



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Jaroslav Oršula

JEVY KOSMICKÉHO POČASÍ

Diplomová práce

2020

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621**Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Jaroslav Oršula

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Jevy kosmického počasí**

Název tématu (anglicky): Space Weather Phenomena

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je zhodnotit vliv kosmického počasí na systémy GNSS, dle osnovy uvedené v následujících bodech:
- Popis jevů kosmického počasí
- Vliv kosmického počasí v letectví
- Srovnání ukazatelů GNSS signálu s aktivitou Slunce
- Korelace mezi K-indexem a přesností GNSS
- Návrhy a doporučení



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Space Weather Impacts on Aviation Systems. Bill Murtagh. NOAA Space Weather Prediction Center. International Air Safety & Climate.
Space weather & Critical Infrastructures: Findings and Outlook. KRAUSMANN ELISABETH; ANDERSSON EMMELIE; GIBBS MARK; MURTAGH WILLIAM

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tereza Topková**
doc. Ing. Jakub Hospodka, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: **17. července 2019**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **18. května 2020**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Bc. Jaroslav Oršula
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 17. července 2019

PodĎakovanie

Moje poĎakovanie patrí Ing. Tereze Topkovej a doc. Ing. Jakubovi Hospodkovi, Ph.D. za ich odborné vedenie, ochotu, trpezlivosť, rady, čas a pomoc pri vypracovaní tejto diplomovej práce. Tiež by som rád poĎakoval svojej rodine za podporu v týchto náročných časoch, odborníkom z Akadémie vied ČR a tímu EGNOSu za poskytnutie dôležitých rád a doporúčení.

Prehlásenie

„Nemám závažný dôvod proti užívaniu tohto školského diela v zmysle § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o autorskom práve, o právach súvisiacich s autorským právom a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon).“

„Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracoval samostatne a že som uviedol všetky informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o dodržiavaní etických princípov pri príprave vysokoškolských záverečných prác.“

V Prahe dňa 10.8.2020



.....
podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

JEVY KOSMICKÉHO POČASÍ

Diplomová práce

2020

Bc. Jaroslav Oršula

Abstrakt

Práce sa zaoberá popisom javov vesmírneho počasia, ich vznikom, šírením a dôsledkami na našu planétu a družicové globálne navigačné systémy. Práca sa venuje popisu chýb spôsobených týmito javmi, ich korekciám a vplyvom na systémy GNSS. Ďalej sú porovnané namerané dáta pomocou prijímača GNSS s hodnotami indexu Kp a ionosférickými korekciami získanými zo systému EDAS.

Kľúčové slová

Vesmírne počasia, Slnčná erupcia, Slnčná búrka, Ionosféra, systémy GNSS, EGNOS, EDAS, Index Kp

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE
FACULTY OF TRANSPORTATION SCIENCES

SPACE WEATHER PHENOMENA

Master's thesis

2020

Bc. Jaroslav Oršula

Abstract

This master's thesis describes space weather phenomena, their formation, propagation and consequences on our planet and global navigation satellite systems. The thesis also describes errors caused by this phenomena, their corrections and effects on GNSS systems. Afterwards, the data measured using a GNSS receiver are compared with Kp index values and ionospheric corrections obtained from the EDAS system.

Keywords

Space weather, Solar flare, Solar storm, Ionosphere, GNSS systems, EGNOS, EDAS, Kp index

Obsah

Zoznam použitých skratiek.....	8
Úvod.....	12
2 Vesmírne počasie.....	13
2.1 História vesmírneho počasia a pozorovaní.....	13
2.2 Javy vesmírneho počasia.....	15
2.2.1 Slniečna erupcia.....	15
2.2.2 Výron koronálnej hmoty.....	16
2.2.3 Slniečné škvrny a slnečný cyklus.....	18
2.2.4 Slniečný vietor.....	19
2.2.5 Geomagnetické búrky.....	20
2.2.6 Ionosférické búrky.....	22
2.2.7 K a A indikátory.....	22
2.2.8 Polárna žiara.....	23
3 Vplyv vesmírneho počasia v letectve.....	25
3.1 Slniečna aktivita a šírenie vln HF.....	25
3.1.1 Solárna radiácia.....	26
3.1.2 Slniečný tok.....	26
3.1.3 Ionizácia.....	27
3.1.4 Optické vyžarovanie.....	27
3.1.5 Žiarenie gamma a röntgenové žiarenie zo solárnej explózie.....	28
3.1.6 Rádiové žiarenie zo solárnej erupcie.....	28
3.1.7 Rádiové žiarenie spôsobené elektrónmi.....	29
3.1.8 Rádiové žiarenie spôsobené rázovými vlnami.....	29
3.1.9 Rádiové vyžarovanie spôsobené plynovým oblakom.....	30
3.2 Vplyv vesmírneho počasia na systémy GNSS.....	30
3.2.1 Geomagnetické búrky a systémy GNSS.....	31
3.2.2 Ionosférická scintilácia.....	32

3.2.3 Celkový obsah elektrónov	32
3.2.4 Atmosférické zoslabenie a zoslabenie vplyvom dažďa	33
3.2.5 Troposférické oneskorenie	33
3.2.6 Troposférická scintilácia	35
4 Ionosférické korekcie systémov GNSS	36
4.1 Jednofrekvenčné ionosférické modely.....	36
4.1.1 Klobucharov model.....	36
4.1.2 Model BeiDou.....	39
4.1.3 Model NeQuick.....	39
4.1.4 Model GIM (IONEX)	40
4.2 Dvojfrekvenčné ionosférické modely	42
4.2.1 Bez-ionosférická kombinácia	42
5 Družicové navigačné systémy.....	43
5.1 Princíp fungovania systémov GNSS	43
5.2 Diaľkomerná metóda určovania polohy	43
5.3 Galileo.....	44
5.3.1 Kozmický segment systému Galileo	44
5.3.2 Riadiaci segment systému Galileo.....	45
5.3.3 Užívateľský segment systému Galileo	46
6 EGNOS.....	47
6.1 Princíp činnosti systému EGNOS.....	48
6.1.1 Kozmický segment systému EGNOS	48
6.1.2 Riadiaci segment systému EGNOS.....	49
6.2 Služby systému EGNOS	52
6.2.1 Open Service	52
6.2.2 Safety of Life	52
6.2.3 EGNOS Data Access Service (EDAS).....	53
6.3 Dáta vysielané prostredníctvom systému EGNOS	53
6.3.1 Druhy navigačných správ	53

6.3.1.1 Správy o informáciách o družici	54
6.3.1.2 Správy o ionosférických informáciách	56
6.3.1.3 Ostatné správy	56
6.4 Služba EDAS	58
6.4.1 Architektúra služby EDAS	58
6.4.2 Služba EDAS FTP	59
6.4.3 Služba EDAS SISNeT	59
6.4.4 Služba EDAS Ntrip	59
7 Korelácia medzi K-indexom a presnosťou meraní GNSS	60
7.1 u-Center, u-blox	60
7.2 SBAS MeNTOR	61
7.3 Praktické merania zobrazené pomocou Google Earth	64
8. Výsledky meraní, návrhy a odporúčenia	95
8.1 Výpočet korelačného indexu	96
Záver	98
Zoznam použitých zdrojov	100
Zoznam obrázkov	105
Zoznam tabuliek	107

Zoznam použitých skratiek

A	Azimuth	Azimut
APCH	Approach	Priblíženie
APV	Approach with Vertical Guidance	Priblíženie s vertikálnym vedením
Ar	Argon	Argón
ASQF	Application Specific Qualification Facility	Stanica špecifického určenia
CIR	Corotating Interaction Region	Oblasť korotujúcej interakcie
CME	Coronal Mass Ejection	Výron koronálnej hmoty
CPF	Central Processing Facilities	Centrálne spracovacie stanice
db	Decibel	decibel
E	Elevation Angle	Elevačný uhol
EDAS	EGNOS Data Access Service	Služba prístupu k dátam EGNOSu
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service	Európsky podporný geostacionárny navigačný systém
ESA	European Space Agency	Európska vesmírna agentúra
EUV	Extreme Ultraviolet Radiation	Extrémne ultrafialové žiarenie
EWAN	EGNOS Wide Area Network	Sieť rozsiahlej plochy EGNOSu
GAGAN	GPS Aided Geo Augmented Navigation	Geostacionárny pomocný augmentačný systém
GHz	Gigahertz	Gigahertz
GIVE	Grid Ionospheric Vertical Error	Gridová ionosférická chyba
GIVEI	Grid Ionospheric Vertical Error Indicator	Indikátor gridovej ionosférickej chyby
GIM	Global Ionospheric Maps	Globálne ionosférické mapy
GNSS	Global Navigation Satellite Systems	Globálne navigačné družicové systémy
GPS	Global Positioning System	Globálny navigačný systém (USA)
HF	High Frequency	Krátke vlny

HSS	High-speed Solar Wind Stream	Vysokorýchlostný slnečný vietor
IGS	International GNSS Service	Medzinárodná služba GNSS
IGP	Ionospheric Grid Point	Gridový bod ionosféry
ILS	Instrument Landing System	System prístrojového priplíženia
IODI	Issue of Data Ionosphere	Dátový výstup ionosféry
IONEX	Ionosphere Map Exchange Format	Formát dát ionosférických máp
IPP	Ionospheric Pierce Point	Bod prieniku ionosféry
KASS	Korea Augmentation Satellite System	Kórejský družicový augmentačný systém
keV	Kiloelectron Volt	kiloelektrón Volt
LASCO	Large Angle and Spectrometric Coronagraph	Širokouhlý a spektrometrický koronograf
LPV	Localiser Performance with Vertical Guidance	Priblíženie pomocou lokalizéru s vertikálnym vedením
MCC	Mission Control Centres	Centrá pre riadenie misií
MHz	Megahertz	Megahertz
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System	Multifunkčný družicový augmentačný systém
N2	Nitrogen	Dusík
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Národný úrad pre letectvo a vesmír
NLES	Navigation Land Earth Stations	Pozemné navigačné stanice
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	Národný úrad pre oceán a atmosféru
NOTAM	Notice To Airmen	Oznam pre letcov
NPA	Non-precision Approach	Nepresné priblíženie
O2	Oxygen	Kyslík
OPMET	Operational aeronautical meteorological data	Prevádzkové meteorologické letecké dáta
OS	Open Service	Otvorená služba systému EGNOS

P	Pressure	Tlak
PACF	Performance Assessment and Checkout Facility	Stanica vyhodnocovania výkonnosti a výstupov
PBN	Performance Based Navigation	Navigácia založená na výkonnosti
PCA	Polar Cap Absorbtion	Absorbcia polárnej čiapky
RIMS	Ranging Integrity Monitoring Stations	Monitorovacie stanice meracej integrity
RNP	Required Navigation Performance	Požadovaná navigačná výkonnosť
SARPs	Standards and Recommended Practices	Štandardy a odporúčenia
SBAS	Satellite-based Augmentation System	Družicový augmentačný systém
SDCM	System for Differential Corrections and Monitoring	Systém na diferenciálne korekcie a monitorovanie
SF	Solar Flux	Slniečny tok
SiS	Signal in Space	Signál v priestore
SNT	SBAS Network Time	Čas siete SBAS
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory	Slniečné a heliosférické observatórium
SoL	Safety of Life	Služba bezpečnosti života EGNOS
STEC	Slant Total Electron Content	Šikmý celkový obsah elektrónov
SWXC	Space Weather Centre	Centrum pre kozmické počasie
T	Temperature	Teplota
TEC	Total Electron Content	Celkový obsah elektrónov
TECU	Total Electron Content Unit	Jednotka celkového obsahu elektrónov
UDRE	User Differential Range Error	Diferenciálna chyba merania užívateľa
UDREI	User Differential Range Error Indicator	Indikátor diferenciálnej chyby merania
URA	User Range Accuracy	Presnosť merania užívateľa
USA	United States of America	Spojené štáty americké

UTC	Coordinated Universal Time	Koordinovaný svetový čas
VAL	Vertical Alert Limit	Vertikálny limit upozornenia
VOR	VHF Omni-directional Beacon	Všesmerový maják VHF
VHF	Very High Frequency	Veľmi krátke vlny
WAAS	Wide Area Augmentation System	Augmentačný systém pre rozsiahle oblasti (USA)

Úvod

V posledných rokoch dochádza k technologickým pokrokom vo všetkých oblastiach. Väčšina ľudí ani nepremýšľa nad tým ako tieto veci fungujú a využívajú ich denne bez toho aby sa nad nimi zamysleli. Čokoľvek čo potrebujeme nájsť, kam sa dostať, nám jednoducho stačí zadať do našich smartfónov a v momente máme zobrazenú odpoveď s navrhovanou trasou a našou aktuálnou polohou. Na rozdiel od smartfónu, ktorý držíme v ruke niekde na ulici, a aj pri chybné určenej polohe sa dokážeme zorientovať a pokračovať do nášho cieľa, piloti lietadla v hustej hmle na priblížení na pristátie s niekoľko desiatok metrovým odstupom od terénu toľko šťastia nemajú a neostáva im nič iné než sa spoliehať na techniku.

Systémy GNSS prešli obrovskými zmenami od ich vzniku a stávajú sa čoraz pevnejšou súčasťou letectva, ale aj iných dopravných a stavebných odvetví či poľnohospodárstva. Signál týchto systémov cestujúci od družíc vo výške približne 20 000 km k prijímaču na Zemi musí prekonať niekoľko rôznych atmosférických vrstiev. Vrstvou, ktorá najviac ovplyvňuje signál systémov GNSS je ionosféra. Samotné navigačné systémy však nedokážu tento signál napraviť a pomôcť musia augmentačné systémy ako európsky EGNOS, či americký WAAS, ktoré za pomoci geostacionárnych družíc a pozemných staníc zbierajú informácie signálov navigačných systémov a prostredníctvom navigačných správ vysielajú korekcie. Bolo vyvinutých niekoľko ionosférických modelov, ktoré pomáhajú vypočítať a opraviť chyby spôsobené ionosférou.

Úlohou tejto diplomovej práce je popísať javy vesmírneho počasia, ich pozorovanie, šírenie a ich následný dopad na systémy na Zemi využívajúce GNSS, letecké systémy pracujúce v pásme HF a letecké systémy využívajúce GNSS. Ďalšou úlohou je popísať funkcie augmentačného systému využívaného v Európe, EGNOS, jeho využitie, vysielané navigačné správy a korekcie na dosiahnutie čo najlepšej presnosti družicových navigačných systémov, systému EDAS, ktorý zbiera dáta systému EGNOS a následné porovnanie ionosférických dát získaných pomocou systému EDAS a indexov K_p s praktickými nameranými polohovými informáciami za pomoci prijímača GNSS a podporných programov.

2 Vesmírne počasie

Denne sa stretávame s počasím ako takým a jeho predpoveďou na Zemi, ktorej sa snažíme prispôbiť naše plány alebo aktivity. Málokto si však uvedomuje, že existuje aj niečo ako vesmírne počasie. Vesmírne počasie sa vo veľkej miere odohráva mimo našu planétu a bežní ľudia sa s ním stretávajú hlavne pri pozorovaní polárnej žiary. Tá je ale len jedným z dôsledkov celého sledu udalostí vo vesmíre. Všetko začína na Slnku, najjasnejšej a najbližšej hviezde našej slnečnej sústavy, ktorej stredom je práve Slnko. Slnko sa nachádza vo vzdialenosti 149 600 000 km od Zeme a jeho priemer je 1 392 000 km, čo je 109-krát viac ako priemer Zeme. Slnko je zodpovedné za všetky narušenia nášho vesmírneho prostredia. V každom momente zo Slnka vystupuje prúd plazmy, nazývaný slnečný vietor, ku ktorému sa z času na čas pridajú slnečné erupcie. Tie pridajú k slnečnému vetru ďalšie miliardy ton plazmy smerujúce zo Slnka, ktoré ak smerujú k Zemi, môžu spôsobiť rozsiahle geomagnetické búrky v okolí našej planéty [29].

2.1 História vesmírneho počasia a pozorovaní

História vesmírneho počasia siaha ďaleko do minulosti pretože zahŕňa celý život Slnka a Zeme a všetky dôležité zmeny, ktoré sa medzi týmito telesami odohrali počas miliárd rokov. Predpokladá sa, že vesmír vznikol pred 13,4 miliardami rokov za pomoci vodíka a hélia, základných stavebných prvkov Slnka. O miliardu rokov neskôr, pred asi 12,5 miliardami rokov prebiehal proces formovania Mliečnej dráhy, počas ktorého vznikali ťažké prvky. Hviezdy začali vznikať v období pred približne 8 miliardami rokov. Pred 6,8 miliardami rokov vznikla hviezda Alpha Centauri, viditeľná na južnej oblohe, ktorá je tretou najjasnejšou hviezdou na nebi. Pred 4,58 miliardami rokov sa pravdepodobne začal vznik Slnka. Množstvo vedcov si myslí, že vzniklo z obrovského rotujúceho oblaku známeho ako slnečná hmlovina, ktorý vďaka vlastnej gravitácii začal zvyšovať rýchlosť rotácie a sploštil sa do disku. Väčšina materiálu tak bola vtlačená do stredu a sformovala Slnko. Vek Zeme sa predpokladá na 4,54 miliardy rokov. Postupnou premenou prechádzala samotná planéta, živočíšne druhy na nej, magnetické pole Zeme, ktoré bolo pred 100 miliónmi rokov tri-krát silnejšie ako je teraz, ale aj Slnko, ktoré postupne zvyšovalo svoju jasnosť, ktorá približne v období vzniku Zeme dosahovala 70% jasnosti dnešného Slnka.

