 zobrazuje popisné schéma procesu každodenního monitorování na GOP včetně nutných vstupů, výstupů a závislostí. Většina procesů je závislá na observačních a navigačních datech sesbíraných z globálních stanic pozorování Globálních navigačních družicových systémů (GNSS). Monitorování vybraných indikátorů dostupnosti zahrnuje jak řešení v globálním rozsahu, tak na diskretních místech na Zemi reprezentovaných v našem případě permanentními stanicemi GNSS. První přístup závisí pouze na navigačních datech, druhý na navigačních datech, observačních datech a referenčních produktech. Produkty GOP jsou vytvářeny ve dvou módech – včasný rychlý (early-rapid) s dostupností do 6 hodin a rychlý (rapid) s dostupností do 48 hodin. Pro maximální nezávislost jednotlivých procesů v obrázku – referenčních produktů (zelené bloky), monitorování kvality dat GNSS z globálních stanic (modrý blok), referenčních souřadnic (červený blok) a monitorování indikátorů kvality služby (žluté bloky) jsou primárně využívány vlastní programové nástroje vytvořené či rozšířené pro tyto rozličné úlohy:

- G-Nut/Anubis pro kontrolu kvality observačních dat GNSS, navíc specificky rozšířený pro určování indikátorů pro polohovou a výškovou přesnost na permanentních stanicích s využitím vybraných signálů a navigačních dat,
- G-Nut/Aset pro porovnávání přesných produktů, poloh družic a korekcí jejich hodin, navíc rozšířený pro slučování, filtrování a kontrolu navigačních zpráv přímo z družic GNSS,
- G-Nut/Geb pro přesné autonomní určování souřadnic stanic GNSS,



Obr. 1 Schéma procesu monitorování, vstupy, výstupy a vlastní nástroje GOP

- G-Nut/Sothis pro určování přesných korekcí hodin družic GNSS,
- Bernese GNSS Software kontrolovaný systémem GOP pro určování přesných drah družic.

2. Konsolidovaná sada navigačních zpráv

Kompletní sada navigačních zpráv pro družice všech systémů je poskytována ve formě konsolidovaných navigačních dat, tzv. BRDC souborů [3]. Tyto získáváme pomocí nástroje G-Nut/Aset sloučením a vhodným výběrem individuálně posbíraných navigačních dat z více než 300 globálních permanentních stanic GNSS. Data jsou načítána jednak z hodinových a z denních souborů RINEX, ale i z datových toků v reálném čase. Výstupem jsou navigační data pro všechny systémy GNSS i regionální zpřesňující systémy v souborech formátu RINEX 3 a doplňované až po dobu následujících tří dnů.

Celý postup konsolidace se skládá ze slučování individuálních navigačních dat, jejich filtrování a kontroly kvality. Jelikož pro rychlou konsolidaci nejsou dostupné referenční produkty ani jiné užitečné externí informace, je spolehlivost konsolidace zajištěna řadou autonomních procesů zahrnující algoritmy: a) analýzy časových řad vybraných parametrů (hodnoty a jejich změny v čase), b) kontroly povoleného rozsahu pro jednotlivé parametry, c) statistické analýzy, d) většinovou volbou, e) penalizačním systémem a f) korekcemi chybných dat u specifických přijímačů.

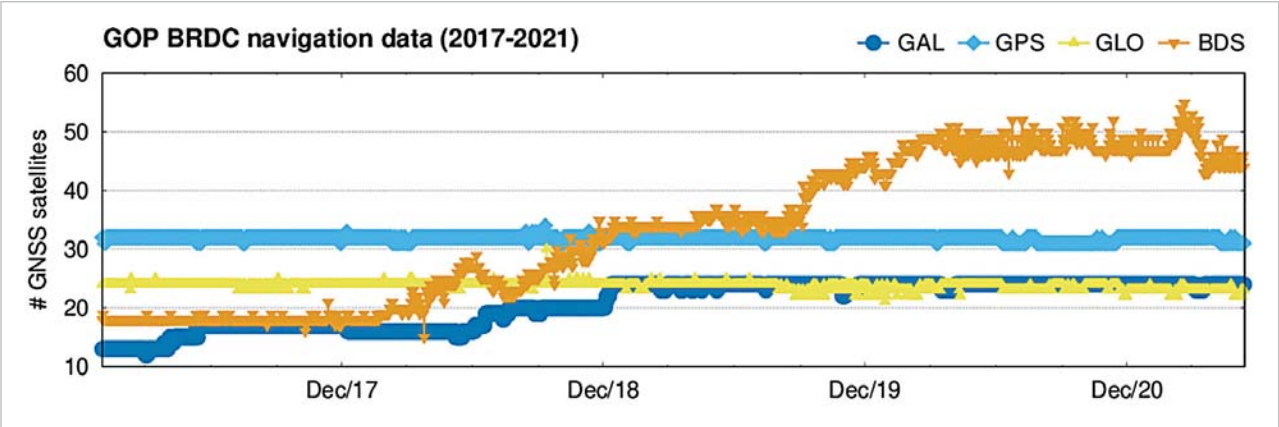
Hrubá kontrola povoleného rozsahu je využívána pro filtraci zřetelně chybných navigačních zpráv (např. vzdálená časová značka, nepravděpodobná hodnota hlavní polohy dráhy družice). Analýza časových řad vybraných navigačních parametrů potom sleduje absolutní hodnoty vybraných parametrů a rovněž jejich změny v čase. Proces je doplněn penalizačním systémem využívajícím adaptivní kritéria pro identifikaci a vyloučení odlehlých hodnot, čímž je docílena robustnost a vylučování konkrétních zpráv při dosažení takové výše bodové penalizace indikující odlehlost pro více parametrů současně. Stav družic a skupinové

zpoždění jednotlivých signálů jsou vyhodnocovány statistickou analýzou společně s autonomní detekcí (a eliminací) problematických typů přijímačů. Společná data v hlavice jsou vybírána na základě většinové volby z dostatečného počtu vstupních souborů.

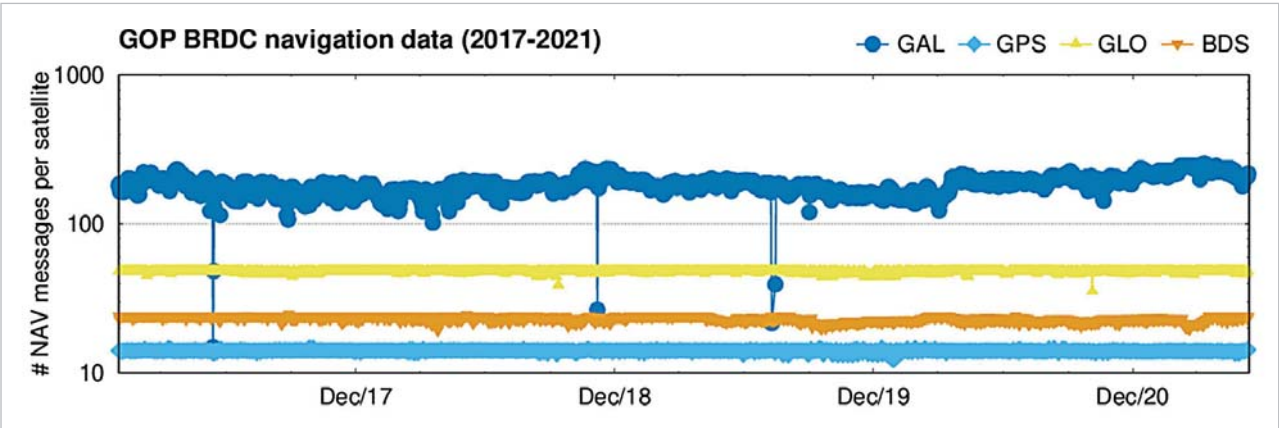
Maximální robustnost procesu je zajištěna v několika úrovních s použitím nezávislých vstupů navigačních dat. V každé úrovni jsou využity všechny již zmíněné metody pro slučování i kontrolu kvality navigačních zpráv jednotlivých družic všech systémů. Ačkoliv podporujeme v rámci generování souborů BRDC všechny globální i regionální systémy, v GRC-MS jsou dosud využívány pouze zprávy systémů GPS NAVSTAR a Galileo. Ze čtyř definovaných typů navigačních zpráv Galileo [4] momentálně konsolidujeme pouze tyto dva typy: 1) navigační zpráva F/NAV vysílaná na kanále E5a-I rychlostí 25 bps a 2) navigační zpráva I/NAV vysílaná na kanálech E1B a E5b-I rychlostí 125 bps.

Obr. 2 zobrazuje celkové počty družic pro jednotlivé globální systémy podle jejich dostupnosti v souborech GOP BRDC v průběhu období 2017–2021. Je patrný růst počtu družic Galileo v průběhu let 2016–2017. Poslední čtyři družice byly vypuštěny na konci roku 2017 a aktivovány v únoru 2018, čímž celkový počet družic vzrostl na 22 aktivních (a navíc dvě družice na excentrických drahách a dvě družice trvale neaktivní).

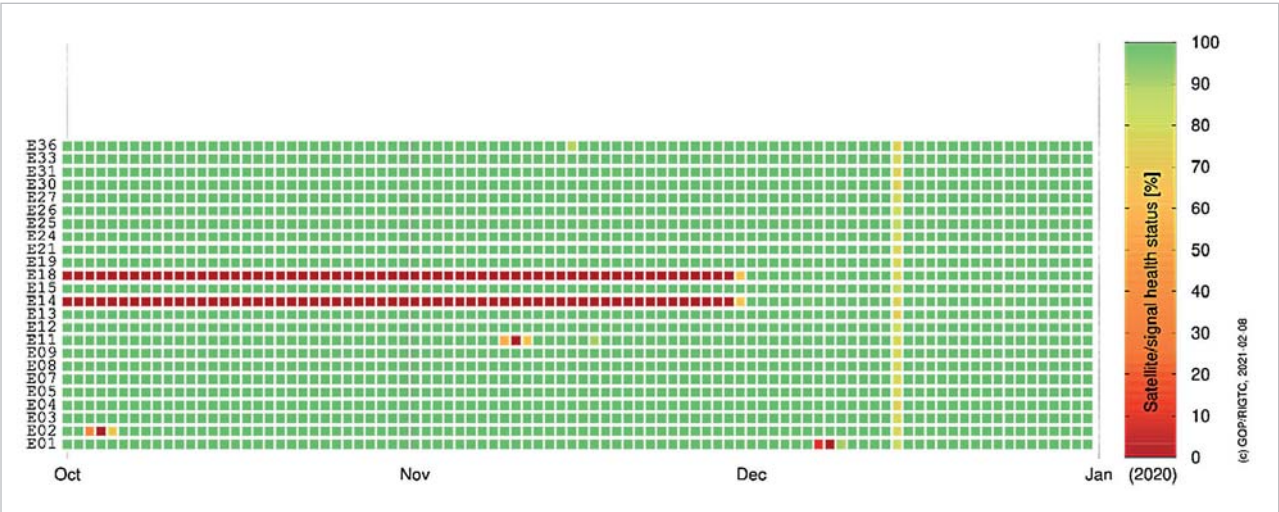
Obr. 3 ukazuje průměrné počty navigačních zpráv na jednu družici pro každý systém. Je zřejmé, že navigační zprávy systému Galileo jsou vydávány častěji než v jiných systémech (např. nominálně 10 min pro Galileo oproti dvěma hodinám pro GPS NAVSTAR). Z obrázku je možné vidět několik časových úseků či okamžiků s nižším počtem navigačních dat. Tyto odpovídají významným událostem s nedostupností Galileo OS Signal-In-Space (SIS). Dvě jsme studovali již v průběhu monitorování GRC-MS monitorování a odpovídají obdobím: 1) 7.–8. listopadu 2018 a 2) 11. až 17. července 2019. Obě události jsou rovněž známy z oficiálních zpráv s upozorněním vydávaných pro uživatele systému Galileo, tzv. Notice Advisory to Galileo Users (NAGU, <https://www.gsc-europa.eu/system-status/nagu-information>), v tomto případě pod označeními NAGU 2018027–031 a NAGU 2019025–028.



Obr. 2 Počet družic dostupných z jednotlivých GNSS



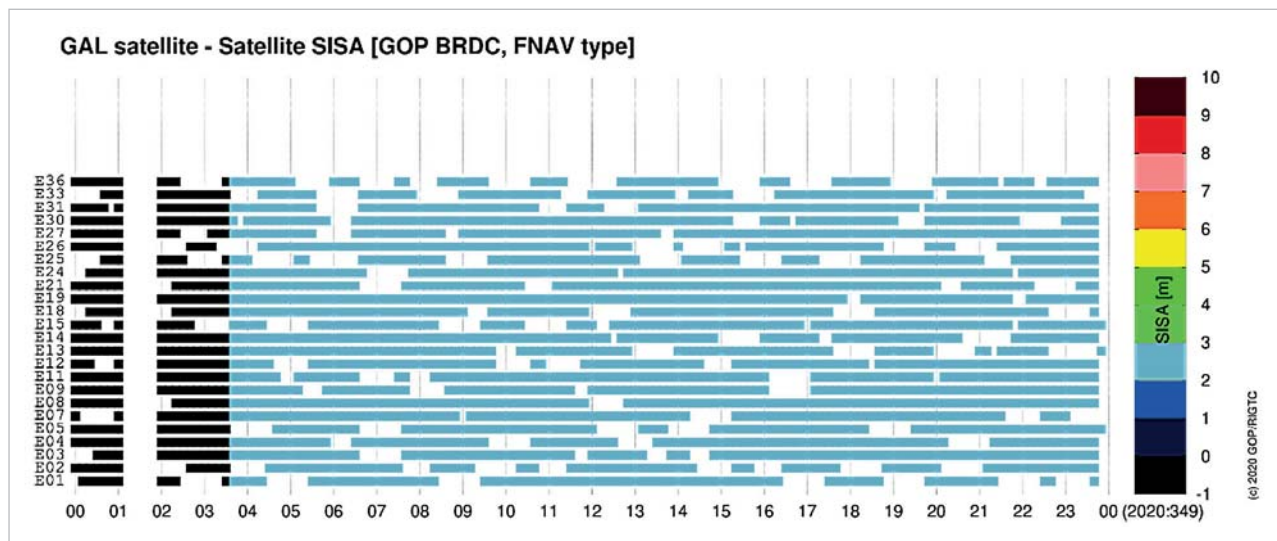
Obr. 3 Počet navigačních záznamů na jednu družici (zvlášť pro každý systém)