Vesmírne počasie pútalo pozornosť ľudí už oddávna, zvlášť polárna žiara na severe planéty. Záznamy o prvých pozorovaniach polárnej žiary boli nájdené v Číne a siahajú do roku 2000 pred našim letopočtom. O približne 400 rokov neskôr bola v Nemecku zostrojená prvá mapa Slnka a hviezd. V roku 1609 Galileo Galilei zostrojil svoj vlastný teleskop, ktorý následne použil na pozorovanie Mesiaca, Jupitera, Venuše a Slnka. Výsledkom jeho pozorovaní boli zistenia

o štruktúrovanosti povrchu Mesiaca, obiehajúcich mesiacoch Jupitera alebo o tom, že Venuša neobieha okolo Zeme ako sa predpokladalo, ale spoločne so Zemou obieha okolo Slnka. Pri pohľade na Slnko zistil, že sa na jeho povrchu nachádzajú tmavé oblasti, známe ako slnečné škvrny [1]. Už o niekoľko rokov neskôr, v roku 1621, francúzsky vedec a filozof Pierre Gassendi ako prvý vyslovil pomenovanie žiar pozorovaných v severných oblastiach, Aurora Borealis. Tento názov zvolil po starorímskej bohyni ranných zôr Auróre. Pierre Gassendi ale nebol prvý, kto by si túto žiaru všimol. Prvé pozorovania siahajú už do Číny do roku 2000 pred našim letopočtom a pozorovania Eskimákov a obyvateľov Škandinávie sa ústne tradujú minimálne od roku 700 pred našim letopočtom [2]. Anglický astronóm Sir Edward Sabine, ktorý spoluzakladal magnetické observatória po celom svete, v roku 1852 objavil spojitosť medzi periodickými zmenami slnečných škvŕn (slnečný cyklus) a zmenami magnetických narušení na Zemi [3]. Slnečný cyklus objavil v roku 1843 Heinrich Schwabe, ktorý počas obdobia 17 predchádzajúcich rokov každý deň keď mu to dovolila meteorologická situácia pozoroval Slnko a slnečné škvrny [4]. Ďalšou dôležitou postavou dejín vesmírneho výskumu bol americký astronóm George Ellery Hale. V roku 1908 vedel ukázať, že slnečné škvrny sú magneticky aktívne miesta s víriacimi plynmi v slnečnej fotosfére. K jeho záverom mu pomohol aj fakt, že niekoľkokrát dokázal postaviť najväčší teleskop na svete. Najprv to bol 102 cm teleskop, neskôr 152 cm, v roku 1918 dokonca 254 cm. Hale zomrel pred druhou svetovou vojnou počas ktorej sa vývoj jeho posledného 508 cm teleskopu zastavil, no v roku 1949 uzrel svetlo sveta na observatóriu Palomar. Bol zároveň najväčším teleskopom až do roku 1976 [5]. V rokoch 1939 – 1941 bolo zaznamenaných viacero narušení, ktoré mali za následok výpadky telefónnych spojení či signálov využívaných počas druhej svetovej vojny. Celosvetový výpadok rádiového signálu nastal v roku 1947, kedy vrcholil v poradí 18. slnečný cyklus. V tomto roku zároveň austrálsky astronóm Ronald G. Giovanelli prišiel s myšlienkou, že slnečné erupcie majú niečo dočinenia s magnetickými zmenami Slnka. Neskôr v roku 1956 P. A. Sweet predložil svoju myšlienku, že slnečné erupcie vznikajú magnetickou aktivitou nad slnečnými škvrnami. V roku 1958 boli za pomoci družice Explorer 1 objavené Van Allenové pásy, pomenované podľa svojho objaviteľa, Jamesa Alfreda Van Allena. Tieto radiačné pásy sa nachádzajú v okolí planét s magnetosférou a jedná sa o zachytené častice slnečného vetra v magnetickom poli Zeme. O štyri roky neskôr sa podaril ďalší významný objav, kedy sa vesmírna sonda Mariner 2 dostala do blízkosti Venuše a získala dôležité informácie o medziplanetárnom priestore a atmosfére Venuše. Po prvýkrát bola zaznamenaná teplota planéty, ktorá dosahuje až 500°C. Zároveň boli pomocou tejto sondy namerané rôzne hodnoty solárneho vetra. Išlo predovšetkým o hodnotu hustoty, rýchlosť, zloženie a zmenu slnečného vetra v čase [6]. Medzi rokmi 1962 a 1971 vyslala NASA spolu osem sond, z ktorých sedem úspešne analyzovalo Slnko na ultrafialových a röntgenových vlnových dĺžkach. V roku 1990 NASA a ESA spoločne vyslali do vesmíru sondu Ulysses na pozorovanie polárnych oblastí

Slnka. V roku 2004 sonda Genesis od NASA priniesla vzorky slnečného vetra na preskúmanie na Zemi. V roku 2007 sa prvýkrát podarilo získať 3D obraz Slnka vďaka misii STEREO pozostávajúcej zo sondy STEREO-A a STEREO-B. So sondou STEREO-B bol stratený kontakt v roku 2014, no sonda STEREO-A ostala v plnej prevádzke. Jednou z najdôležitejších slnečných misií bola misia sondy SOHO, navrhnutá na štúdium slnečného vetra a vonkajších vrstiev a vnútornej štruktúry Slnka. Podarilo sa namerať zrýchlenie slnečného vetra, objaviť koronálne vlny a slnečné tornáda, objaviť viac ako 1000 komét a získať podklady na kvalitnú predikciu vesmírneho počasia [7]. V roku 2018 bola na svoju sedemročnú misiu vypustená sonda Parker od vesmírnej agentúry NASA. Sonda bude počas tohto obdobia skúmať Slnko, ku ktorému sa priblíži postupne na 19 miliónov kilometrov a neskôr až na 6 miliónov kilometrov¹. Hlavným cieľom tejto misie je sledovanie ako sa pohybuje energia a teplo cez slnečnú korónu, a čo spôsobuje zrýchlenie slnečného vetra a energetických častíc zo Slnka. Vďaka sonde Parker je možné vstúpiť priamo do slnečnej koróny, ktorej teplota je približne 1370°C [8]. Všetky tieto historické, ale aj moderné objavy prispeli k dnešným možnostiam pozorovať Slnko a vesmírne počasia v takom rozsahu, ako je to možné dnes.

2.2 Javy vesmírneho počasia

Ako už bolo spomenuté, vesmírne počasia je výsledkom slnečnej aktivity. Zo Slnka neustále vystupuje obrovské množstvo materiálu v podobe plazmy, ktorá ako slnečný vietor postupuje v smere od Slnka. Tento slnečný vietor pri kontakte so zemskou magnetosférou spôsobuje na Zemi polárnu žiaru. Intenzita polárnej žiary závisí na sile slnečného vetra. V prípade výraznejšej slnečnej aktivity môže na Slnku dôjsť k slnečnej erupcii, vďaka ktorej sa k slnečnému vetru pridá prostredníctvom výronu koronálnej hmoty ďalšie množstvo plazmy vystupujúcej zo Slnka. Ak táto erupcia smeruje k Zemi, tak tá bude v najbližších dňoch zasiahnutá geomagnetickou búrkou, ktorá môže spôsobiť zvýšenie intenzity polárnej žiary, no v niektorých prípadoch môže dôjsť k silnému rušeniu rádiových signálov, či dokonca k ich výpadku. V nasledujúcich kapitolách bude opísaný vznik javov vesmírneho počasia, ich priebeh a dopad na našu planétu.

2.2.1 Slnečná erupcia

Až donedávna bola fyzikálna stránka slnečných erupcií neznáma. Sú to javy s extrémne veľkou energiou na Slnku, ktoré môžu vyvolať emisie v celom spektre od optických vlnových dĺžok, gama a röntgenových lúčov po frekvencie HF. Slnečná erupcia je v mnohých ohľadoch podobná jadrovému výbuchu. V momente výbuchu môžeme vidieť obrovský záblesk, hneď na

¹ Priemer Slnka je 1 392 680 km, čo znamená, že ak by Slnko bolo veľké ako Zem, sonda by bola vo vzdialenosti približne 55 000 km.

to sa spustia detektory gama a röntgenového žiarenia a počujeme ohlušujúci zvuk prichádzajúci z prijímačov. Svetlo, ionizujúce žiarenie a rádiové vlny sa k nám dostanú okamžite ako prvé, keďže sa všetky pohybujú rýchlosťou svetla. Slnčná erupcia sa veľmi nelíši. Presný mechanizmus slnečnej erupcie nie je známy, no predpokladá sa, že siločiar magnetického poľa vychádzajúce zo slnečných škvrn sú také silné, že horúce horiace plyny zo Slnka sú v jednom momente vysaté spod povrchu a postupujú po siločiarach spôsobujúc intenzívnu explóziu. Gama a röntgenové žiarenie uniká smerom von rýchlosťou svetla. Explózia vytvorí rázovú vlnu pohybujúcu sa nadzvukovou rýchlosťou, zvyčajne okolo 1200 až 2000 km/s. Keďže úniková rýchlosť Slnka je 350 km/s, rázová vlna so sebou vynesie do vesmíru aj časť horiacej slnečnej hmoty. Táto rázová vlna a stúpajúci plynový oblak slnečnej hmoty vytrysknutý zo Slnka sa nazýva výron koronálnej hmoty, v angličtine Coronal Mass Ejection (CME). Pohybuje sa od Slnka nadzvukovými rýchlosťami a ak je trajektória a geometria správna, zasiahne aj Zem. Pri slnečnej erupcii dochádza k uvoľneniu viacerých foriem energie ktoré môžu ovplyvniť šírenie vln HF a VHF na Zemi, a to: ionizujúce žiarenie, elektróny a protóny o relativistickej rýchlosti, ktoré dorazí na Zem okamžite, nadzvuková rázová vlna pohybujúca sa spolu so slnečným vetrom a husté častice za rázovou vlnou, ktoré dorazia na Zem dva až tri dni po výbuchu [9].

2.2.2 Výron koronálnej hmoty

Výron koronálnej hmoty CME je obrovský oblak slnečnej plazmy vystupujúci zo Slnka často práve počas silných, dlhotrvajúcich slnečných erupcií. Počas slnečného minima, kedy Slnko nie je až tak aktívne, sú výrony koronálnej hmoty veľmi zriedkavé. Môže dôjsť len k jednému výronu počas jedného týždňa. Naopak, keď Slnko dosiahne svoje maximum, výrony koronálnej hmoty sú oveľa častejšie a môžeme ich pozorovať aj niekoľko v priebehu jedného dňa. Prvý dôkaz o tomto dynamickom jave prišiel z pozorovaní pomocou tzv. koronagrafu na palube vesmírnej rakety OSO 7 medzi rokmi 1971 a 1973. Koronagraf vytvára zatmenie Slnka jeho zakrytím pomocou malého disku. Ak by Slnko nebolo zakryté týmto diskom, jeho jasnosť a žiarenie by nám nedovolili pozorovať tieto vystupujúce oblaky častíc zo Slnka. Sledovanie výronov koronálnej hmoty je veľmi dôležité, nakoľko tieto výrony sú hlavným zdrojom geomagnetických búrok. Nie každá Slnčná erupcia je sprevádzaná koronálnym výronom. Silné erupcie, triedy M a X² sú veľmi silnými kandidátmi na spustenie výronov, no občas je možné, že aj erupcie triedy B alebo C sú základom pre vznik výronu koronálnej hmoty. Tie sú však zvyčajne len slabými javmi. Počas koronálneho výronu môže byť zo Slnka vystrelených

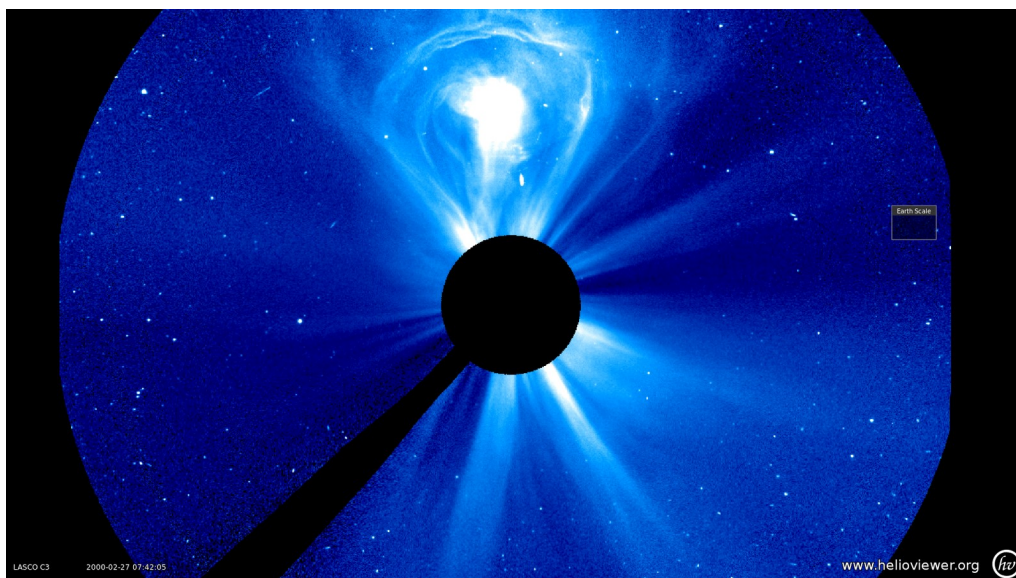
² Slnčné erupcie sú rozdelené do piatich tried, A, B, C, M, X, pričom každá trieda má hodnotu desaťnásobku predchádzajúcej triedy. Každá trieda obsahuje podtriedu s hodnotami 1-9. Existujú aj erupcie silnejšie ako by bola stupnica pri erupcii X9, a teda pre triedu X platí, že môže dosahovať aj vyššie podtriedy ako je 9. Napríklad v roku 2003 bola zaznamenaná tak silná erupcia, že došlo k preťaženiu senzorov, ktoré sa zasekli na hodnote X28 [22].

niekoľko miliárd ton koronálneho materiálu, ktorý so sebou nesie magnetické pole silnejšie ako medziplanetárne magnetické pole slnečného vetra. Výrony koronálnej hmoty cestujú preč zo Slnka rýchlosťami od pomalších ako 250 km/s do 3000 km/s. Najrýchlejšie výrony môžu dosiahnuť Zem za len 15 – 18 hodín. Pomalším to môže trvať aj niekoľkom dní. Počas svojej cesty od Slnka CME zväčšuje svoje rozmery a za čas, pokiaľ dorazí k Zemi, môže dosiahnuť až veľkosť takmer štvrtiny priestoru medzi Zemou a Slnkom. Po niekoľkých hodinách od erupcie je oblak niekoľkonásobne väčší ako Slnko samotné.

Najvýraznejšie výrony koronálnej hmoty zvyčajne vznikajú keď sa veľmi zakrútené štruktúry magnetického poľa obsiahnuté v spodnej koróne³ Slnka postupne stláčajú a dochádza ku kumulácii magnetickej energie až dôjde k tzv. rekonexii. Rekonexia je prepojenie magnetických siločiar pričom sa magnetická energia transformuje na iný druh energie. To vedie k urýchleniu častíc a náhlemu uvoľneniu elektromagnetickej energie vo forme solárnej erupcie, ktorá je zvyčajne sprevádzaná explozívnym urýchlením plazmy preč zo Slnka – CME. Tento druh výronu koronálnej hmoty zvyčajne nastáva v častiach Slnka s veľmi silným magnetickým prúdením, ako napríklad v aktívnych oblastiach spojených so skupinami slnečných škvŕn. Výrony môžu tiež nastať v oblastiach, kde je relatívne chladná a hustá plazma zachytená a zastavená magnetickým tokom vystupujúcim do vnútornej koróny. Tieto husté prúdy môžu skolabovať naspäť na slnečný povrch a byť pohltené alebo môžu vyústiť do CME. Výrony postupujúce rýchlosťou vyššou ako rýchlosť slnečného vetra v okolí môžu vytvoriť rázovú vlnu. Táto vlna pred sebou urýchli nabité častice, čo spôsobí zvýšený potenciál alebo intenzitu radiačnej búrky.

Dôležitými parametrami analýzy CME sú veľkosť, rýchlosť a smer. Tieto vlastnosti sú posudzované na základe koronografických snímok a slúžia na určenie možnej pravdepodobnosti dopadu na Zem. Slnečné a heliosférické observatórium NASA – SOHO, nesie na svojej palube koronograf známy ako LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph). Toto zariadenie je primárnym zdrojom údajov využívaným predpovednými službami na analýzu a kategóriu výronov [20,21,25].

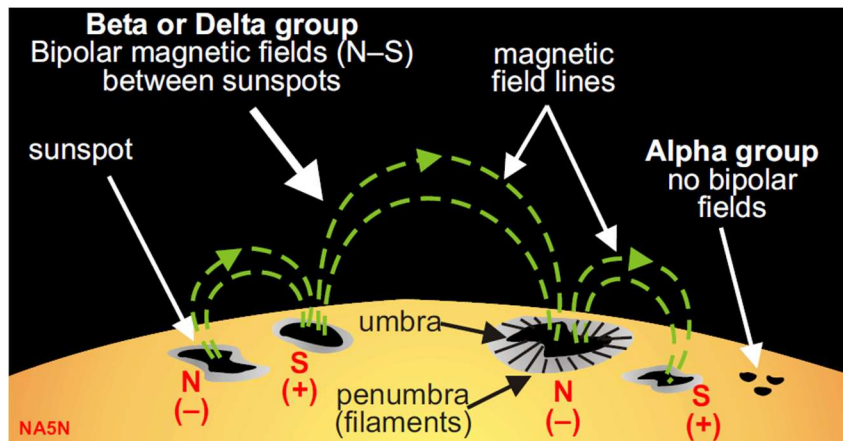
³ Koróna je navrchnejšia časť atmosféry Slnka, ktorá vo forme častíc slnečného vetra zasahuje ďaleko za obežnú dráhu Zeme [23]



Obr. 2-1: Záber koronagrafu LASCO C3 na výron korónálnej hmoty z dňa 27.2.2000 [24]

2.2.3 Slnčné škvrny a slnečný cyklus

Slnčné škvrny (sunspots) sú chladnejšie oblasti na povrchu Slnka a zistilo sa tiež, že sú to oblasti so silným magnetickým poľom. Pomenované sú ako Alfa, Beta a Delta skupiny, ako môžeme vidieť na obrázku 2-2.



Obr. 2-2: Slnčné škvrny [21]

Skupina označená ako Alfa (Alpha group), sú škvrny bez bipolárneho magnetického poľa (Bipolar magnetic field) a málokedy produkujú erupciu. V prípade prepojenia slnečných škvŕn magnetickými siločiarami (magnetic field lines) a vytvorenia bipolárneho magnetického poľa hovoríme o skupine Beta (Beta group). Ak sa skupina Beta stane intenzívnejšou so silným bipolárnym magnetickým poľom medzi škvŕnami, nazýva sa skupinou Delta (Delta group). V prípade, že sa vytvorí skupina delta, NOAA vydá upozornenie na možné slnečné erupcie. Veľká erupcia vznikne len na skupinách Beta alebo Delta, no nie je pravidlom, že vznikne na

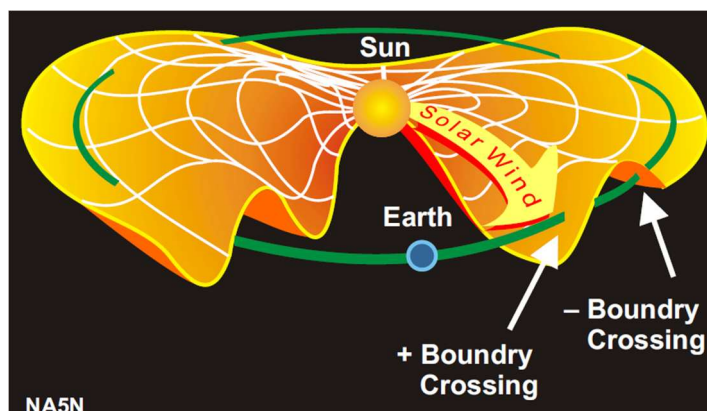
každej takejto skupine. V terminológii hlásení NOAA je pomenovaná ako umbra, centrálna časť slnečnej škvrny, obklopená vonkajšou časťou nazývanou penumbra.

Slnečný cyklus bol po prvýkrát spomenutý keď sa zistilo, že slnečné škvrny sa objavujú a opäť zanikajú v určitom opakujúcom sa časovom intervale. Hlavný slnečný cyklus, je definovaný slnečnou aktivitou, ktorá je hodnotená počtom slnečných škvŕn. Táto perióda sa pohybuje medzi 9,5 a 12,5 rokmi [9,26].

2.2.4 Slnečný vietor

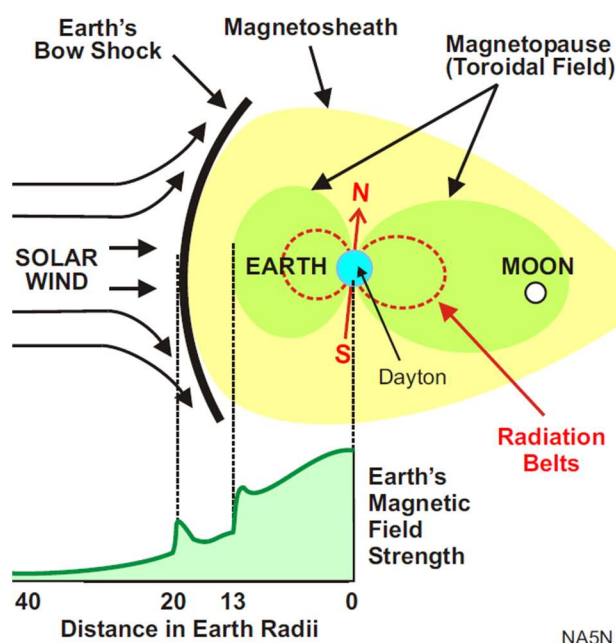
V roku 1951 pri pozorovaní komét Ludwig Bierman usúdil, že keď je jeden ohon kométy orientovaný vždy presne od Slnka, musí byť tlačný časticami vychádzajúcimi z neho. Dôkaz, že rýchlosť slnečného vetra úzko súvisí so slnečnou aktivitou priniesli pozorovania sondy Ulysses v rokoch 1994, 1995 a 2000, 2001. V rokoch 2000 a 2001 kedy bolo Slnko vo svojom maxime boli senzormi sondy zachytené dáta ukazujúce vyššiu hustotu, teplotu, rýchlosť iónov a elektrónov. Narušenia slnečného vetra po solárnej erupcii môžu spôsobiť silné rušenie rádiových signálov na Zemi vyvolaním solárnej búrky. Solárny vietor je konštantný tok plynov, elektrónov a častíc smerom od povrchu Slnka.

Hlavnými parametrami slnečného vetra sú rýchlosť a koncentrácia. Po dlhý čas sa predpokladalo, že slnečný vietor má približne konštantnú rýchlosť, okolo 350 km/s, ktorá je aj únikovou rýchlosťou Slnka. Teraz ale vieme, že tento vietor je premenlivý a dosahuje hodnoty od 350 km/s do 2000 km/s alebo pri silnej erupcii aj vyššie. Každý rok Slnko príde o asi 10^{13} ton hmoty. Slnečný vietor (Solar wind) je tvorený hlavne fotónmi, v menšom objeme aj elektrónmi a baryonovými časticami, spolu nazývanými plazma. Po rokoch družicových pozorovaní sa zistilo, že elektrické pole Slnka nie je ploché ale zvlnené, vid' obr. 2-3. Počas kľudných období je plocha prúdenia zo Slnka takmer rovná. Akonáhle dôjde k zvýšeniu slnečnej aktivity, na povrchu Slnka sa začnú objavovať nové aktívne oblasti, koronálne diery a ďalšie štruktúry, ktoré menia tvar prúdenia.



Obr. 2-3: Elektrické pole Slnka a prúdenie slnečného vetra [9]

V prípade, že Zem na svojej orbite vstúpi alebo vystúpi z elektrického poľa, hovoríme o tzv. prekročení hranice, ktorá je často ohlasovaná NOAA. Náhla zmena rýchlosti slnečného vetra a smer prúdenia môžu vyvolať solárnu búrku. Záporné prekročení hranice (- Boundry Crossing) spôsobuje silnejšiu solárnu búrku ako kladné (+ Boundry Crossing). Málokedy sú však silné a zvyčajne trvajú len niekoľko hodín. Na obrázku 2-4 môžeme zároveň vidieť dôvod, prečo sa slnečný vietor neustále mení a spôsobuje slabé geomagnetické búrky aj napriek kľudným slnečným podmienkam. Slnečný vietor svojim prúdením vytvára na magnetické pole Zeme tlak, ktorý deformuje jeho prstencový tvar.



Obr. 2-4: Geomagnetické pole Zeme pri slnečnom vetre [9]

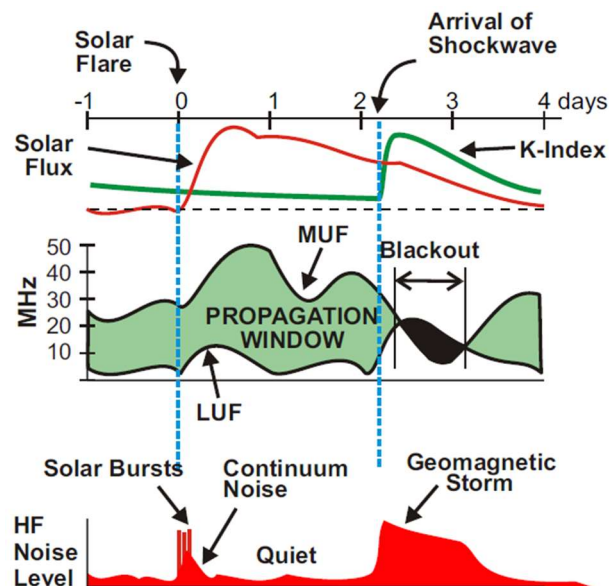
Ak sa tento tlak prudko zmení, ako napríklad s príchodom rázovej vlny zo solárnej erupcie, magnetické pole Zeme ako odpoveď zmení svoj tvar. To ako následok dynamo efektu spôsobí vznik silných elektrických prúdov postupujúcich po magnetických siločiarach Zeme, následkom čoho dochádza k tvoreniu rušení rádiových frekvencií [9].

2.2.5 Geomagnetické búrky

Geomagnetická búrka je rozsiahle narušenie zemskej magnetosféry, ktoré nastane pri výmene energie slnečného vetra do vesmírneho prostredia Zeme. Búrky sú následkom zmien v slnečnom vetre, ktorý mení prúdy, plazmy a polia v zemskej magnetosfére. Podmienky, ktoré prispievajú k vzniku búrky sú ustálené obdobia vysokých rýchlostí slnečného vetra a hlavne južná orientácia slnečného vetra, opačná ako smerovanie zemskeho poľa, na dennej strane magnetosféry. Najväčšie búrky, ktoré vznikajú z týchto podmienok sú spájané s výronmi koronálnej hmoty CME, kde miliardy ton plazmy s vlastným magnetickým poľom zo Slnka

dorazia k Zemi. Ďalšou možnou príčinou vzniku geomagnetickej búrky je vysokorýchlostný slnečný vietor (High-speed Solar Wind Stream – HSS). HSS vrazí do pomalšie pohybujúceho sa slnečného vetra pohybujúceho sa pred ním a vytvorí tzv. Corotating Interaction Region (CIR). Tieto oblasti sa spájajú so slabšími búrkami ako búrky spôsobené CME, ale často vedú do zemskej magnetosféry priniesť viac energie počas dlhšieho obdobia. Výsledkom búrok sú aj intenzívne prúdenia v magnetosfére, zmeny v radiačných pásoch a zmeny v ionosfére vrátane otepľovania ionosféry a vrstiev hornej atmosféry nazývanej termosféra [23,26].

Priebeh typickej geomagnetickej búrky môžeme vidieť na obrázku 2-5. Slnečná erupcia (Solar Flare) nastáva v čase 0 pričom na Zemi je zaznamenaných okolo 10 – 30 minút rušivých rázov typu I, II a III a zvýšeného šumu. Takmer okamžite ionizujúce žiarenie zvýši maximálnu použiteľnú frekvenciu. Približne 30 minút po výbuchu sa rušenie HF vráti do normálu. Krátko po dvoch dňoch dorazí rázová vlna, stlačí naše magnetické pole a vyvolá silnú geomagnetickú búrku. Hodnoty rušenia frekvencií HF okamžite narastú a v prípade extrémnych podmienok môže nastať úplný výpadok (blackout). Následne elektróny rázovej vlny vstúpia do atmosféry Zeme nad pólmi a spôsobia tzv. Polar Cap Absorption (PCA). Tá vyplýva z ionizácie vrstvy D polárnej ionosféry vysoko energetickými protónmi. Tento jav následne zapríčini výpadok rádiových frekvencií HF pre transpolárne kruhy a môže trvať niekoľko dní. Najbližší K-index bude vysoký, s hodnotami od 6 do 9, dostatočný na vyvolanie polárnej žiary. Silná geomagnetická búrka ($K > 6$) môže trvať od 12 do 24 hodín a po jej ustáti sa naše magnetické pole stane veľmi kľudným s nízkym rušením frekvencií HF [9, 17].



Obr. 2-5: Priebeh solárnej búrky [9]

2.2.6 Ionosférické búrky

Ionosférické búrky sú výsledkom pridanej energie slabo ionizovanej plazmy v ionosfére, ktorá sa nachádza od výšky 60 km. Vo väčšine prípadov sa odohrávajú spoločne s geomagnetickými búrkami kvôli blízkosti magnetosféry a ionosféry. V dôsledku ionosférickej búrky vznikajú silnejšie elektrické prúdy, magneto-hydrodynamická turbulencia a vlnová aktivita plazmy. Výsledkom elektrodynamiky je nehomogénne rozloženie plazmy, obzvlášť vo výške 350 km. Signály GNSS vychádzajúce z družíc vo výškach okolo 20 000 km prechádzajú touto narušenou vrstvou, ktorá môže počas ionosférickej búrky ovplyvniť amplitúdu a fázu signálu GNSS a tým znemožniť prijímaču sledovanie jednej alebo viacerých družíc. Strata schopnosti sledovať danú družicu môže mať za následok zníženie polohovej presnosti a v najhoršom prípade stratu funkcie celého systému GNSS. Nestálosť voľných elektrónov na trase signálu, celkový obsah elektrónov, spôsobuje zväčšenie meracej chyby a tým pádom aj polohové chyby prijímačov GNSS.

Frekvencia výskytu ionosférických búrok je tiež podobná geomagnetickým búrkam, avšak s jednou dôležitou výnimkou. Oblasť ionosféry v blízkosti rovníka, približne 20° zemepisnej šírky na každú stranu magnetického rovníka môže byť výrazne narušená v čase po západe Slnka aj pri absencii geomagnetickej búrky. Vnútorne procesy Zeme vyvolávajú elektrónové výrony stúpajúce od rovníka a padajúce na vyšších zemepisných šírkach. V ionosférickej elektrónovej hustote sa môžu po západe Slnka tvoriť rozsiahle uvoľňovania, vytvárajúce silné priestorové gradienty v rozložení ionosféry. Pridružené nestability spôsobujú rýchle zmeny v amplitúde a fáze signálu GNSS, čo môže výrazne ovplyvniť lietadlá využívajúce systémy GNSS pre navigáciu založenú na RNP [57].

2.2.7 K a A indikátory

Pomocou magnetometrov sa na Zemi merajú podmienky nášho magnetického poľa. Množstvo pohybu je sprimerované a vydávané NOAA každé tri hodiny ako tzv. K-index.

K-index, alebo indikátor, môže nadobúdať hodnoty od 0 do 9, pričom 0 reprezentuje kludné podmienky a 9 rušivé. K-index je následne sprimerovaný za obdobie 24 hodín a vytvorí A-index zobrazujúci celkové planetárne geomagnetické podmienky pre deň v UTC. A-index dosahuje hodnôt od 0 do 20 pre kludné podmienky a až do hodnoty 400 pri extrémnych podmienkach [9]. V tabuľke 2-1 môžeme vidieť hodnoty K a A indikátorov, ich podmienky a rušenie HF v týchto podmienkach.