Obr. 4 Denní poměry F/NAV zdravých navigačních záznamů systému Galileo

Obr. 4 znázorňuje detailně poměry zpráv pro aktivní vs. neaktivní družice (Galileo OS SIS) pro každý jednotlivý den v monitorovaném kvartále a pro každou družici Galileo vyznačenou na ose y s použitím zpráv F/NAV (zprávy I/NAV vykazují zpravidla velmi podobné výsledky). Mezní hodnota 100 % představuje všechny zprávy pro aktivní družici, opa-

kem je hodnota 0 % pro zprávy po celý den neaktivní družice. V průběhu některých dnů může družice vykazovat smíšené zprávy, tj. aktivní i neaktivní stav, který je u Galileo OS SIS určován kombinací více indikátorů: 1) Signal Health Status (SHS), 2) Data Validity Status (DVS) a 3) Signal-in-Space Accuracy (SISA), všechny definované v doku-



Obr. 5 Hodnoty SISA pro Galileo 14. prosince 2020 pro záznamy I/NAV

mentu Galileo OS SDD (Service Definition Document) [5]. Na obrázku je také patrný den první aktivace dvou excentrických družic Galileo (E14 a E18), který nastal 30. listopadu 2020 (viz NAGU 2020019-020). Začleněním těchto družic disponoval systém Galileo ke konci roku 2020 až 24 aktivními družicemi (navíc vedle dvou trvale neaktivních družic). Další zřetelně viditelná událost je z 14. prosince 2020 (viz žlutá vertikála), kdy OS SIS s využitím zpráv F/NAV a I/NAV nebyl k dispozici po dobu 4 resp. 6 hodin (viz NAGU 2020021). Jak ukazuje **obr. 5** (mezera v černých polích), mezi 1. a 2. hodinou ranní nebyla k dispozici žádná navigační data, přičemž několik hodin před a po této nedostupnosti je charakterizováno navigačním parametrem SISA=NAPA („No Accuracy Prediction Available“) pro všechny družice, což je patrné v černé barvě (tj. záporná hodnota SISA). Tato situace je zároveň nejčastějším důvodem pro krátkodobé (v řádu hodin až dnů) neaktivní nastavení konkrétních družic Galileo či OS SIS.

3. Referenční produkty parametrů oběžných drah a hodin družic

K určování přesných drah družic Galileo využíváme Bernese GNSS Software V5.2 [6] a dvojité diferencované observace z globální sítě více než 120 stanic GNSS. Náš postup byl odvozen od procesu určování ultra-rychlých drah družic GPS NAVSTAR a GLONASS, kterým GOP přispívalo do Mezinárodní služby GNSS (IGS, International GNSS Service) [7], [8]. Dráhy jsou určovány v denním režimu ve dvou módech dostupnosti: 1) rychlé řešení se zpožděním 2 dnů a 2) včasné/rychlé řešení se zpožděním pouhých 6 hodin. Druhé je kompromisem mezi standardní rychlou produkcí a ultra-rychlou produkcí v IGS [7], [8], tj. dostupnou 4× denně s 6 hodinovým zpožděním pro podporu aplikací v reálném čase. Druhé řešení je tedy generováno 1 za den (podobně jako rychlé), ovšem s kratším zpožděním. A navíc zahrnuje předpověď polohy družic i pro 1 následující den (stejně jako ultra-rychlé řešení).

Dráhy družic jsou určovány kombinací normálních rovnic ve dvou po sobě jdoucích dnech, čímž vzniká robustní řešení s dvoudenním obloukem pro každou určenou

družici. Dráhový model zahrnuje 6 Keplerových elementů, 9 parametrů tlaku solárního záření definovaného modelem ECOM2 (Extended Centre for Orbit Determination in Europe Model) [9] a 3 stochastické impulsy pro empirické modelování zrychlení družic během každých 12 hodin ve směru radiálním, v dráze pohybu a pohybu kolmém na rovinu oběžné dráhy družice. Výpočet parametrů je inicializován s využitím souborů GOP BRDC a celý proces řešení drah družic spočívá ve dvou iteracích. Mohou být ovšem realizovány i další iterace pro řešení specifických problémů jednotlivých družic, stanic nebo základů. Přesnost polohy družic uváděná v hlavičce souborů formátu SP3 (Standard Product version 3) je určována na základě kombinace řady informací, např. formální chyby určených Keplerových parametrů, návaznost dráhových oblouků, kombinace krátkých a dlouhých oblouků a dalších indikátorů dostupných z vnitřních kontrolních mechanismů.

Souřadnice stanic a parametry rotace Země (poloha pólu, jejich změna v čase a délka dne) jsou spolu s dráhovými parametry určovány rovněž na denní bázi. Další parametry, jakými jsou troposférická zpoždění na jednotlivých stanicích a počáteční fázové ambiguity, jsou řešeny v rámci jednotlivých procesních kroků s vhodným časovým rozlišením. Modely použité při zpracování splňují konvence Mezinárodní služby pro rotaci Země a referenční systémy (IERS, International Earth Rotation and Reference System Service) vydané v roce 2010 [10]. Absolutní kalibrace antén pro posun a variaci fázového centra využívá aktualizovaný model IGS14.

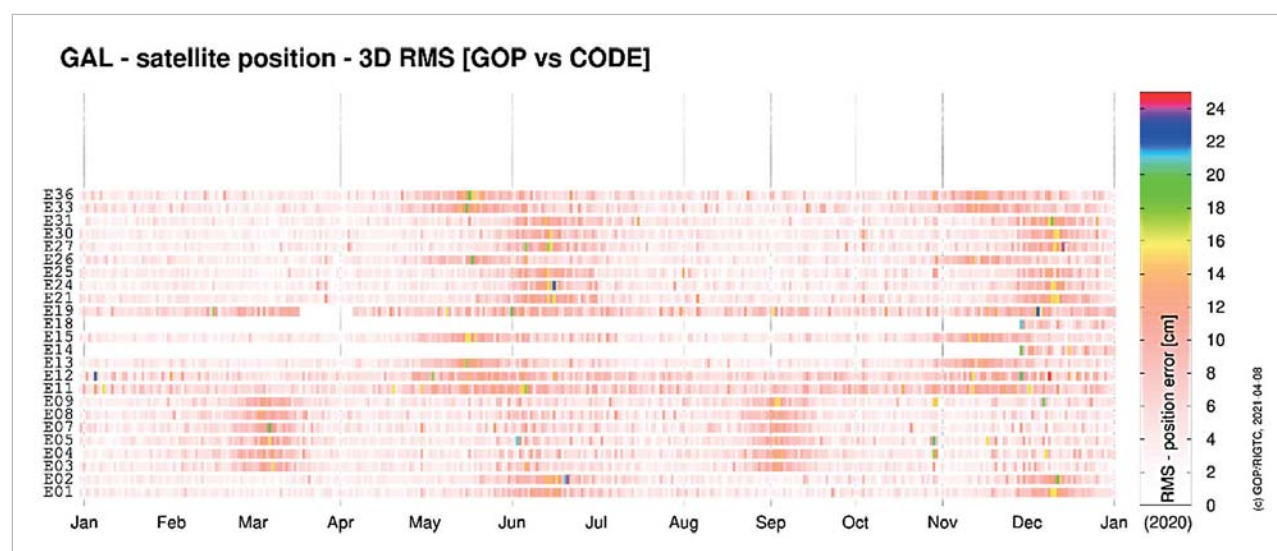
Přesné korekce chodu družicových hodin jsou na GOP určovány s využitím G-Nut/Sothis při zavedení (včasných) rychlých drah družic a určených souřadnic všech stanic. Strategie pro určování chodu hodin využívá lineární kombinaci observací zbavenou ionosférického efektu prvního řádu, tentokrát mixující nediferencovaná kódová a v čase diferencovaná fázová pozorování. Vlastní chod hodin vychází z přesnosti epochově diferencovaných fázových observací a počáteční hodnoty chodu hodin (ICB, initial clock biases) jsou určovány pro jednotlivé družice právě z nediferencovaných kódových měření [10]. Tato metoda je zároveň efektivní i robustní díky eliminaci počátečních ambiguity a redukci možného negativního dopadu fázových skoků. Opravy chodu hodin družic a přijímače jsou určovány ve stochastickém procesu pro každou epochu

jako součet diferencí fázových měření mezi epochami a příslušných počátečních hodnot pro opravy chodu hodin. Pro určování přesných hodnot ICB vstupují do výpočtu systematické chyby kódových měření poskytovaných ve čtvrtletních souborech z produktů MGEX (Multi-GNSS Experiment) [12]. Referenční datum pro určování chodu hodin je definováno pomocí strategie vyvinuté na GOP zaměřené na jejich určování v reálném čase [13]. Korekce hodin jsou počítány s 5 min rozlišením pro všechny aktivní družice GPS NAVSTAR a Galileo a konzistentně jsou poskytovány jak v souborech SP3, tak souborech pro korekce hodin – SINEX (Software Independent Exchange Format).

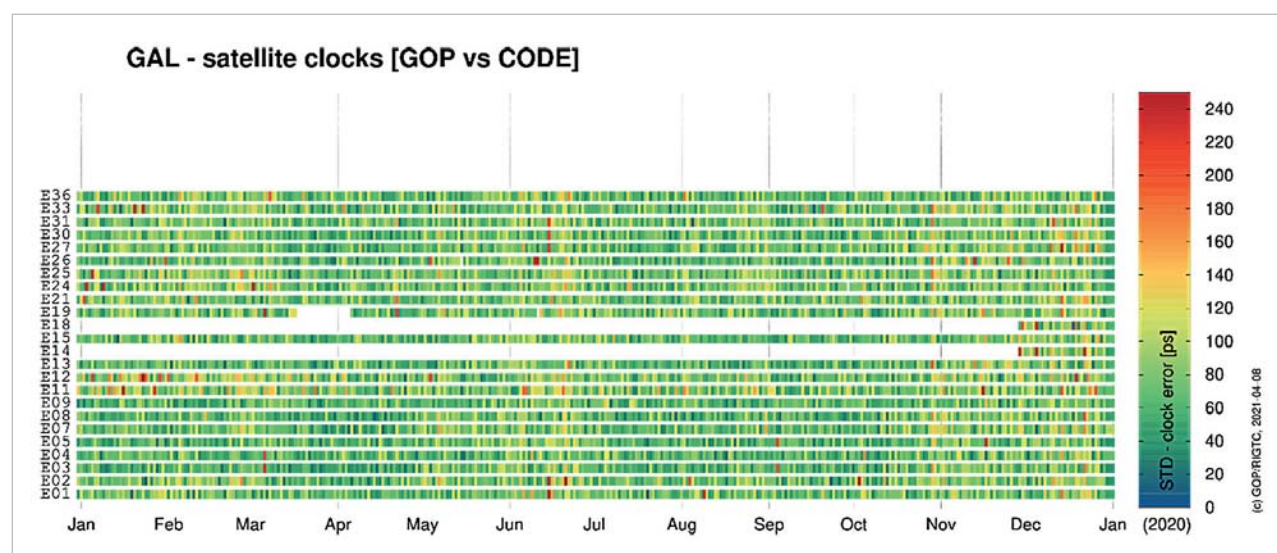
Přesné dráhy družic a hodin generované v GOP jsou pravidelně porovnávány s produkty IGS MGEX, konkrétně řešením z Centre for Orbit Determination in Europe (CODE) [14], [15] a Francouzské kosmické agentury (CNES) [16]. Porovnání na denní bázi provádíme s pomocí G-Nut/Aset software při časovém rozlišení 15 minut. Porovnání zahrnuje i výpočet 7 parametrů Helmertovy transformace

(3 translace, 3 rotace a 1 měřítko) mezi oběma řešeními s vyloučením problematických družic, pokud jsou jejich pozice identifikovány jako odlehle pozorování. Chod družicových hodin je porovnáván ve dvojítech diferencí, kdy první difference odstraňuje referenční datum chodu hodin jednotlivých produktů (patrně jako společný offset v chodu hodin všech družic ve společném okamžiku), a druhá eliminuje počáteční nejistoty hodin korelující se systematickými chybami zpoždění signálu při zpracování a jeho průchodu hardware na každé družici. Diference hodin jsou navíc redukovány o chybu z radiální polohy družice transformovanou pro tento účel do domény času, jelikož vlastní chod hodin kompenzuje i chybu v radiální poloze.

Na **obr. 6** a **obr. 7** jsou zobrazeny výsledky porovnání rychlých drah družic GOP a korekcí chodu družicových hodin pro Galileo s finálními produkty z CODE během roku 2020. Je patrné, že 30. listopadu 2020, byly začleněny i dvě družice Galileo (E14 a E18) na eliptických drahách, a to



Obr. 6 Porovnání GOP (rychlých) a CODE (finálních) drah družic Galileo v roce 2020



Obr. 7 Porovnání GOP (rychlých) a CODE (finálních) korekcí chodu hodin družic Galileo v roce 2020

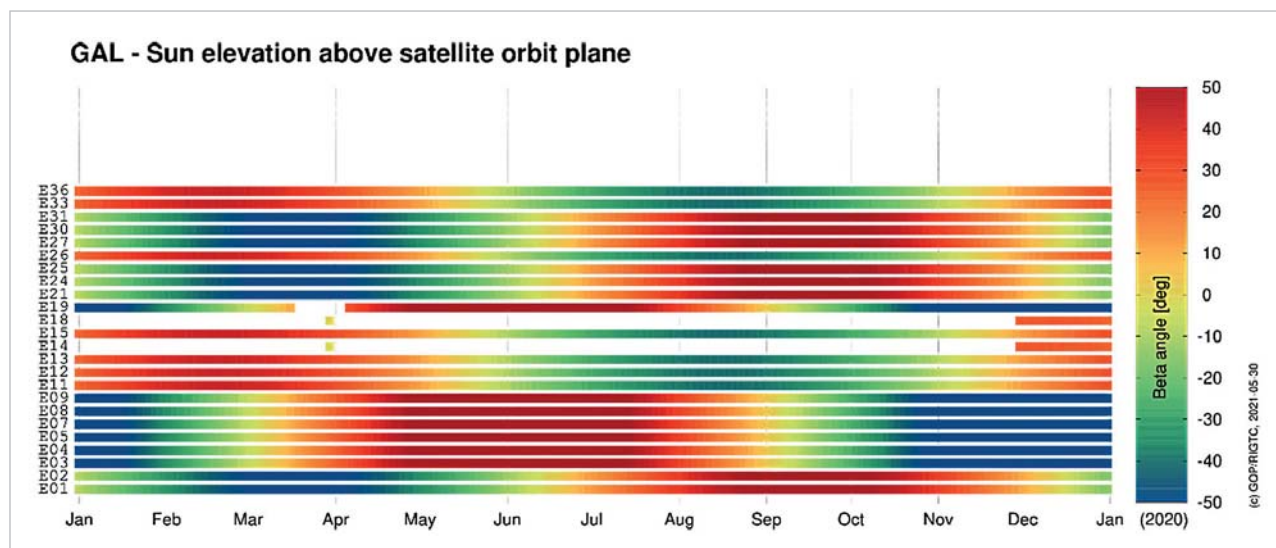
okamžitě po jejich aktivaci. V porovnání drah GOP vůči CODE jsou zřetelně opakující se období snížené přesnosti drah u družic, jejichž rovina oběžné dráhy se blíží k poloze Slunce, tzv. beta úhel charakterizující elevaci Slunce nad příslušnou orbitální rovinou je velmi malý, viz **obr. 8**. Tento efekt není patrný vůči řešení CNES, protože odpovídá nedávné aktualizaci dráhového modelu v CODE, který lépe eliminuje vliv tepelného vyzařování z družic při jejich průchodu zákrytem Země [17]. Problémy v jednotlivých dnech (vertikály) nebo u jednotlivých družic (horizontály) nejčastěji souvisí s nedostatkem optimálního pokrytí družicových dat Galileo v globálním měřítku či v určitém regionu pro ultrarychlé analýzy. Nedostatek observací pak více ovlivňuje určení stochastického chodu družicových hodin než vlastních drah, které mají dynamický charakter. **Obr. 9** charakterizuje přesnost rychlých drah GOP pro individuální družice vůči finálním produktům z CODE, která dosahuje 3 cm pro GPS NAVSTAR a 6 cm pro Galileo.