Tabuľka 2-1: Geomagnetické indikátory a podmienky [9]

	K-index	A-index	Geomagnetické podmienky	Rušenie HF	Polárna žiara
Normálny stav	0	0-2	Veľmi kľudné	S1-S2	Žiadna
	1	3-5	Kľudné	S1-S2	Žiadna
	2	6-9	Kľudné	S1-S2	Veľmi slabá
	3	12-19	Nestále	S2-S3	Veľmi slabá
	4	22-32	Aktívne	S2-S3	Slabá
Solárna búrka	5	39-56	Slabá búrka	S4-S6	Silná
	6	67-94	Silná búrka	S6-S9	Veľmi silná
	7	111-154	Veľmi silná búrka	S9+	Veľmi silná
	8	179-236	Veľmi silná búrka	Výpadok	Extrémna
	9	300-400	Extrémna búrka	Výpadok	Extrémna

2.2.8 Polárna žiara

Polárna žiara, alebo aurora, už niekoľko tisícročí priťahuje pozornosť obyvateľov našej planéty. Polárna žiara je ďalším z dôsledkov slnečného cyklu, slnečných erupcií a slnečného vetra. Po erupcii na Slnku prúdia častice vysokou rýchlosťou smerom k Zemi, kde narazia do magnetického poľa Zeme. To im nedovolí prejsť až k zemskému povrchu ale odrazí ich smerom k pólom. Magnetické pole nekopíruje presný tvar Zeme, ale je ovplyvnené prúdením slnečného vetra, ako bolo vysvetlené v kapitole o slnečnom vetre. V tomto momente nastáva tzv. denná aurora na dennej časti Zeme. Na magnetické pole následne naďalej pôsobí slnečný vietor unášajúci prúdy častíc a ohýba ho smerom od Zeme. Akonáhle sa pásy magnetického poľa opäť spoja, magnetické pásy „prasknú“ a častice zo slnečnej búrky začnú prúdiť pozdĺž zemských magnetických siločiar smerom k Zemi. Teraz nastáva aurora na nočnej časti Zeme, tzv. nočná aurora. Polárna žiara na severnej pologuli sa nazýva aurora borealis a na južnej aurora australis.

Najčastejšie farby spojené s týmto javom sú zelená, ružová, žltá, modrá, fialová a občas aj oranžová či žltá. Tieto farby vznikajú podľa reakcie častíc na rôzne plyny v atmosfére. Žltá, prípadne zelená farba vzniká pri reakcii častíc s kyslíkom, červená, fialová a modrá pri reakcii s dusíkom. Farby sú ovplyvnené aj nadmorskou výškou. Zelené farby sa objavujú do výšok približne 240 km, červené nad 240 km, modré do 100 km výšky a fialové nad 100 km.

Sledovať predpoveď polárnej žiary je možné vďaka rôznym vesmírnym agentúram. Táto predpoveď sa zakladá na aktuálnych dátach solárneho vetra a medziplanetárnom magnetickom poli [27].



Obr. 2-6: Aurora borealis [28]

3 Vplyv vesmírneho počasia v letectve

Vesmírne počasia ovplyvňuje aj šírenie vln v pásme krátkych vln, vysokej frekvencie, HF 3 – 30 MHz. Zmeny hustoty a štruktúry ionosféry dokážu zmeniť dráhu signálu vln HF alebo ho úplne zastaviť. Tieto frekvencie sú využívané amatérskymi rádiovými operátormi, no čo je omnoho dôležitejšie, využívajú sa aj v letectve [18]. Frekvenčné pásmo HF je, aj napriek stále viac rozšírenému pokrytiu signálu z družíc GNSS, dôležité najmä pri transatlantických letoch, kde na komunikáciu nedostačuje bežne používané pásmo VHF. S frekvenciou od 3 do 30 MHz a vlnovou dĺžkou 100 až 10 metrov je možné dosiahnuť vzdialenosti omnoho väčšie ako v pásme VHF.

S vesmírnym počasím sa stretáme aj v predpise L-3 Meteorologie, kde sa nachádza kapitola „Centra pro kosmické počasí“ (SWXC). V tomto predpise sa píše o povinnostiach zmluvného štátu, ktorý je zodpovedný za SWXC, sledovať javy kozmického počasia vo svojej oblasti zodpovednosti a poskytovať informačné správy o nich. Tieto centrá majú za úlohu vykonávať pozemné, palubné a kozmické sledovania, ak je to možné predpovedať výskyt javov kozmického počasia, ktoré vplyvajú na krátkovlnné rádiové spojenia, družicovú komunikáciu, navigačné systémy založené na GNSS a vystavenie účinkom žiarenia v letových hladinách. Centrá vydávajú a ďalej posúvajú informačné správy týkajúce sa rozsahu, závažnosti, dĺžky trvania jednotlivých javov vesmírneho počasia iným SWXC, medzinárodným databankám OPMET, poskytovateľom služieb NOTAM a internetovým službám leteckej pevnej služby. SWXC musí fungovať 24 hodín denne a v prípade prerušenia prevádzky musí jeho funkciu prevziať iné SWXC alebo centrum určené príslušným štátom [39].

3.1 Slnčná aktivita a šírenie vln HF

Astronómovia a fyzici vedeli už od 20. rokov 20. storočia, že šírenie vln na frekvenciách HF a slnečná aktivita spolu nejako súvisia, no kvôli chýbajúcim pozorovacím dátam ostalo rušenie frekvencií HF dlhú dobu len vedeckou teóriou. Na dôkaz toho, že práve Slnko je zdrojom rušenia vln týchto frekvencií, sa muselo čakať pomerne dlhú dobu. Oficiálne potvrdená bola až v 70. rokoch pri misiách medziplanetárnych kozmických sond Voyager a orbitálnej vesmírnej stanice Skylab. Odvtedy monitoruje slnečnú aktivitu a naše geomagnetické pole v reálnom čase množstvo družíc a pozemných zariadení.

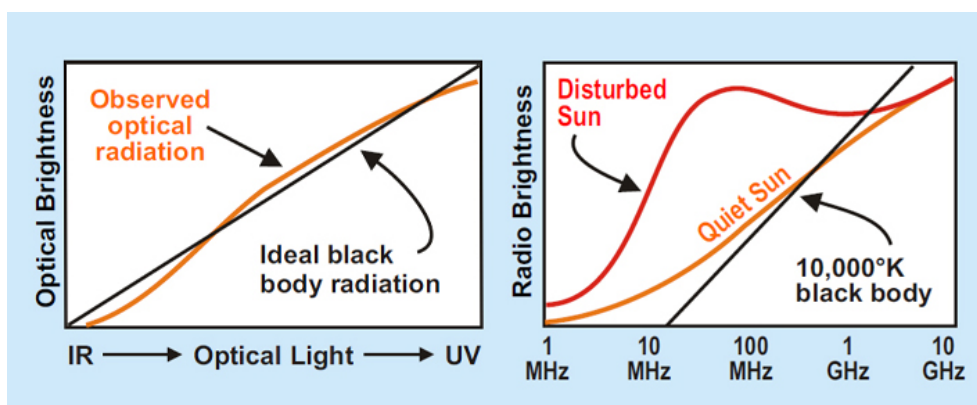
Existuje viacero javov vesmírneho počasia, ktoré môžu mať dopad na komunikáciu vo frekvenčnom pásme HF. V typickej postupnosti vesmírnych búrok sú prvé dopady citeľné už počas solárnej erupcie. Slnčné lúče preniknú zo Slnka do spodnej časti ionosféry (do asi 80 km), kde fotóny lúčov ionizujú atmosféru a vytvoria rozšírenie ionosférickej vrstvy D. Táto

rozšírená vrstva pôsobí ako odražač rádiových vln niektorých frekvencií a zároveň ako pohlcovač vln iných frekvencií. Výpadok šírenia rádiových vln spojený so solárnymi erupciami nastáva cez deň a je najintenzívnejší keď sa Slnko nachádza presne nad danou oblasťou.

Ďalším druhom vesmírneho počasia, ktorý taktiež môže narušiť komunikáciu v pásme HF je radiačná búrka spôsobená energetickými slnečnými protónmi. Tieto protóny sú priťahované zemským magnetickým poľom a narážajú do hornej vrstvy atmosféry v blízkosti pólův. Vysokou rýchlosťou pohybujúce sa protóny majú podobný efekt ako fotónové lúče a vytvárajú rozšírenie vrstvy D, a teda blokujú komunikáciu v pásme HF vo vyšších zemepisných šírkach. Počas polárnej žiary môžu zrážajúce sa elektróny posilniť ďalšie vrstvy ionosféry a mať podobný rušiaci dopad na rádiovú komunikáciu. Tento dej nastáva hlavne v polárnych regiónoch nočnej časti Zeme, kde je polárna žiara najčastejšia a najintenzívnejšia [18].

3.1.1 Solárna radiácia

Ak by Slnko pôsobilo len ako zdroj tepelnej energie, prijatá jasnosť by priamo závisela na frekvencii. Od ultrafialového a viditeľného smerom nadol do rádiového spektra. Tento jav popisuje Planckov vyžarovací zákon, ktorý vyjadruje závislosť intenzity žiarenia na frekvencii. Ako môžeme vidieť na obrázku 3-1, optické pozorovania (Observed optical radiation) na rôznych vlnových dĺžkach kopírujú žiarenie čierneho telesa (Ideal black body radiation), čo potvrdzuje, že viditeľné a optické vlnové dĺžky zo Slnka sú vytvorené termálnym procesom. Avšak rádiová energia zo Slnka žiarenie čierneho telesa nekopíruje, čo naopak potvrdzuje, že slnečná rádiová energia je vytvorená inými ako tepelnými procesmi [9].



Obr. 3-1: Optické a rádiové vyžarovanie zo Slnka [9]

3.1.2 Slnečný tok

Hlboko v jadre Slnka sa, obrazne povedané, nachádza obrovský termonukleárny reaktor vytvárajúci energiu na veľmi krátkych vlnách (gamma a röntgenové žiarenie). Ako sa táto energia dostáva na povrch, predlžuje svoju vlnovú dĺžku na vlnovú dĺžku rádiových vln, čím sa

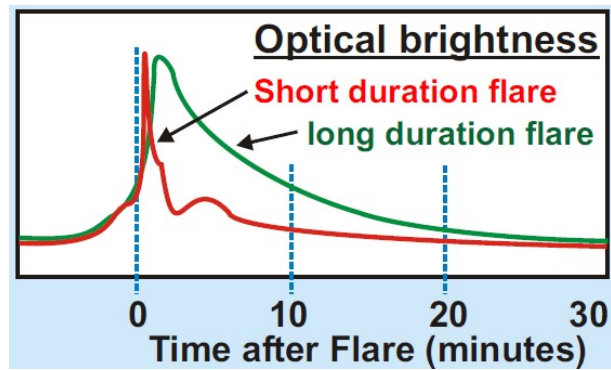
stáva prvotným vyžarovaním Slnka, nazývaným slnečný tok (solar flux – SF). Slnečný tok je meraný na viacerých miestach na Zemi a hlásenia o ňom sú vydávané prostredníctvom Národného úradu pre oceán a atmosféru NOAA. Slnečný tok je nízky pri kľudnom Slnku ($SF < 100$) a zvýšený pri aktívnom Slnku ($SF > 100$). Je to hodnota ionizujúceho žiarenia zo Slnka a indikátor elektrónovej hustoty našej ionosféry. Čím väčšia je táto elektrónová hustota, tým viac signálu HF sa na ionosfére odrazí a tým je vyššia maximálna použiteľná frekvencia. Je meraný na frekvencii 2880 MHz, ktorá zvyčajne nie je ovplyvnená slnečnými erupciami. Pri veľkej slnečnej erupcii sa frekvencia slnečného toku zvýši, čo ukazuje, že frekvencia 2880 MHz bola kontaminovaná slnečnou erupciou. Znamená to, že Zem bola vystavená zvýšenému ionizačnému žiareniu [9].

3.1.3 Ionizácia

Denná ionizačná radiácia zo Slnka odtrháva elektróny od ich hostiteľských molekúl v hornej atmosfére. Tieto voľné elektróny zvyšujú hustotu ionosféry a delia sa do vrstiev nazývaných D, E, F. Signály HF sa odrážajú od vrstiev E a F naspäť k Zemi vďaka čomu môže byť dosiahnutá komunikácia na dlhé vzdialenosti. Tento jav sa nazýva skip propagation, teda skokové šírenie. Signály HF musia prejsť vrstvou D, ktorá je najbližšia pri povrchu Zeme. Je taktiež nazývaná ako absorpčná vrstva, pretože časť signálu HF bude vrstvou D pohltená. V noci slnečné žiarenie ustáva a voľné elektróny sa opäť spoja s hostiteľskými molekulami. Vrstva D úplne zmizne, a teda nedochádza k žiadnej strate signálu. Vrstvy E a F sa spoja do jednej vrstvy, ale signály HF sa od tejto vrstvy aj naďalej odrážajú. Táto spojená vrstva má menšiu elektrónovú hustotu ako denné hodnoty, čím znižuje hodnotu maximálnej použiteľnej frekvencie. Astronómovia tieto ionizačné vrstvy nazývajú plazmové vrstvy a najnižšiu frekvenciu, ktorá cez nich prejde do vesmíru, plazmovou frekvenciou. Plazmová frekvencia a maximálna použiteľná frekvencia je jedno a to isté číslo pomenované z dvoch rôznych pohľadov. Počas aktívneho Slnka je zemská plazmová frekvencia asi 18 MHz v noci, 30 a viac MHz cez deň a počas kľudného Slnka sa pohybuje v hodnotách od 10 MHz v noci do 20 MHz cez deň. Plazmová frekvencia Slnka nadobúda hodnoty od 300 do 1000 MHz. Takto silné žiarenie opustí Slnko len počas solárnej explózie a nazýva sa slnečná búrka [9].

3.1.4 Optické vyžarovanie

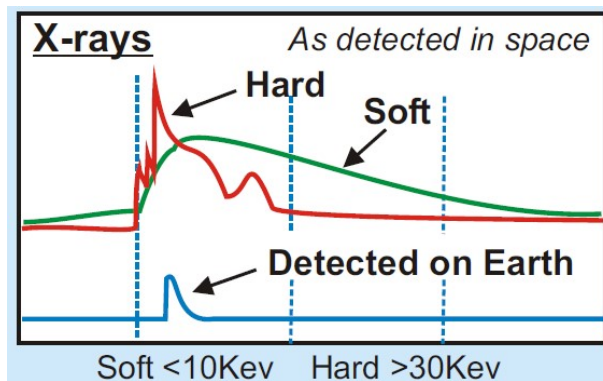
Žiarenie v optickom spektre po solárnej erupcii je zobrazené na obrázku 3-2 pre typickú krátkodobú erupciu (Short duration flare) a menej častú dlhodobú erupciu (Long duration flare). Toto optické vyžarovanie je ťažko pozorovateľné, keďže povrch Slnka je veľmi jasný. Preto sa erupcie sledujú pomocou röntgenového žiarenia detekovaného na palube družíc GEOS, LASCO, SOHO a nie opticky [9].



Obr. 3-2: Optické vyžarovanie krátkodobej a dlhodobej erupcie [9]

3.1.5 Žiarenie gamma a röntgenové žiarenie zo solárnej explózie

Na obrázku 3-3 môžeme vidieť rádiové vlny uvoľnené zo solárnej erupcie. Takzvané tvrdé röntgenové žiarenie (hard x-rays) s hodnotou vyššou ako 30 keV je ionizujúce žiarenie narážajúce do zemskej atmosféry. Toto tvrdé röntgenové žiarenie trvá len jednu alebo dve minúty, zatiaľ čo mäkké (soft x-rays), môže pretrvať desiatky minút až hodinu, pričom po celú dobu je Zem zasahovaná ionizujúcim žiarením. Röntgenové žiarenie z veľmi veľkých erupcií môžu prejsť našou atmosférou až na zem, čo spôsobí silnú ionizáciu vrstvy D a výpadok prenosu signálu na frekvencii HF na desiatky minút po tejto erupcii. Takáto udalosť je ale veľmi ojedinelá a stane sa pár krát za celý slnečný cyklus [9].



Obr. 3-3: Röntgenové žiarenie po solárnej erupcii [9]

3.1.6 Rádiové žiarenie zo solárnej erupcie

Mikrovlnné žiarenie zo solárnej erupcie je podobné ionizujúcemu žiareniu. Môže produkovať silné rádiové energie po dobu niekoľkých minút po erupcii, ktoré môžu narušiť prenos družicového signálu a VHF komunikácie. Na mapovanie štruktúr slnečnej erupcie využívajú rádiové teleskopy frekvencie 2 - 10 GHz. Taktiež je mapovaná spektrálna čiara vodíka na frekvencii 1,4 GHz, ktorá je zaujímavá skôr z vedeckého hľadiska ako preto, že by rušila rádiové vlny. Rádiové emisie z erupcie môžu spôsobiť zhluky šumu, bzukot a občasne aj

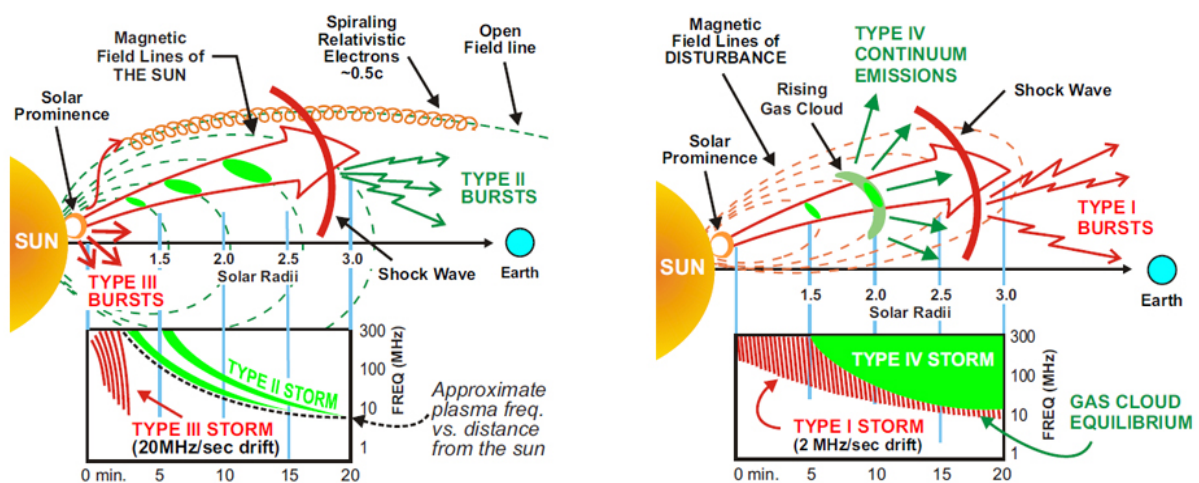
dočasný výpadok na frekvencii HF. Po asi 30 minútach po solárnej erupcii sa šum a šírenie vráti do normálu [9].

3.1.7 Rádiové žiarenie spôsobené elektrónmi

Prvé rádiové emisie, ktoré sa dostanú k Zemi po solárnej erupcii sú búrky typu III vznikajúce prvých päť až šesť minút po erupcii. Sú to relativistické elektróny uvoľnené výbuchom, ktoré postupujú cez magnetické pole Slnka. Rádiové emisie začínajú na približne 300 MHz a vo frekvencii upadajú asi 20 MHz za sekundu. Niektoré z týchto elektrónov migrujú a pohybujú sa pozdĺž otvorených siločiar špirálovým pohybom stále približne rýchlosťou svetla vytvárajúc šum kontinua od 10 do 300 MHz [9].

3.1.8 Rádiové žiarenie spôsobené rázovými vlnami

Ako rázová vlna postupuje cez magnetické siločiar Slnka, vznikajú vďaka dynamo efektu nazývanému búrka typu II, elektrické prúdy a rádiové žiarenia. Frekvencia slnečnej plazmy sa stáva nižšou na dlhších vzdialenostiach. Preto je na Zemi počuť výbuchy stále na nižšej a nižšej frekvencii ako rázová vlna cestuje ďalej od Slnka. Na základe tohto útlmu, pomocou merania času, za ktorý sa výbuch dostane z vyššej frekvencie na nižšiu, je možné určiť rýchlosť šírenia rázovej vlny. NOAA využíva tieto hodnoty na približné určenie času kedy rázová vlna dôjde k Zemi a akého bude rozsahu geomagnetická búrka. Rázová vlna postupuje cez silné magnetické siločiar erupcie, kde sú elektróny a častice zachytené v uzavretých siločiarach. To taktiež vytvára rádiové žiarenie nazývané búrka typu I. V tomto prípade je útlm frekvencie asi 2 MHz za sekundu a búrka typu I môže pretrvať 20 – 30 minút po väčšej solárnej erupcii [9].



Obr. 3-4: Rádiové žiarenie na základe interakcie s magnetickými siločiarami Slnka a magnetickými siločiarami solárnej erupcie [9]

3.1.9 Rádiové vyžarovanie spôsobené plynovým oblakom

Za rázovou vlnou sa nachádza plynový oblak častíc z výbuchu, spôsobujúci šum nazývaný kontinuová búrka typu IV. Šum začína na asi 1 GHz a čím vyššie stúpa oblak, tým je frekvencia nižšia. Tieto častice stúpajú až pokiaľ sa nevyrovná tlak plynového oblaku s tlakom slnečnej atmosféry. V tomto momente, asi 15 – 30 minút po erupcii, sa častice stanú stacionárnymi a vytvárajú šum na frekvencii 10 – 20 MHz. Búrka typu IV môže zotrvať niekoľko hodín po výbuchu a zvyšuje celkový šum na frekvencii HF [9].

3.2 Vplyv vesmírneho počasia na systémy GNSS

Používanie družicových navigačných systémov ako GPS či Galileo v posledných rokoch dramaticky vzrástlo v letectve, ale aj v bežnom živote. Prijímače signálu GNSS sa nachádzajú v každom novom smart zariadení, automobile a ďalších dopravných prostriedkoch. Modernejšie dvojfrekvenčné prijímače GNSS sú využívané v poľnohospodárstve, stavebníctve, prieskume, vymeriavaní a ďalších aplikáciách potrebných pre každodenný život spoločnosti, v letectve sa však stále väčšinou využívajú prijímače jednofrekvenčné.

Existuje viacero spôsobov ako vesmírne počasia dokáže ovplyvniť fungovanie systémov GNSS. Signály družicových navigačných systémov musia precestovať z družíc k prijímaču cez zemskú ionosféru. Ionosféra je atmosférická vrstva siahajúca od výšky 50 do 2000 km nad Zemou. Nabitá plazma v ionosfére láme trajektóriu rádiového signálu GNSS podobne ako šošovka láme trajektóriu svetla. Ak by vesmírne počasia neexistovalo, stačilo by vytvoriť model, pomocou ktorého by sa dala vypočítať presnosť systémov GNSS, a ktorý by slúžil na kompenzáciu ionosférickej chyby. Avšak realita je iná, vesmírne počasia je premenlivé, a teda dochádza k chybám v meraní polohy prijímačov družicových navigačných systémov. V kludných podmienkach sú jednofrekvenčné prijímače schopné pracovať s presnosťou menšou ako jeden meter. Počas veľmi silných solárnych búrok sa dokáže chyba vyšplhať až na niekoľko desiatok metrov. Dvojfrekvenčné prijímače sú ešte presnejšie a v kludných podmienkach môžu určiť polohu s presnosťou na centimetre. V tomto prípade sú využité dva rôzne signály GNSS, vďaka ktorým je presnejšie určená charakteristika ionosféry a ionosférická chyba je pri určovaní polohy minimalizovaná. Pri výraznej slnečnej aktivite a solárnej búrke, kedy je ionosféra príliš narušená, sa prijímač nedokáže naviazať na signál z družice a informácia o polohe sa stáva nepresnou.

Geomagnetické búrky výrazne narušujú ionosféru. Prúdy a energia z geomagnetickej búrky posilňujú ionosféru a zvyšujú celkový počet elektrónov v nej. Systémy GNSS nie sú schopné správne vymodelovať túto dynamickú zmenu, a vznikajú chyby, ktoré sa dostávajú do polohových výpočtov. Táto situácia nastáva hlavne vo vyšších zemepisných šírkach, no veľké

slnéčné búrky môžu tento problém spôsobiť aj v stredných šírkach. V blízkosti magnetického rovníka na Zemi sa nachádzajú systémy prúdov a elektrické polia, ktoré vytvárajú nestabilitu v ionosfére. Tá je najvýraznejšia tesne po súmraku, kedy nestálosti malého rozsahu alebo bubliny spôsobujú scintiláciu signálu GNSS podobne ako voda naruší trajektóriu svetelného lúča pri prenikaní cez ňu. V blízkosti rovníka potom dvojfrekvenčné GNSS prijímače často strácajú svoju schopnosť zamerania kvôli ionosférickej scintilácii. Ionosférická scintilácia avšak nie je spojená so žiadnou slnečnou búrkou. Je to časť prirodzeného denného cyklu rovníkovej ionosféry [19].

3.2.1 Geomagnetické búrky a systémy GNSS

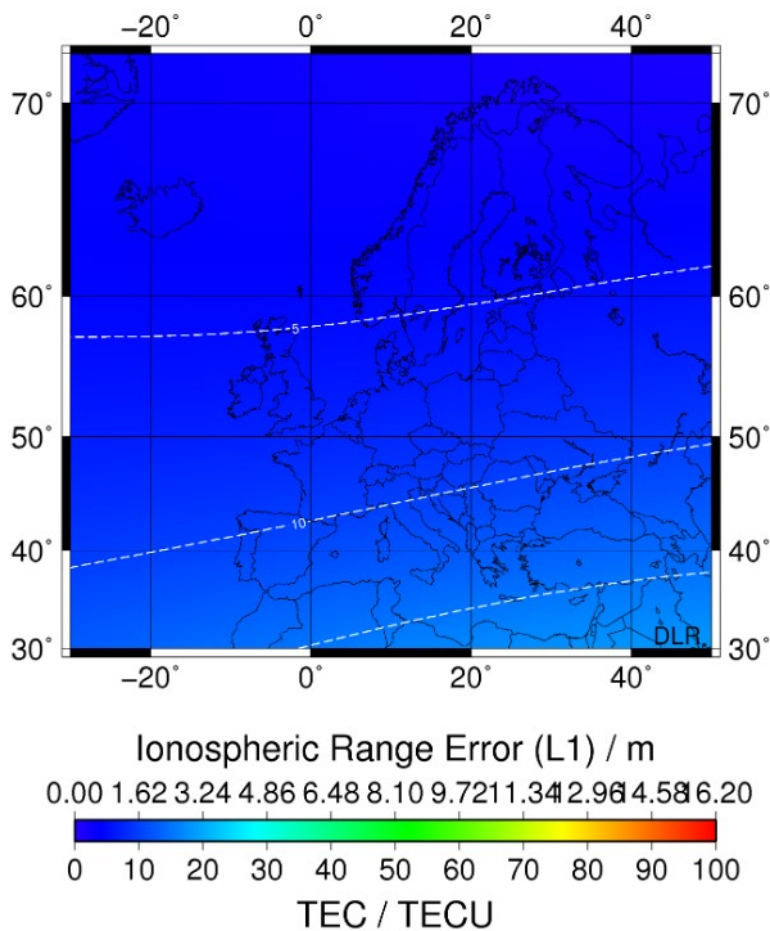
Podobne ako na systémy vo frekvenčnom pásme HF majú geomagnetické búrky vplyv aj na systémy GNSS. Ako bolo popísané v predchádzajúcich kapitolách, geomagnetická búrka je rozsiahle narušenie zemskej magnetosféry, ktoré nastane pri výmene energie slnečného vetra do vesmírneho prostredia Zeme. Búrky sú následkom zmien v slnečnom vetre, ktorý mení prúdy, plazmy a polia v zemskej magnetosfére. Najrozsiahlejšie geomagnetické búrky sú spojené s výronom koronálnej hmoty, počas ktorých miliardy ton plazmy zo Slnka so svojim magnetickým poľom dorazia k Zemi. Tento proces zvyčajne trvá niekoľko dní, no v prípade extrémnych búrok bolo pozorované dosiahnutie Zeme v priebehu 18 hodín. Ďalšou možnou príčinou vzniku geomagnetickej búrky je podobne ako pri frekvenčnom pásme HF, vysokorýchlostný slnečný vietor (High-speed Solar Wind Stream – HSS), ktorý vrazí do pomalšie pohybujúceho sa slnečného vetra pohybujúceho sa pred ním a vytvorí tzv. Corotating Interaction Region (CIR). Tieto oblasti sa spájajú so slabšími búrkami ako búrky spôsobené CME, ale často vedú do zemskej magnetosféry priniesť viac energie počas dlhšieho časového obdobia. Búrky zapríčiňujú aj silné prúdy v magnetosfére, zmeny na radičných pásoch a zmeny v ionosfére. Prstenec západného prúdu vo vesmíre okolo Zeme spôsobuje magnetické rušenia na Zemi. Ďalšie prúdy vznikajúce v magnetosfére, ktoré nasledujú magnetické pole, sa spájajú so silnými prúdmi v ionosfére polárnych žiar. Prúdy polárnych žiar nazývané aj aurorálne elektrojety taktiež produkujú výrazné magnetické rušenia. Spoločne sú všetky tieto prúdy a rušenia, ktoré sú v ich dôsledku spôsobené využívané na určenie indexu Kp. Počas geomagnetických búrok častice v ionosfére ako aj energetické častice, ktoré sa do ionosféry dostanú, pridávajú energiu vo forme tepla, ktorá môže zvýšiť hustotu a rozloženie hustoty v hornej atmosfére a spôsobiť pridaný odpor pre družice na nízkych orbitách. Lokálne otepľovanie môže taktiež zapríčiniť horizontálne zmeny v hustote, ktoré môžu meniť trasu rádiového signálu a vytvoriť chyby v polohovej informácii systémov GNSS [19].

3.2.2 Ionosférická scintilácia

Ionosférická scintilácia je prudká zmena rádiovkej vlny spôsobená malými štruktúrami v ionosfére. Výrazné scintilačné podmienky môžu zabrániť prijímačom GNSS zachytiť sa na signál a znemožniť tak vypočítať polohu prijímača. Slabšia scintilácia môže znížiť presnosť a spoľahlivosť polohových výsledkov. Scintilácia rádiových vln má dopad na výkon a fázu rádiového signálu. Je spôsobená štruktúrami malých rozmerov (desiatky metrov až desiatky kilometrov) v ionosférickej elektrónovej hustote pozdĺž trasy signálu a je výsledkom odrazených a/alebo rozptýlených vln. Scintilácia sa zvyčajne vyhodnocuje pomocou dvoch indexov S4 a σ_f . Index S4 sa využíva pre amplitúdovú scintiláciu a index σ_f (sigma-fí) pre fázovú scintiláciu. Tieto indexy odrážajú premenlivosť signálu počas určitého časového obdobia, zvyčajne jednej minúty. Ionosférická scintilácia prevláda viac vo vysokých a nízkych zemepisných šírkach a stredné šírky zasahuje omnoho menej často. Scintilácia je funkciou miestneho času, ročného obdobia, geomagnetickej aktivity a slnečného cyklu, ale taktiež je ovplyvnená vlnami šírenými z nižšej atmosféry [19].

3.2.3 Celkový obsah elektrónov

Celkový obsah elektrónov (Total Electron Content), TEC je celkový počet elektrónov vyskytujúcich sa pozdĺž trasy medzi rádiovým vysielačom a prijímačom. Rádiové vlny sú ovplyvňované prítomnosťou elektrónov. Čím viac elektrónov sa nachádza na trase rádiovkej vlny, tým viac bude rádiový signál ovplyvnený. Pre komunikáciu zem – družica a družicovú navigáciu je celkový obsah elektrónov dôležitým parametrom na sledovanie kvôli možným dopadom vesmírneho počasia. TEC sa meria v elektrónoch na štvorcový meter. Podľa dohody jedna jednotka TEC – TECU (Total Electron Content Unit) je 10^{16} elektrónov na meter štvorcový. Vertikálne hodnoty TEC v zemskej ionosfére môžu kolísať od pár do niekoľkých stoviek TECU. Celkový obsah elektrónov v ionosfére je premenlivý podľa zmeny slnečného extrémneho ultrafialového žiarenia, geomagnetických búrok a atmosférických vln šíriacich sa z nižších vrstiev atmosféry. TEC teda závisí na miestnom čase, zemepisnej šírke, zemepisnej dĺžke, ročnom období, geomagnetických podmienkach, slnečnom cykle a slnečnej aktivite a tiež na podmienkach v troposfére. Šírenie rádiových vln je ovplyvňované ionosférou. Rýchlosť rádiovkej vlny sa mení keď signál prechádza elektrónmi v ionosfére. Celkové oneskorenie spôsobené rádiovými vlnami šíriacimi sa cez ionosféru závisí ako na frekvencii rádiovkej vlny, tak na celkovom obsahu elektrónov medzi vysielačom a prijímačom. Na niektorých frekvenciách rádiová vlna prechádza cez ionosféru, na iných je rádiová vlna ionosférou odrazená. Zmena trasy a rýchlosti rádiovkej vlny v ionosfére má rozsiahly dopad na presnosť systémov družicovej navigácie. Odhliadnuc od zmien v ionosfére, TEC môže spôsobiť niekoľko desiatok metrové chyby vo výpočtoch polohy [19].



Obr. 3-5: TEC v oblasti Európy 10.7.2020 o 14:00 UTC [31]

3.2.4 Atmosférické zoslabenie a zoslabenie vplyvom dažďa

Atmosférické zoslabenie je spôsobené útlmom spôsobeným kyslíkom v pásme 1 – 2 GHz. Je veľmi slabé, vplyv vodnej pary, dažďa a tlmenie spôsobené dusíkom sú v pásme L zanedbateľné, na zenite je to približne 0,035 dB a v elevačnom uhle 5° asi 0,38 dB. Zoslabenie spôsobené dažďom je taktiež veľmi slabé a dá sa považovať za zanedbateľné. Aj pri hustom daždi (100mm/h) je menšie ako 0,01 dB/km [33].