4. Dostupnost služby

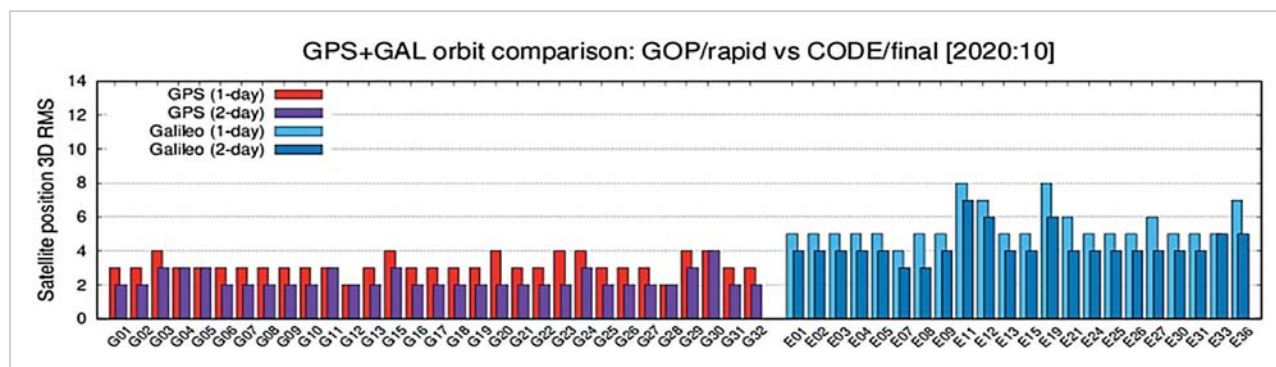
Dostupnost Galileo OS sledujeme pomocí dvou indikátorů: 1) dostupnost alespoň jednoho signálu na dvou frekvencích a 2) dostupnost parametru přesnosti 3D (DOP, dilution of

precision) menší než 6. Tento způsob umožňuje monitorovat celý rozsah služby (tj. globální pokrytí), jsou k němu zapotřebí pouze navigační data ze souborů BRDC a nezahrnuje chyby z vlivu prostředí (atmosféry, lokální efekty) či uživatelského vybavení (přijímač, infrastruktura). Klíčové indikátory (KPI, Key Parameter Indicators) monitorujeme v pravidelné mřížce „uživatelských“ bodů s horizontálním rozlišením $10^\circ \times 10^\circ$ při časovém vzorkování 900 s. Pro každý bod a epochu je sledována dostupnost OS SIS v duální frekvenci a PDOP (Position Dilution of Precision), obojí pouze pro aktivní (zdravé) družice v elevaci nad 5° nad horizontem. Zdraví družic je hodnoceno podle všech indikátorů navigační zprávy – SHS, DVS, SISA a časové platnosti efemerid [10].

Indikátory dostupnosti služby jsou sledovány s využitím softwaru G-Nut/Aset a souborů GOP BRDC. Měsíčně reportované výsledky dostupnosti OS SIS dvou-frekvenčního signálu jsou určeny pro místo s nejhorší globální hodnotou (WUL, Worst User Location) na celé Zemi. **Obr. 10** znázorňuje vývoj dostupnosti OS SIS od října 2018 do května 2021 s využitím navigačních dat I/NAV (podobně, ale nezávisle monitorujeme též dostupnost zpráv F/NAV). Pokles KPI na 81,08 % je patrný v období 11.–17. června 2019, které odpovídá nedostupnosti Galileo OS v důsledku kompletně chybějících navigačních dat. Dále lze pozorovat dvě kratší události také stručně popsané v tomto článku: 7.–8. listopadu 2018 a 14. prosince 2020.



Obr. 8 Beta úhel charakterizující elevaci Slunce k rovině drah družic systému Galileo