3.2.5 Troposférické oneskorenie

Troposféra je atmosférická vrstva nachádzajúca sa medzi zemským povrchom a výškou približne 15 km. Vplyv troposféry na signál GNSS sa prejavuje ako pridané oneskorenie v meraní signálu cestujúceho z družice k prijímaču. Toto oneskorenie závisí na teplote, tlaku, vlhkosti ale aj polohe prijímača. Hlavnou vlastnosťou troposféry je, že je to nedisperzné médium pre elektromagnetické vlny až do 15 GHz, a teda troposférický efekt nie je frekvenčne závislý pre signály GNSS. Tento jav z tohto dôvodu nemôže byť odstránený pomocou kombinácie dvojfrekvenčných meraní ako to je pri ionosfére. Jediný spôsob ako ho odstrániť,

je pomocou využitia modelov alebo určením chyby pozorovacími dátami. Najviac, asi 90% troposférického oneskorenia je ale spôsobené hydrostatickým komponentom, ktorý je možné pomerne spoľahlivo predpovedať. Oneskorenie zapríčinené hydrostatickým komponentom je spôsobené prítomnosťou suchých plynov v troposfére (78% N₂, 21% O₂, 0.9% Ar...). Ich vplyv sa mení s lokálnou teplotou a atmosférickým tlakom a ich premenlivosť je menej ako 1 % za niekoľko hodín. Chyba spôsobená týmto javom je približne 2,3 m v smere zenitu a asi 10 m v inom smere. Oneskorenie zapríčinené vlhkým komponentom je spôsobené vodnou parou a kondenzovanou vodou vo forme oblakov, a teda závisí na aktuálnych meteorologických podmienkach. Oneskorenie je v tomto prípade malé, len niekoľko desiatok centimetrov, no na rozdiel od hydrostatických komponentov sa vlhké menia častejšie, menej predvídateľne, kvôli čomu je ťažšie ich modelovať [33].

Troposférický model používaný systémami SBAS (WAAS, EGNOS) je nasledovný:

$$TC_i = -(d_{hyd} + d_{wet})m(El_i), \quad (3.1)$$

kde d_{hyd} je odhadovaná hodnota meracieho oneskorenia spôsobeného atmosférickými plynmi v zenite v metroch a d_{wet} odhadovaná hodnota meracieho oneskorenia spôsobeného vodnou parou v zenite vyjadrená taktiež v metroch. Hodnota $m(El_i)$ vyjadruje zobrazovaciu funkciu na prirovnanie oneskorenia aktuálnemu elevačnému uhlu družice (El_i). Výpočet d_{hyd} a d_{wet} závisí na piatich meteorologických parametroch: tlaku [P (mbar)], teplote [T (K)], tlaku vodnej pary [e (mbar)], teplotnom gradiente [β (K/m)], gradiente vodnej pary (λ (bezrozmerný)). Hodnoty všetkých parametrov použiteľných na danú zemepisnú šírku (latitude) prijímača a deň v roku sa vypočítajú z priemerných a sezónnych hodnôt.

Zobrazovacia funkcia troposféry $m(El)$ pre elevačné uhly väčšie alebo rovné 4° sa vypočíta

pomocou vzorca [32]:

$$m(El_i) = \frac{1,001}{\sqrt{0,002001 + \sin^2(El_i)}}. \quad (3.2)$$

Average					
Latitude (°)	P_0 (mbar)	T_0 (K)	e_0 (mbar)	β_0 (K/m)	λ_0
15° or less	1013.25	299.65	26.31	6.30e-3	2.77
30	1017.25	294.15	21.79	6.05e-3	3.15
45	1015.75	283.15	11.66	5.58e-3	2.57
60	1011.75	272.15	6.78	5.39e-3	1.81
75° or greater	1013.00	263.65	4.11	4.53e-3	1.55
Seasonal Variation					
Latitude (°)	ΔP (mbar)	ΔT (K)	Δe (mbar)	$\Delta \beta$ (K/m)	$\Delta \lambda$
15° or less	0.00	0.00	0.00	0.00e-3	0.00
30	-3.75	7.00	8.85	0.25e-3	0.33
45	-2.25	11.00	7.24	0.32e-3	0.46
60	-1.75	15.00	5.36	0.81e-3	0.74
75° or greater	-0.50	14.50	3.39	0.62e-3	0.30

Obr. 3-6: Priemerné sezónne hodnoty na výpočet troposférického oneskorenia [32]

3.2.6 Troposférická scintilácia

Troposférická scintilácia je spôsobená nerovnosťami a turbulenciou v indexe lomu atmosféry vo výške do niekoľkých kilometrov nad zemským povrchom. Cesty šírenia signálu troposférou sú ovplyvnené kombináciou náhodných pohlcovaní a rozptýlení z kontinua ciest signálu, ktoré spôsobujú náhodné fázové a amplitúdové scintilácie v prijatom tvare vlny. Troposférická scintilácia sa mení s časom a je závislá na frekvencii prijímača užívateľa, elevačnom uhle a meteorologických podmienkach, obzvlášť hustých oblakov. V pásme L je tento jav zvyčajne slabý na pár výnimiek v prípade malého elevačného uhla. Pri uhle 2° môže byť približne 2 dB, pri 5° 0,9 dB a pri elevačnom uhle 20° približne 0,3 dB [34].

4 Ionosférické korekcie systémov GNSS

Zemská atmosféra spôsobuje zmeny rýchlosti a smeru šírenia rádiového signálu. Tento jav sa nazýva refrakcia. Tieto zmeny majú vplyv aj na čas prechodu signálu od vysielača k prijímaču, základnú jednotku merania v systémoch GNSS. Zmeny merania času môžu spôsobiť chybu v nameranej pseudovzdialenosti až 60 metrov. Z tohto dôvodu je nutné vytvoriť matematický model, pomocou ktorého bude možné túto chybu kompenzovať a napraviť. Ionosféra je výsledkom extrémneho ultrafialového EUV a slnečného X žiarenia zo slnečného vyžarovania čiastočne ionizované prostredie. Rýchlosť šírenia elektromagnetického signálu GNSS v ionosfére závisí na jej elektrónovej hustote. Počas dňa sú neutrálne atómy ionizované slnečným vyžarovaním, čím sa vytvárajú voľné elektróny a ióny. Počas noci prevláda proces rekombinácie, kedy sa voľné elektróny spoja s iónmi a vytvoria tak neutrálne častice, výsledkom čoho je zníženie elektrónovej hustoty. Elektrónová hustota v ionosfére sa mení s výškou, pričom maximum dosahuje približne vo výške 300 – 500 km ($10^{11} - 10^{12} \text{ e}^-/\text{m}^3$) [35].

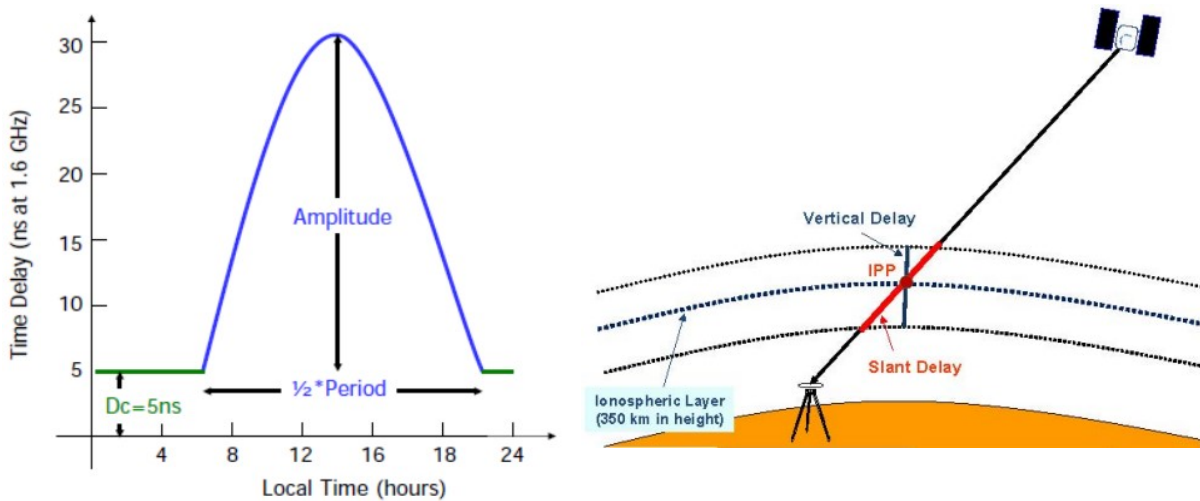
4.1 Jednofrekvenčné ionosférické modely

Jednofrekvenčné prijímače musia na odstránenie ionosférickej chyby použiť tzv. ionosférický model. Nakoľko sú ionosférické vplyvy veľmi premenné, je nutné periodické prispôbovanie parametrov. Systémy GPS, Galileo a BeiDou vysielajú tieto parametre prostredníctvom navigačného súboru vyslaného družicou, pričom sú denne aktualizované. Systém GLONASS ionosférický model nevysiela, ale na jeho korekcie môže byť použitý ktorýkoľvek model [35].

4.1.1 Klobucharov model

Klobucharov model bol navrhnutý aby minimalizoval výpočtovú zložitosť na strane užívateľa a jeho počítačové úložisko, pričom zachová minimum vysielaných koeficientov. Je založený na empirickom prístupe a zníženie chyby je odhadované na 50%. V navigačnej správe sú koeficienty vysielané v úvode správy pod názvom IONALPHA a IONBETA v druhej verzii RINEXu alebo GPSA, GPSB v tretej verzii. Klobucharov model je nezávislý na polohe užívateľa, keďže nie sú aplikované žiadne špecifické korekcie na špecifickú oblasť a ionosféra je modelovaná ako jedná vrstva vo výške 350 km. Podľa tohto modelu dochádza v noci ku konštantnému oneskoreniu 5 ns a funkcia $\frac{1}{2} \cos$ počas dňa s maximom o 14. hodine lokálneho času, ktorej amplitúda a perióda sú funkciami ôsmich parametrov vysielaných v navigačnej správe.

Na výpočet šikmého oneskorenia je potrebné vypočítať najprv bod IPP (Ionospheric Pierce Point), ktorý je priesečníkom priameho smeru vysielaného signálu s ionosférickou vrstvou vo výške 350 km. Následne je vypočítané vertikálne oneskorenie (vertical delay) v bode IPP a potom aj šikmé oneskorenie (slant delay) jeho vynásobením faktorom zakrivenia [35].



Obr. 4-1 a 4-2: kosínusová funkcia klobucharovho modelu a ilustrácia výpočtu šikmého oneskorenia [35]

Klobucharov algoritmus pre jednofrekvenčné prijímače sa za predpokladu známej približnej geodetickej zemepisnej šírky φ_u a zemepisnej dĺžky λ_u , elevačného uhla E , azimutu pozorovanej družice A a klobucharových koeficientov α_n a β_n vysielaných v navigačnej správe vypočíta nasledovne:

1. Vypočítame sklon zemskej osi

$$\psi = \frac{\pi}{2} - E - \arcsin\left(\frac{R_E}{R_E+h} \cos E\right) \quad (4.1)$$

2. Vypočítame zemepisnú šírku bodu IPP

$$\Phi_I = \arcsin(\sin \varphi_u \cos \psi + \cos \varphi_u \sin \psi \cos A) \quad (4.2)$$

3. Vypočítame zemepisnú dĺžku IPP

$$\lambda_I = \lambda_u + \frac{\psi \sin A}{\cos \Phi_I} \quad (4.3)$$

4. Zistíme geomagnetickú zemepisnú šírku bodu IPP

$$\Phi_m = \arcsin(\sin \Phi_I \sin \Phi_p + \cos \Phi_I \cos \Phi_p \cos(\lambda_I - \lambda_p)) \quad (4.4)$$

Pričom $\Phi_p = 78,3^\circ$, $\lambda_p = 291^\circ$ sú koordináty geomagnetického pólu

5. Zistíme lokálny čas v bode IPP

$$t = 43200 \frac{\lambda_I}{\pi} + t_{GPS} \quad (4.5)$$

Kde $0 \leq t < 86\,400$, a teda ak je $t \geq 86\,400$ odpočítame $86\,400$ a ak je $t < 0$ pripočítame $86\,400$.

6. Vypočítame amplitúdu ionosférického oneskorenia

$$A_I = \sum_{n=0}^3 \alpha_n (\Phi_m/\pi)^n \quad (4.6)$$

Ak je $A_I < 0$, potom $A_I = 0$.

7. Vypočítame periódu ionosférického oneskorenia

$$P_I = \sum_{n=0}^3 \beta_n (\Phi_m/\pi)^n \quad (4.7)$$

Ak je $P_I < 72\,000$, potom $P_I = 72\,000$.

8. Vypočítame fázu ionosférického oneskorenia

$$X_I = \frac{2\pi(t-50\,400)}{P_I} \quad (4.8)$$

9. Vypočítame faktor šikmosti

$$F = \left[1 - \left(\frac{R_E}{R_E+h} \cos E \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (4.9)$$

10. Vypočítame čas ionosférického oneskorenia

$$I_1 = \begin{cases} [5 \times 10^{-9} + A_I \cos X_I] \times F, & |X_I| < \pi/2 \\ 5 \times 10^{-9} \times F, & |X_I| \geq \pi/2 \end{cases} \quad (4.10)$$

Oneskorenie I_1 je dané pre signál L1 GPS v sekundách.

Aj keď má tento algoritmus poskytovať odhad ionosférického oneskorenia signálu GPS, môže byť taktiež použitý pre signály systémov GLONASS a Galileo.

Ak berieme do úvahy, že ionosférické oneskorenie je nepriamo úmerné druhej mocnine frekvencie signálu, tak oneskorenie akéhokoľvek signálu GNSS vysielaného na frekvencii f_k je dané vzťahom [35]:

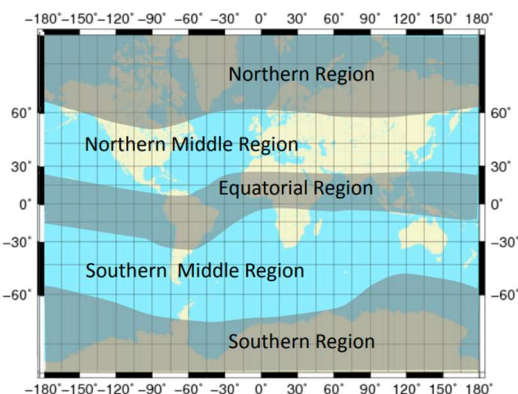
$$I_k = \left(\frac{f_1}{f_k} \right)^2 I_1 \quad (4.11)$$

4.1.2 Model BeiDou

Model BeiDou je ekvivalentom klobucharovho modelu, ale je navrhnutý pre navigačný systém BeiDou. Jediným rozdielom oproti klobucharovmu modelu je, že modelovaná ionosférická vrstva sa nachádza vo výške 375 km a využíva vlastné modelovacie parametre vytvorené z monitorovacích staníc v Číne, ktoré sú aktualizované každé dve hodiny. Tie sú tiež vysielané prostredníctvom navigačnej správy s označením BDSA a BDSB od verzie Rinex 3.02. Uvádza sa, že model BeiDou je lepší ako klobucharov model pre užívateľov na severnej pologuli v ázijsko-pacifickej oblasti, ale mimo tejto oblasti vykazuje slabšiu výkonnosť [35].

4.1.3 Model NeQuick

Model NeQuick bol navrhnutý pre systém Galileo. Je to trojrozmerný a časovo závislý model elektrónovej hustoty ionosféry, ktorý poskytuje elektrónovú hustotu v ionosfére ako funkciu polohy a času. Obsahuje päť preddefinovaných oblastí (severná oblasť – Northern Region, stredná severná oblasť – Northern Middle Region, rovníková oblasť – Equatorial Region, južná stredná oblasť – Southern Middle Region, južná oblasť – Southern Region) a má štyri vstupné parametre vysielané v úvode navigačnej správy pod označením GAL. Taktiež používa 13 dátových súborov s číselnými hodnotami, ktoré musí prijímač obsahovať aby mohol model využiť. Tieto dátové súbory sú aktualizované približne každých päť rokov kvôli ich prirodzenej zmene [35].



Obr. 4-3: Oblasti modelu NeQuick [35]

Algoritmus pre jednofrekvenčné prijímače systému Galileo je založený na nasledujúcich krokoch:

1. Vypočítajú sa vstupné parametre modelu využitím navigačnej správy
2. Vypočíta sa elektrónová hustota pre bod na trase signálu medzi vysielateľom a prijímačom

3. Kroky 1 a 2 sú opakované pre mnoho nespojitých bodov na trase signálu. Počet bodov a medzery medzi bodmi budú závisieť na výške a budú kompromisom medzi integračnou chybou, výpočtovým časom a výkonom.

4. Všetky hodnoty elektrónovej hustoty pozdĺž trasy signálu sú zjednotené aby sme dostali šikmý TEC (Slant TEC, STEC).

5. STEC v jednotkách TECU je na korekciu pseudovzdialenosti premenený na metre šikmého oneskorenia pomocou vzťahu:

$$I_f = \frac{40 \times 3 \times 10^{16}}{f^2} TEC \quad (4.12)$$

Kde f je v Hz.

Ionosférické korekcie získané pomocou tohto modelu môžu byť podobne ako tie z klobucharovho modelu použité na akýkoľvek signál GNSS jednoduchým dosadením danej frekvencie [35].

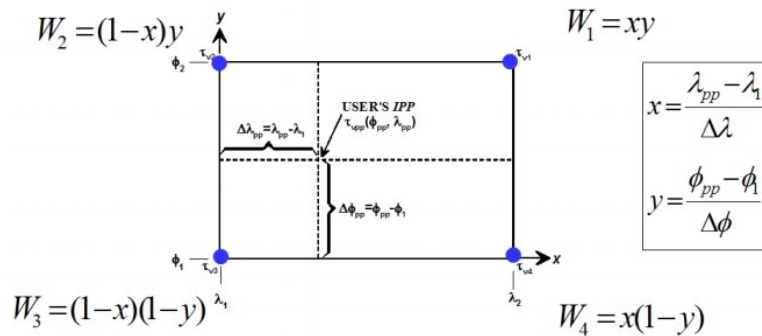
4.1.4 Model GIM (IONEX)

Global Ionospheric Maps je celosvetová mapa s hodnotami ionosféry vytvorenými medzinárodnými službami GNSS (International GNSS Service IGS). Tieto hodnoty sú určované pomocou priamych meraní a sú poskytované ako pravidelná sieť. Každá táto sieť môže mať rôzne vzdialenosti medzi bodmi a mať viac vrstiev. Veľmi často sú tieto siete publikované v intervale dvoch hodín, čo však nie je pravidlom, sieť je rozdelená po 2,5° zemepisnej šírky a 5° zemepisnej dĺžky s jednou vrstvou vo výške 450 km. Všetky tieto hodnoty sú konfigurovateľné. Štandardný formát súboru používaný na vysielanie ionosférických máp je známy ako IONosphere map Exchange format (IONEX). V úvode tohto formátu je udaná veľkosť siete ako aj jej periodičita. Tieto súbory sú publikované na verejných serveroch vždy nasledujúci deň. Nie je teda možné ich sledovať v reálnom čase, no existujú aj predpovedané GIMs aby bolo možné využívať navigáciu v reálnom čase, aj keď bude zhoršená presnosť.

Algoritmus na výpočet ionosférických korekcií je nasledujúci:

1. Je potrebné nájsť gridové mapy, ktoré sú pred našim aktuálnym časom.
2. Vybrať čas mapy pred našim aktuálnym časom
3. Vybrať prvú vrstvu na aktuálnej gridovej mape

4. Vypočítať prenikový bod ionosféry IPP v aktuálnej gridovej mape a vrstve
5. Nájsť štyri body siete, ktoré obklopujú IPP
6. Vypočítať váhy W_i pre každý bod siete, ktorý je produktom jednotkovej vzdialenosti z IPP do bodu siete na každej osi



Obr. 4-4: Definícia interpolačného algoritmu štyroch bodov [35]

7. Vypočítať vertikálne ionosférické oneskorenie, ktoré je súčtom hodnoty každého bodu siete vynásobeného jeho váhou

$$\tau_{vpp} = (\phi_{pp}, \lambda_{pp}) = \sum_{n=1}^4 W_i \times \tau_{vi} \quad (4.13)$$

8. Vypočítať mapovaciu funkciu pre aktuálny IPP

$$F = \frac{R_E + h}{\sqrt{(R_E + h)^2 - (R_E \times \cos \quad)^2}} \quad (4.14)$$

Kde R_E je polomer Zeme, h výška vrstvy a E je elevačný uhol.

9. Vypočítať šikmé oneskorenie v aktuálnej vrstve vynásobením vertikálnym oneskorením s mapovaciu funkciou
10. Opakovať kroky 4 – 9 so všetkými dostupnými vrstvami, pričom je vždy pridávané šikmé oneskorenie predošlej vrstvy
11. Vypočítať váhu aktuálneho času gridovej mapy, ktorý je jednotkovou vzdialenosťou medzi aktuálnym časom a časom gridovej mapy
12. Vynásobiť šikmé oneskorenie aktuálneho času gridovej mapy jeho váhou
13. Opakovať kroky 3 – 12 s gridovou mapou pred našim aktuálnym časom
14. Pripočítať šikmé oneskorenie oboch gridových máp, výsledok je v TECU
15. STEC v TECU premeniť na metre šikmého oneskorenia na opravu pseudovzdialenosti pomocou vzťahu:

$$I_f = \frac{40 \times 3 \times 10^{16}}{f^2} TEC \quad (4.15)$$

Kde f je daná v Hz.

Podobne ako predošlé ionosférické modely, je možné aj model IONEX použiť na akýkoľvek systém GNSS upravením príslušnej frekvencie [35].

4.2 Dvojfrekvenčné ionosférické modely

V súčasnosti systémy SBAS poskytujú augmentačné správy pre spresnenie systému GPS na jednej frekvencii L1. Nová generácia systému EGNOS bude schopná poskytovať tieto správy na dvoch frekvenciách, L1 a L5 ako pre systém GPS tak pre Galileo. Užívateľ vďaka využitiu dvoch frekvencií nebude ovplyvnený stratou výkonnosti systému v období silných ionosférických rušení. Namiesto toho bude prijímať dve frekvencie, čo prijímaču dodá dáta potrebné na vypočítanie polohy a času s ešte vyššou presnosťou [35].

4.2.1 Bez-ionosférická kombinácia

Ako už bolo spomenuté, ionosférické vplyvy sú závislé na vysielanej frekvencii. Hlavné vplyvy závisia z 99,9% na obrátenej funkcii mocniny frekvencie signálu. Ionosférický efekt môže byť eliminovaný cez nasledujúcu lineárnu kombináciu:

$$R_{iono-free} = \frac{f_1^2 R_1 - f_2^2 R_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (4.16)$$

Kde R_1 a R_2 sú pseudovzdialenosti alebo nosné hodnoty namerané na oboch frekvenciách, f_1 a f_2 sú frekvencie signálu a $R_{iono-free}$ je výsledná hodnota bez ionosférického vplyvu. Nevýhody tejto kombinácie je, že vyžaduje dvojfrekvenčný prijímač a dve frekvencie. V súčasnosti už systém GPS vysiela okrem pásma L1 aj v pásme L2c, vďaka čomu je možné aj tento družicový navigačný systém využívať s dvojfrekvenčnými prijímačmi. Podobne aj systém Galileo využíva dve frekvencie, E1 a E5 a GLONASS L1 a L2. Presné určenie polohy PPP (Precise Point Positioning) využíva kódové a fázové merania v bezionosférickej kombinácii na odstránenie ionosférickej refrakcie [35].

5 Družicové navigačné systémy

Systémy založené na družicových technológiách určené na navigáciu začali vznikať približne v 80. rokoch 20. storočia. Najznámejší a najpoužívanejší systém družicovej navigácie je americký GPS – NAVSTAR, nazývaný skrátene aj GPS (Global Positioning System). Často je všeobecne družicová navigácia označovaná touto skratkou, no ak chceme byť presní, hovoríme o systémoch GNSS (Global Navigation Satellite System), medzi ktoré patrí aj spomínaný systém GPS. Spočiatku boli tieto systémy vytvorené pre armády štátov, z ktorých pochádzajú, no postupne sa stali každodennou súčasťou veľkého množstva činností bežných ľudí. Počas svojej histórie prešli veľkými zmenami čo sa týka konštrukcie alebo princípu ich fungovania. V nasledujúcej časti tejto kapitoly budú vysvetlené princípy fungovania družicových navigačných systémov.

5.1 Princíp fungovania systémov GNSS

Globálne družicové navigačné systémy poskytujú užívateľovi trojrozmerné určenie polohy založené na rádiových signáloch prenášaných z družíc. Systémy potrebujú pre správne fungovanie zvyčajne 20 – 30 družíc, ktoré sú rozmiestnené na troch až ôsmich kruhových dráhach okolo Zeme. Inklinácia týchto dráh je okolo 60° vzhľadom na rovinu rovníka. Týmto usporiadaním je zabezpečené pokrytie celého povrchu Zeme vrátane oblastí na pólach.

5.2 Dial'komerná metóda určovania polohy

Dial'komerná metóda je najpoužívanejší spôsob určovania polohy pomocou družíc a je základom systémov GPS, GLONASS a Galileo. Vo väčšine prípadov je meranou veličinou čas, z ktorého sa následne vypočíta vzdialenosť. Poloha sa určí pomocou nameraných pseudovzdialeností vybraných navigačných družíc, ktorých polohu je možné predpokladať z kepleriánskych elementov distribuovaných v navigačnej správe. Na tento výpočet sa využíva sústava štyroch nelineárnych rovníc:

$$D_1 = \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 + (z_1 - z_u)^2} + c \times t_u \quad (5.1)$$

$$D_2 = \sqrt{(x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 + (z_2 - z_u)^2} + c \times t_u \quad (5.2)$$

$$D_3 = \sqrt{(x_3 - x_u)^2 + (y_3 - y_u)^2 + (z_3 - z_u)^2} + c \times t_u \quad (5.3)$$

$$D_4 = \sqrt{(x_4 - x_u)^2 + (y_4 - y_u)^2 + (z_4 - z_u)^2} + c \times t_u \quad (5.4)$$

kde: vektory x_i, y_i, z_i predstavujú polohu družice v kartézskej súradnicovej sústave,
 c je rýchlosť šírenia elektromagnetickej vlny,
vektory x_u, y_u, z_u sú hľadané polohy a
 t_u je chyba hodín prijímača [11].

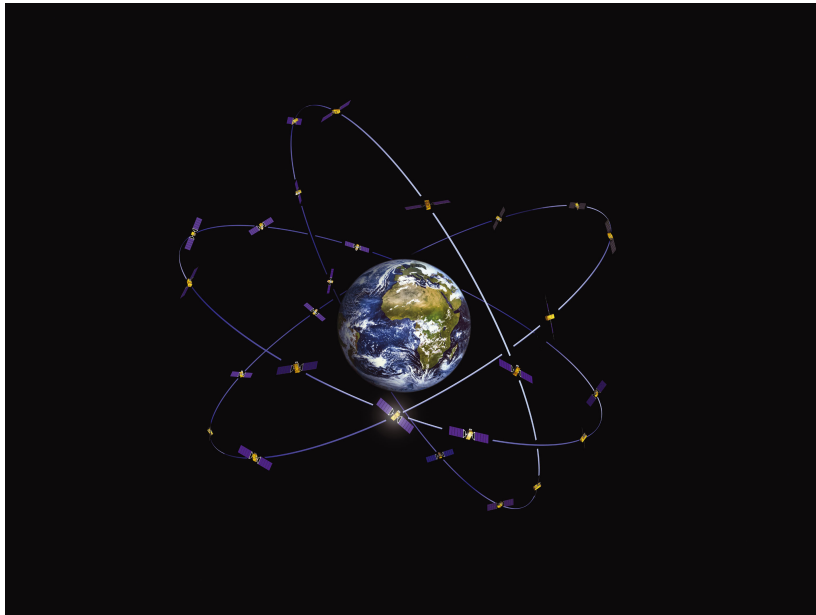
5.3 Galileo

Navigačný systém Galileo je autonómny civilný európsky globálny družicový polohový systém. Bol vytvorený za pomoci Európskej únie a je prvým globálnym navigačným systémom, ktorý je civilný a nie je prevádzkovaný armádou. V roku 2003 boli zjednotené koncepty viacerých európskych štátov do jedného celku a oficiálne zahájená prvá časť vývoja systému. Jedným z hlavných dôvodov spustenia tohto projektu bol fakt, že systémy GPS a GLONASS sú riadené armádami a v prípade krízových situácií by mohli byť ich služby obmedzené alebo úplne vypnuté. Systém Galileo je kompatibilný s oboma systémami a užívateľ dostáva informácie z družíc, ktoré sú v tom čase najvýhodnejšie pre určenie jeho presnej polohy. Systém Galileo je rozdelený na tri segmenty: kozmický, riadiaci a užívateľský [10,12].

5.3.1 Kozmický segment systému Galileo

Kozmický segment systému Galileo sa bude skladať z 30 satelitov. V súčasnej dobe je na orbitách 26 družíc. Zaujímavosťou je zvolenie pomenovaní satelitov. Tie nesú mená po víťazoch súťaže Európskej komisie v kreslení pre deti jednotlivých členských štátov. Môžeme tam nájsť teda družice pomenované Samuel po slovenskom víťazovi, či David po tom českom.

Družice sa nachádzajú vo výške 23 222 km nad povrchom Zeme. Družice 5 a 6 sa kvôli nevydarenému umiestneniu nachádzajú vo výške 25 900 km v apogeu a 17 200 km v perigeu. Inklinácia je 56° v troch obežných rovinách posunutých voči sebe o 120° . Na každej dráhe bude uložených 10 družíc, z ktorých 9 bude aktívnych a jedna záložná, schopná okamžitej náhrady v prípade nefunkčnosti jedného zo satelitov. Vďaka tomuto rozmiestneniu bude zaistené dobré pokrytie až do 75° zemepisnej šírky, čo predstavuje pokrytie ďaleko za najsevernejšou časťou Európy. Telo družice má rozmery 2,7 x 1,1 x 1,2 m a solárne panely majú rozpätie 13 m. Operačná hmotnosť družice je 700 kg. Družice sú vybavené dvoma maserovými vodíkovými hodinami a dvoma rubídiovými atómovými hodinami. Minimálna doba prevádzkyschopnosti družice je 12 rokov, po uplynutí tejto doby bude rozhodnuté o jej ďalšom osude na základe stavu družice [13,14].



Obr. 5-1: Kozmický segment systému Galileo [13]

5.3.2 Riadiaci segment systému Galileo

Nemenej dôležitou súčasťou funkčnosti celého systému je pozemný riadiaci segment, ktorý slúži na dohľad nad satelitmi a zaisťuje nepretržitú spoľahlivosť polohových a časových informácií.

Pozemný riadiaci segment monitoruje a riadi družice, jeho základňou je Galileo Control Center v nemeckom Oberpfaffenhofene blízko Mníchova a je prepojený na stanice diaľkového velenia v Kirune, Švédsku a Francúzskej Guiane. Galileo Control Center a Segment pozemných úloh sídli v talianskom meste Fucino, ktorý zaisťuje navigačnú výkonnosť systému Galileo nepretržitou kontrolou všetkých satelitov a vytváraním opravných správ na kompenzáciu akejkoľvek malej odchýlky časovania alebo posunu na orbite. V budúcnosti budú tieto dve základne v Oberpfaffenhofene a Fucine vybavené rovnakým zariadením a budú pracovať synchronizovane v reálnom čase so schopnosťou okamžitého zastúpenia na posilnenie celkovej odolnosti systému [12,15].