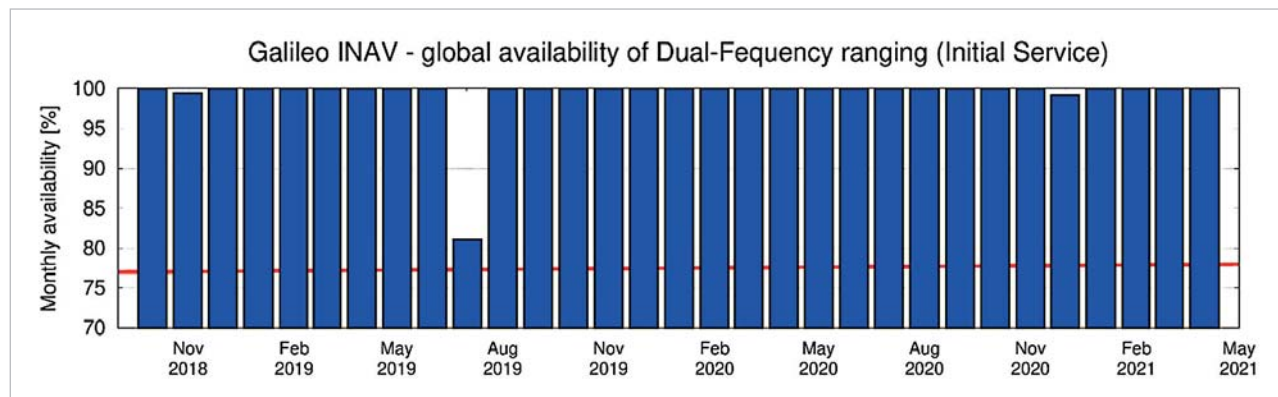


Obr. 9 Přesnost rychlých drah GOP z porovnání s finálními produkty CODE

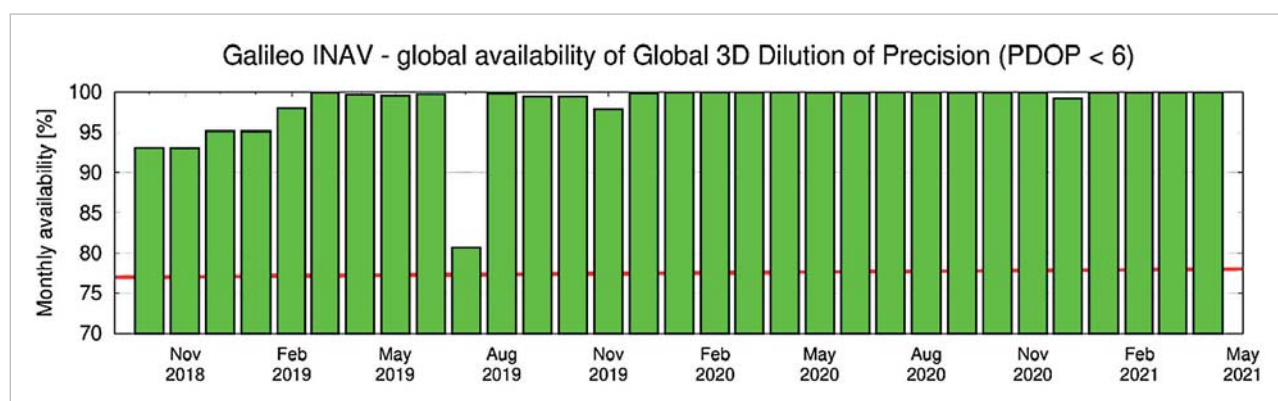
Dostupnost PDOP < 6 je reportována formou váženého průměru (vzhledem k zeměpisné šířce) výsledků dosažených na všech bodech definované globální mřížky. Obr. 11 ukazuje měsíčně určené KPI během posledních 3 let. Od okamžiku, kdy Galileo má 22 aktivních družic rovnoměrně obíhajících okolo Země, tj. od 11. února 2019, dosáhla služba nízkých hodnot PDOP a umožnila tak poprvé určování pozice na jakémkoli místě na Zemi po celý den. Měsíční hodnoty KPI se dostaly nad 99 % s jedinou výjimkou výpadku služby v červnu 2019, kdy hodnota klesla na 87 %, ale i tento výsledek splnil 77 % minimální dostupnosti sys-

tému (MPL, Minimum Performance Levels) definované v dokumentu pro Galileo OS SIS [5].

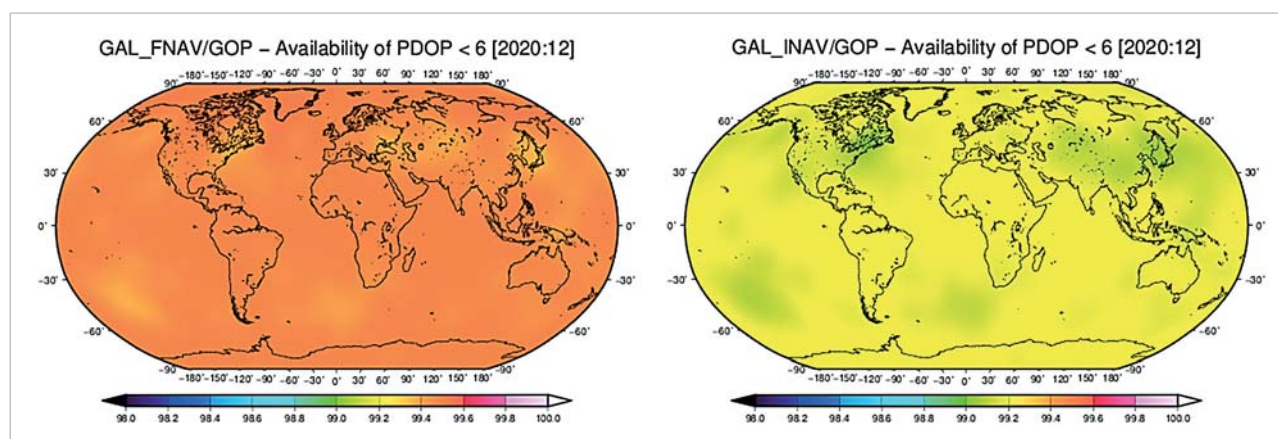
Obr. 12 zobrazuje ukázkou globálních map měsíčních hodnot PDOP KPI v prosinci 2020 s použitím navigačních dat F/NAV (vlevo) a I/NAV (vpravo), a zahrnuje tudíž i událost ze 14. prosince 2020. U ní je patrný (ačkoliv malý) rozdíl mezi KPI pro data F/NAV a I/NAV, pro všechny družice dostupné po dobu 4 a 6 hodin, respektive. V obou případech bylo přesto dosaženo hodnot KPI nad 98 % a navíc se jednalo o ojedinělou událost v průběhu roku 2020.



Obr. 10 Dostupnost Galileo I/NAV dvou-frekvenční služby v období říjen 2018 – květen 2021



Obr. 11 Dostupnost Galileo I/NAV PDOP < 6 v období říjen 2018 – květen 2021



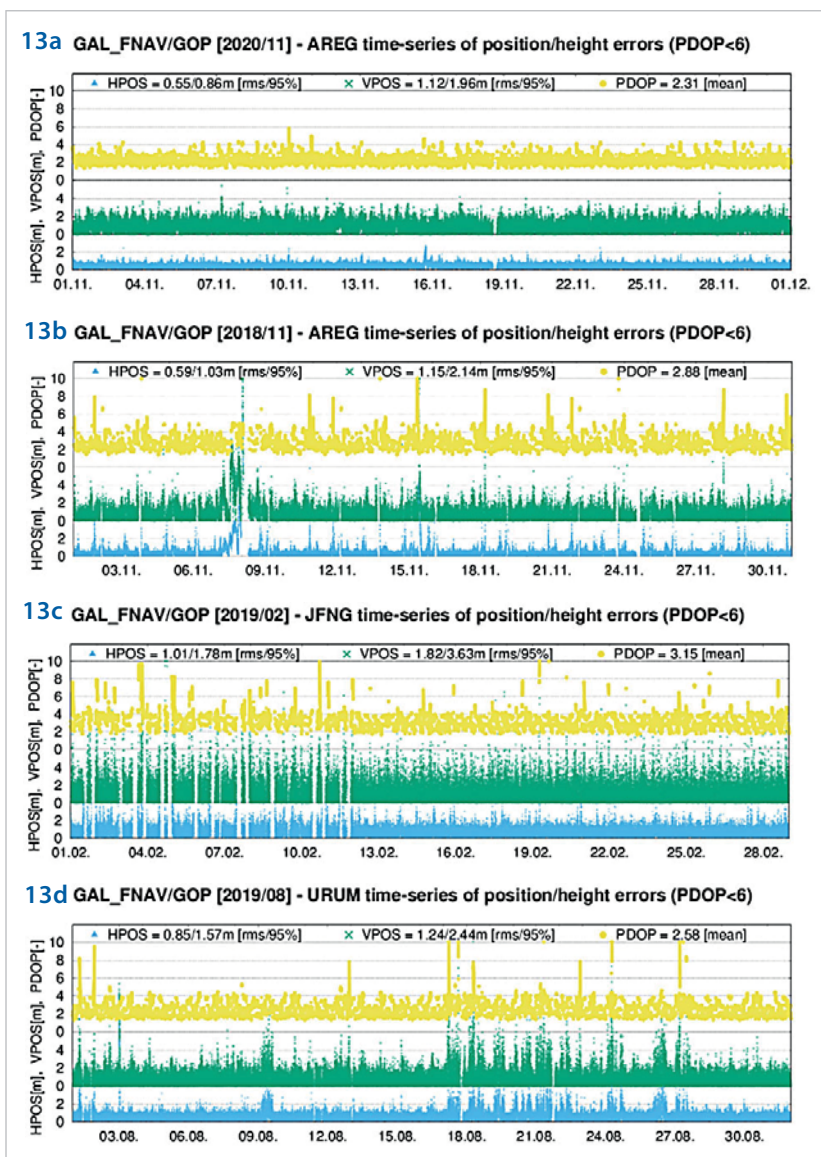
Obr. 12 Průměrná dostupnost PDOP < 6 v prosinci 2020 pro F/NAV (vlevo), I/NAV (vpravo)

5. Přesnost služby

Přesnost služby monitorujeme na základě zpracování reálných dat v diskretních bodech na povrchu Země, a tento přístup proto zahrnuje také chyby z vlivu atmosféry, přijímače a prostředí místa pozorování. Výpočet provádíme pro 14 vybraných stanic rozmístěných po celém světě a poskytujících signály Galileo E1, E5a a E5b. V prvním kroku určujeme denní referenční souřadnice metodou přesného určování polohy (PPP, Precise Point Positioning) [18] pomocí softwaru G-Nut/Geb [19], [20] s využitím fázových i kódových observací a přesných drah družic GOP a oprav chodu hodin. Každodenně také určujeme souřadnice vybraných stanic při standardním určování polohy (SPP, Standard Point Positioning) užívajícího pouze kódových pozorování, konsolidovaných navigačních dat GOP a softwaru G-Nut/Anubis [21]. Poloha je určována pomocí dvou nezávislých řešení kombinujících signály Galileo E1+E5a a E1+E5b spolu s navigačními daty typu F/NAV a I/NAV. Použité družice respektují indikátory SHS, DVS, SISA z navigačních dat a dobu platnosti vysílaných efemerid. Použité

jsou všechny aktivní družice s elevací vyšší nad 5°. Souřadnice stanice, zpoždění troposféry a chod hodin přijímače jsou určovány společně v každé výpočetní epoše (30 s) za splnění podmínky, že hodnota PDOP je menší než 6.

Obr. 13 ukazuje vybrané časové řady horizontálních a vertikálních chyb v určení polohy při využití signálů E1+E5a a navigačních dat F/NAV. Chyba v poloze, absolutní chyba ve výšce a PDOP jsou zobrazeny modrou, zelenou a žlutou barvou. Stanice AREG (lokalita Arequipa, Peru) vykazuje velmi dobré výsledky během listopadu 2020 (**obr. 13a**). U stanice JFNG (lokalita Jiufeng, Čína) lze vidět důsledek nižšího počtu Galileo družic před 11. únorem 2019 (**obr. 13c**), v důsledku čehož nemohla být pravidelně vypočtena poloha. Vliv degradace a následného výpadku navigačních dat po dobu cca 27 hodin v průběhu 7.–8. listopadu 2018 (reportováno v NAGU 2018027-028) na výpočet polohy stanice AREG je patrný na **obr. 13b**. Nakonec je ukázán rovněž vliv instrumentace (**obr. 13d**), konkrétně degradace příjmu signálu v průběhu srpna 2019, na přesnost určování polohy na stanici URUM (lokalita Urumči, Čína).



Obr. 13 Ukázka různých časových řad chyb v poloze a výšce za využití signálů E1+E5a s podporou navigačních zpráv F/NAV

Tab. 1 95% chyby v poloze a výšce monitorované na 14 stanicích v průběhu 4. kvartálu 2020

95% Polohová chyba [m]							95% Absolutní vertikální chyba [m]					
Stanice	E1+E5a a F/NAV			E1+E5b a I/NAV			E1+E5a a F/NAV			E1+E5b a I/NAV		
	říjen	listopad	prosinec	říjen	listopad	prosinec	říjen	listopad	prosinec	říjen	listopad	prosinec
AREG	0,67	0,67	0,64	0,68	0,68	0,65	1,66	1,66	1,71	1,46	1,45	1,48
ASCG	1,55	1,52	1,46	1,76	1,73	1,66	2,71	2,63	2,61	2,94	2,94	2,82
GAMG	0,97	1,19	0,91	1,06	1,28	1,00	2,01	2,25	1,86	2,09	2,29	1,91
HARB	0,80	0,78	-	0,86	0,85	-	1,91	1,99	-	1,93	2,04	-
JFNG	1,29	1,31	1,41	1,47	1,45	1,47	2,73	2,67	2,88	3,18	3,07	3,05
KOUG	0,94	0,93	0,91	1,05	1,02	1,00	2,17	2,25	2,20	2,39	2,48	2,40
MATE	0,83	0,84	0,81	0,90	0,90	0,87	1,49	1,48	1,47	1,57	1,58	1,54
MAYG	1,40	1,62	1,35	1,53	1,73	1,49	2,63	2,66	2,63	2,85	2,86	2,77
METG	0,88	0,90	0,91	0,98	1,00	1,01	1,26	1,29	1,32	1,35	1,39	1,37
OWMG	1,20	1,45	1,04	1,33	1,55	1,13	2,31	2,48	1,98	2,43	2,55	2,04
POTS	1,52	1,48	1,48	1,67	1,62	1,62	2,01	1,96	2,00	2,16	2,12	2,13
STJ3	1,04	1,00	0,95	1,14	1,11	1,05	1,85	1,73	1,62	1,94	1,85	1,74
URUM	1,19	1,14	1,31	1,35	1,33	1,54	1,88	1,78	1,64	1,96	1,86	1,85
YEL2	0,86	0,78	0,86	0,95	0,84	0,93	1,55	1,41	1,51	1,63	1,50	1,58
	1,08	1,11	1,08	1,20	1,22	1,19	2,01	2,02	1,96	2,13	2,14	2,05

Tab. 1 shrnuje hodnoty 95 % chyb v poloze a výšce v jednotlivých měsících posledního kvartálu v roce 2020. Je patrné, že výsledky se liší stanice od stanice, přičemž nejmenší chyby bylo dosaženo na stanicích AREG, METG (lokalita Metsähovi, Finsko) a YEL2 (lokalita Yellowknife, Kanada) s hodnotami chyb v rozsahu 0,6-1,0 m pro polohu a 1,3-1,8 m pro výšku. Nejmeně přesné výsledky vykazují stanice ASCG (lokalita Ascension, Svatá Helena), JFNG a MAYG (lokalita Dzaoudzi, Mayotte) s hodnotami 1,3 až 1,8 m pro polohu a 2,5-3,5 m pro výšku. Podobné výsledky lze hodnotit jako typické pro standardní řešení využívající kódová měření Galileo a data F/NAV a I/NAV v letech 2019 a 2020. V současné době jsou nejlepší ze všech systémů GNSS.

6. Závěr

Monitorování Galileo OS SIS prvotně vyvinuté a od října 2018 realizované na GOP zahrnuje řadu procesů využívajících jak vlastní software, tak vstupní referenční produkty pro systémy GPS NAVSTAR a Galileo generované v rychlém módu. Příspěvek do projektu GRC-MS je hodnotný jak svou nezávislostí, tak i rychlou dostupností v řádu několika dnů. Navíc je řešení snadno rozšiřitelné o další indikátory, systémy GNSS dokonce aplikovatelné v režimu v reálném čase.

Během období monitorování (2018/Q4 – 2020/Q4) byly výsledky Galileo OS SIS velmi dobré ve všech monitorovaných aspektech dostupnosti a přesnosti služby a splnily všechny minimální parametry její výkonnosti, ačkoliv bě-

hem sledovaného období došlo k několika význačnějším událostem. Níže uvedené byly analyzovány na GOP, reportovány GRC a EUSPA/GSA při čtvrtletních zprávách a některé zmíněny i v tomto článku:

- 7.–8. listopad 2018 – neplánované přerušení navigačních dat pro všechny družice po dobu cca 27 hodin (viz NAGU 2018027-028),
- 11. únor 2019 – aktivace nových družic Galileo (E13, E15, E33 a E36) a prvotní dosažení hodnot PDOP < 6 v globálním rozsahu během 24 hodin,
- 11.–17. červenec 2019 – neplánovaná nedostupnost OS SIS v délce cca 6 dní pro všechny družice (viz NAGU 2019025-027),
- 2.–3. září 2019 – dostupnost palubních efemerid predikovaných pouze z družice (tj. bez pozemní aktualizace) po dobu 12 hodin,
- 29. říjen 2019 – krátkodobá degradace hodin na družici E11 (následovala deaktivace družice) a cca 30 minut impakt na přesnost určení polohy zejména jihovýchodně od Afriky,
- 30. říjen 2020 – aktivace dvou excentrických družic Galilea (E14 a E18),
- 14. prosinec 2020 – nedostupná data F/NAV a I/NAV po dobu 4 resp. 6 hodin pro všechny družice (viz NAGU 2020021).

Poděkování Evropské unii a Evropské agentuře pro GNSS za spolufinancování projektu GRC-MS, v rámci něhož probíhá od listopadu 2019 spolupráce s GRC a členskými státy na nezávislém monitorování otevřených služeb systému Galileo (grant č. GSA/GRANT/04/2016).

LITERATURA:

- [1] BUIST, P.-MOZO, A.-TORK, H.: Overview of the Galileo Reference Centre: Mission, Architecture and Operational Concept. Proceedings of the 30th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017), Portland, Oregon, USA, September 2017, p. 1485-1495.
- [2] BUIST, P.-PORRETTA, M.-MOZO, A.-TORK, H.: The Galileo Reference Centre and Its Role in the Galileo Service Provision. 69th International Astronautical Congress (IAC), Bremen, Germany, 1-5 October 2018.
- [3] DOUŠA, J.: GOP's consolidated multi-GNSS navigation data archive, 2018. [online]. Dostupné na: <https://doi.org/10.24414/c4ba-kf16>.
- [4] Galileo Open Service – Signal In Space Interface Control Document (SIS ICD v2), January 2021. [online]. Dostupné na: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.0.pdf.
- [5] Galileo Open Service – Service Definition Document (Galileo OS SDD v1.10, May 2019. [online]. Dostupné na: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD_v1.1.pdf.
- [6] DACH, R.-LUTZ, S.-WALSER, P.-FRIDEZ, P. (Eds): Bernese GNSS Software Version 5.2, User manual. Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing, 2015.
- [7] DOUŠA, J.: Precise Orbits for Ground-Based GPS Meteorology: Processing Strategy and Quality Assessment of the Orbits Determined at Geodetic Observatory Pecný. J. Meteor. Soc. Jap., 2004, 82, p. 371-380.
- [8] DOUŠA, J.: Development of the GLONASS ultra-rapid orbit determination at Geodetic Observatory Pecný. Geodesy for Planet Earth, Proceedings of the IAG Symposium, S.Kenyon, M.C.Pacino, U.Marti (eds.), Buenos Aires, Aug 31 – Sep 4, 2012, IAG Symposia, Springer, 136, p. 1029-1036.
- [9] ARNOLD, D.-MEINDL, M.-BEUTLER, G.-DACH, R.-SCHAER, S.-LUTZ, S.-PRANGE, L.-SOŠNICA, K.-MERVART, L.-JÄGGI, A.: CODE's new solar radiation pressure model for GNSS orbit determination. J. Geod., 2015, 89, p. 775-791.
- [10] IERS Conventions, IERS Technical Note 36, G. Petit and B. Luzum (eds.) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010, 179 pp.
- [11] GE, M.-CHEN, J.-DOUŠA, J.-GENDT, G.-WICKERT, J.: A computationally efficient approach for estimating high-rate satellite clocks corrections in real-time, GPS Solut., Springer Berlin/Heidelberg, 2012, 16(1), p. 9-17.
- [12] MONTENBRUCK, O.-HAUSCHIED, A.-STEIGENBERGER, P.: Differential Code Bias Estimation using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps, Navig. J. ION, 2014, 61(3), p. 191-201.
- [13] ZHAO, L.-DOUŠA, J.-YE, S.-VÁCLAVOVIC, P.: A flexible strategy for handling the datum and initial bias in real-time GNSS satellite clock estimation, J Geodesy, 2020, 94, 1.
- [14] PRANGE, L.-DACH, R.-LUTZ, S.-SCHAER, S.-JÄGGI, A.: The CODE MGEX Orbit and Clock Solution, C. Rizos, P. Willis (eds) IAG 150 Years. IAG Symposia, Springer, Vol. 143, 2015.
- [15] PRANGE, L.-ORLIAC, E.-DACH, R. et al.: CODE's five-system orbit and clock solution – the challenges of multi-GNSS data analysis, J. Geod., 2017, 91, 345 pp.
- [16] LOYER, S.-PEROSANZ, F.-MERCIER, F.-CAPDEVILLE, H.-MARTY, J. C.: Zero-difference GPS ambiguity resolution at CNES-CLS IGS Analysis Center. J. Geod., 2012, 86, p. 991-1003.
- [17] SIDOROV, D.-DACH, R.-POLLE, B.-PRANGE, L.-JÄGGI, A.: Adopting the empirical CODE orbit model to Galileo satellites, Adv Space Res, (in press), 2020, 66 (12), p. 2799-2811.
- [18] ZUMBERGE, J. F.-HEFLIN, M. B.-JEFFERSON, D. C.-WATKINS, M. M.-WEBB, F. H.: Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks J. Geoph, 1997, Res. (SE) 102, p. 5005-5017.
- [19] VÁCLAVOVIC, P.-NESVADBA, O.: Comparison and assessment of float, fixed, and smoothed Precise Point Positioning, Acta Geodyn. Geomater., Vol. 17, 2020, No. 3 (199), p. 329-340.
- [20] VÁCLAVOVIC, P.-DOUŠA, J.-GYORI, G.: G-Nut software library - state of development and first results, Acta Geodyn Geomater, Vol. 10, 2013, No. 4 (172), p. 431-436.
- [21] VÁCLAVOVIC, P.-DOUŠA, J.: G-Nut/Anubis – open-source tool for multi-GNSS data monitoring, Rizos Ch and Willis P (eds.), IAG Symposia Series, IAG 150 Years. Springer, 2016, 143, p. 775-782.

Do redakce došlo: 16. 6. 2021

Lektoroval:
Ing. Jan Řezníček, Ph.D.,
Zeměměřický úřad