Obr. 5-2: Riadiaci segment systému Galileo [15]

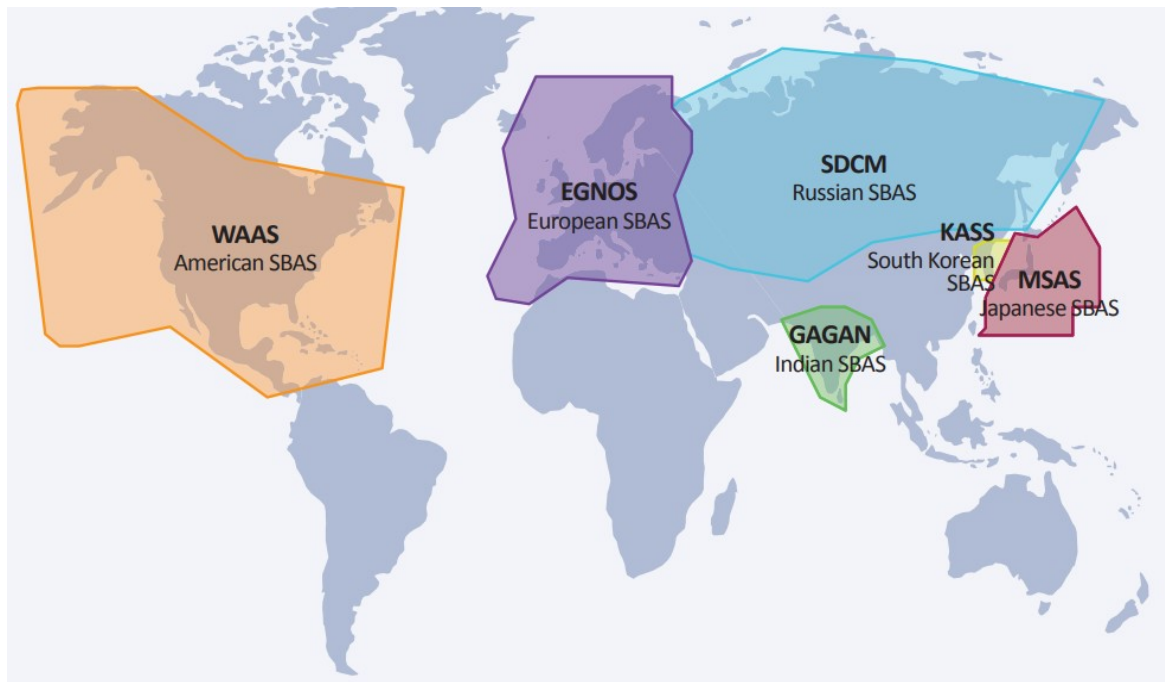
5.3.3 Uživateľský segment systému Galileo

Prijímač systému Galileo je zariadenie schopné určiť polohu, rýchlosť a presný čas užívateľa spracovaním signálu vysielaného družicami. Na to aby prijímač vedel určiť svoju polohu na základe dát zo systému Galileo, sa musí skladať z antény, mikroprocesora, oscilátora, napájacieho zdroja, pamäte na ukladanie dát a užívateľského rozhrania. Na vykonanie výpočtu polohy užívateľa je potrebné poznať efemeridy družice, čas a parametre korekcií hodín, parametre stavu družice, model ionosférických parametrov a almanach, ktorý slúži na počiatkové určenie polohy ostatných družíc. Európska komisia sa vo svojom akčnom pláne zaviazala poskytovať služby individuálnym ručným zariadeniam a mobilným telefónom, cestnej doprave, leteckej doprave, vodnej doprave, v presnom navádzaní v agrikultúre a ochrane životného prostredia, v civilnej ochrane a dohľade [16].

6 EGNOS

Družicové navigačné systémy boli vytvorené na poskytovanie polohových a časových služieb globálne, alebo lokálne určitej krajine, prípadne kontinentu. Tieto systémy však nie sú stopercentné a aj v nich sa nachádzajú rôzne chyby, či už systémové alebo externé, spojené s prírodnými podmienkami. Väčšina užívateľov si tieto chyby ani nevšimne, prípadne chyba bude mať na užívateľa len malý vplyv. Avšak existuje viacero odvetví, v ktorých tieto chyby môžu spôsobiť problémy, a preto je nutné tieto chyby napravnovať a varovať užívateľov keď chyba nastane a nemôže byť opravená. Z tohto dôvodu boli navrhnuté systémy na podporu družicových navigačných systémov.

Na prelome tisícročí bola založená skupina pozostávajúca zo zástupcov EUROCONTROLu, európskej vesmírnej agentúry ESA a európskej komisie. Hlavným cieľom tejto skupiny bolo vytvoriť systém SBAS (Satellite Based Augmentation System), podobný systému WAAS (Wide Area Augmentation System) používanému v USA. EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System) je európsky regionálny družicový augmentačný systém slúžiaci na zlepšenie výkonnosti globálnych družicových systémov ako GPS a v budúcnosti aj systému Galileo. Základným princípom tohto systému je opravovanie družicových dát podľa známych presných lokalít monitorovacích staníc, ktoré prijímajú signál z družíc navigačných systémov. Plánované boli dve časti programu, GNSS 1 zameraný na vytvorenie európskeho systému SBAS a GNSS 2 zameraný na vytvorenie samostatného európskeho družicového navigačného systému, ktorý napokon vyústil do programu Galileo. EGNOS je súčasťou vyvíjajúcej sa medziregionálnej siete služieb SBAS, schopnej podporiť široké spektrum aplikácií v rôznych odvetviach, ako napríklad letecká, námorná, železničná, cestná doprava či agrikultúra. Už fungujúci systém WAAS v USA je doplnený systémom MTSAT v Japonsku, GAGAN v Indii a ďalšie systémy ako ruský SDCM alebo juhokórejský KASS sú vo fázach uvádzania do prevádzky, prípadne výskumu [30].



Obr. 6-1: Svetové augmentačné systémy SBAS [30]

6.1 Princíp činnosti systému EGNOS

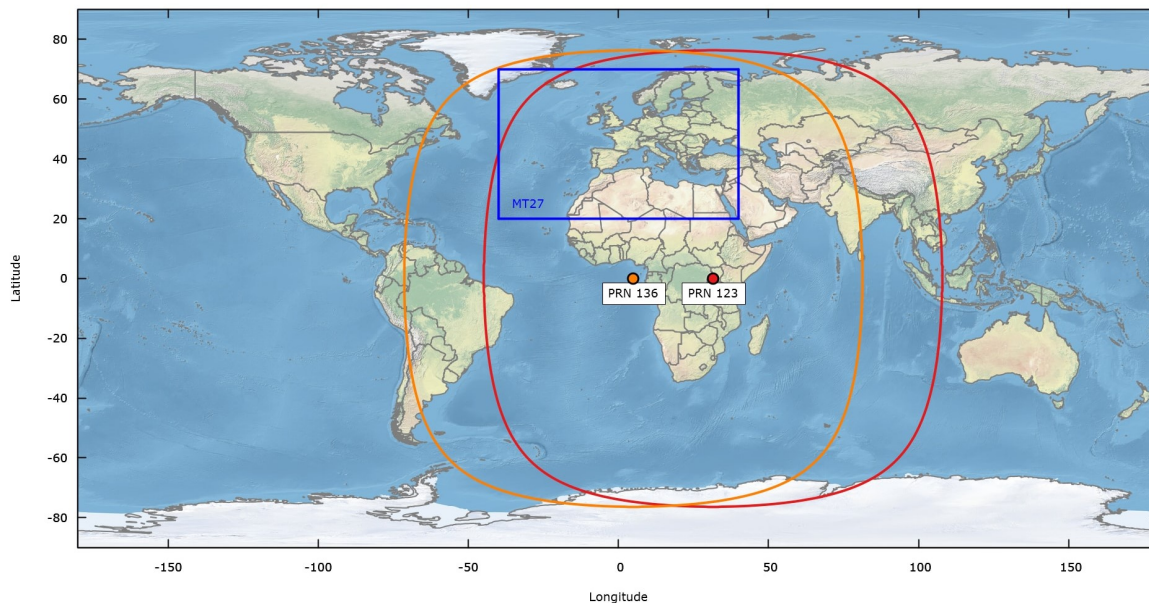
Systém EGNOS je podobne ako aj družicové navigačné systémy rozdelený do troch segmentov. Kozmický segment využíva geostacionárne družice, pozemný segment vypočítava presné diferenciálne korekcie a pomocou družíc odosiela tieto informácie užívateľom. Užívateľský segment pozostáva z prijímačov systému EGNOS, ktoré dokážu presne vypočítať polohu užívateľa [30].

6.1.1 Kozmický segment systému EGNOS

Kozmický segment systému EGNOS pozostáva z troch geostacionárnych družíc (GEO), vysielajúcich korekcie a informácie o integrite pre družice GPS vo frekvenčnom pásme L1 (1575,42 MHz). Činnosť systému je nastavená tak, aby v každom čase dve z troch družíc vysielali prevádzkový signál a zvyšná družica testovací signál. Na získavanie korekčných dát zo systému postačuje jedna funkčná družica, čo zabezpečuje vysoký level continuity služby a schopnosť zmeny družice v prípade poruchy fungovania jednej z nich. Plánované je aj doplnenie kozmického segmentu, presná poloha nových družíc sa môže líšiť, avšak to nebude mať žiadny vplyv na užívateľský segment. Nové družice majú aj nový PRN kód, avšak všetky prijímače systému SBAS sú navrhnuté tak, aby automaticky detekovali a používali akýkoľvek kód, z predom určenej sady kódov rezervovaných pre SBAS. Jedna zmena nastala 1.1.2019, kedy bola ukončená prevádzka družice INMARSAT 3F2 AOR-E s PRN 120. Od 23.3.2020 sú v prevádzke družice PRN 123 a PRN 136 a družica PRN 126 je v testovacom režime.

Polohy družíc sú nasledovné:	ASTRA-5B	PRN 123	31,5°E
	INMARSAT 4F2 EMEA	PRN 126	64°E
	ASTRA SES-5	PRN 136	5°E

Hlavné kritéria, ktoré sú zohľadňované pri výbere polohy družice sú zlepšenie meracej geometrie, a teda systémovej dostupnosti, maximalizácia uhla, pod ktorým je družica viditeľná, čím sa minimalizuje blokovanie signálu a poskytovanie minimálne dvojitého geostacionárneho pokrytia v strede prevádzkovej oblasti [30].



Obr. 6-2: Pokrytie systému EGNOS aktuálnymi družicami v prevádzke [30]

6.1.2 Riadiaci segment systému EGNOS

Riadiaci, alebo aj pozemný segment systému EGNOS zahŕňa sieť staníc RIMS (Ranging Integrity Monitoring Stations), dve riadiace centrá MCC (Mission Control Centres), dve pozemné navigačné stanice NLES (Navigation Land Earth Stations) na každú geostacionárnu družicu a EWAN (EGNOS Wide Area Network), ktorý poskytuje komunikačnú sieť pre všetky komponenty pozemného segmentu. Súčasťou pozemného segmentu sú aj dve ďalšie stanice slúžiace na podporu systémovej prevádzky a zabezpečenie služby, a to PACF (Performance Assessment and Checkout Facility) a ASQF (Application Specific Qualification Facility), ktoré sú prevádzkované poskytovateľom služieb EGNOS.

Hlavnou funkciou staníc RIMS je zbieranie dát meraní z družíc GPS a ich odosielanie do CPF (Central Processing Facilities) každého MCC. Súčasná sieť staníc RIMS pozostáva zo 40 zariadení rozložených na veľkej geografickej ploche celého pokrytia systému EGNOS.



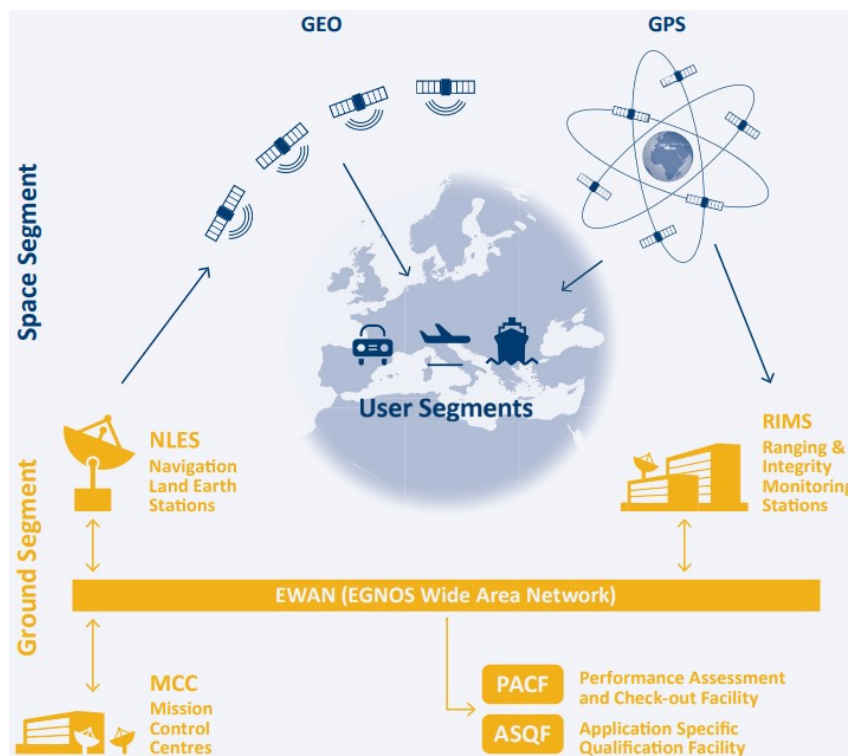
Obr. 6-3: Stanice RIMS systému EGNOS [30]

CPF, centrálné spracovacie zariadenie je časť MCC používajúca dáta získané zo siete staníc RIMS na tri opravy. Prvou je vypracovanie časových korekcií pre každú družicu GPS v dohľade danej stanice, ktoré sú platné v oblasti geostacionárneho vysielania. Druhou je vypracovanie opráv efemeridy na zlepšenie presnosti orbitálnej polohy družice taktiež v oblasti geostacionárneho vysielania, no z dôvodu rozloženia pozemných staníc EGNOSu je presnosť korekcií degradovaná pri pohybe od jadra oblasti pôsobnosti systému. Ako tretiu korekciu vytvára model pre ionosférické chyby nad oblasťou pôsobnosti EGNOSu kvôli kompenzácii voči ionosférickým rušeniam navigačného signálu. Tieto tri sady korekcií sú následne vysielané k užívateľovi s cieľom zlepšenia polohovej presnosti. CPF ešte odhaduje zvyšné chyby, ktoré môže užívateľ očakávať po aplikovaní týchto troch opráv EGNOSu. Zvyškové chyby sú charakterizované pomocou dvoch parametrov, a to UDRE a GIVE. UDRE (User Differential Range Error) je odhad zvyškovej chyby vzdialenosti po aplikácii opráv času a efemeridy pre danú družicu GPS. GIVE (Grid Ionospheric Vertical Error) je odhad vertikálnej zvyškovej chyby po aplikácii ionosférických korekcií pre daný gridový bod. Vďaka týmto dvom parametrom je možné následne určiť celkovú súhrnu chybu ohraničenú horizontálnou a vertikálnou polohovou chybou. Tieto informácie sú zvlášť dôležité pre užívateľov služby

Safety of Life, no môžu byť prospešné aj pre iných užívateľov, ktorí potrebujú vedieť neurčitosť v polohe vypočítanej prijímačom. CPF zahŕňa ďalšie množstvo monitorovacích funkcií navrhnutých na detekciu akejkoľvek anomálie v systéme GPS a EGNOS a je schopné varovať užívateľa v krátkom časovom horizonte v prípade chyby presahujúcej určenú hranicu. Tieto funkcie sú taktiež prispôsobené pre služby Safety of Life, ktoré budú vysvetlené v ďalších kapitolách.

Správy vypracované centrálnymi spracovacími stanicami sú vysielané do pozemných navigačných staníc NLES (Navigation Land Earth Stations). Tieto stanice vysielajú prijaté správy do geostacionárnych družíc na ďalšie vyslanie smerom k užívateľom a zabezpečenie synchronizácie so signálom GPS. Pre každú družicu systému EGNOS existujú dve stanice NLES, z ktorých jedna je vždy aktívna a druhá je v záložnom režime. Hlavnými funkciami NLES je vybrať CPF, ktorá vysielá správu SBAS, synchronizovať vysielaný signál s časom GPS, poslať dáta do geostacionárnych družíc.

Systém EGNOS je riadený prostredníctvom CCF (Central Control Facility), centrálnych riadiacich staníc nachádzajúcich sa v každom MCC a prevádzkovaných 24 hodín denne, 7 dní v týždni [30].



Obr. 6-4: Architektúra fungovania systému EGNOS [30]

6.2 Služby systému EGNOS

Systém EGNOS poskytuje korekcie a informácie o integrite signálu GPS nad plochou Európy. Poskytuje tri služby: OS (Open Service), otvorená služba dostupná pre bežného užívateľa, SoL (Safety of Life) služba splňujúca najprísnejšiu úroveň výkonnosti signálu vo vesmíre poskytovaná všetkým SoL užívateľom a službu EDAS pre užívateľov, ktorí potrebujú prístup k špecifickým dátam na dosiahnutie pridanej hodnoty služieb, profesionálnych aplikácií či komerčných produktov. OS a SoL sú na rozdiel od dát EDASu prenášané prostredníctvom geostacionárnych družíc, EDAS je poskytovaný cez internet [30].

6.2.1 Open Service

Hlavným cieľom tejto služby EGNOSu je zlepšiť dosiahnuteľnú polohovú presnosť opravovaním niekoľkých chýb ovplyvňujúcich signál GPS. Tieto opravy následne prispievajú k znižovaniu vzdialenostných chýb spôsobených satelitnými hodinami, polohou družice a ionosférickými vplyvmi. Ďalšími zdrojmi chýb sú lokálne vplyvy, ktoré sa nedajú opraviť augmentačným systémom. Tu patria chyby spôsobené troposférickými vplyvmi, multipath alebo chyby spôsobené prijímačom užívateľa. Systém EGNOS vie detekovať narušenia ovplyvňujúce signály vysielané systémom GPS a dokáže zabrániť užívateľovi v sledovaní takejto družice. Služba Open Service je dostupná od 1.10.2009 v Európe pre každého užívateľa s prijímačom kompatibilným s GPS/SBAS [30].

6.2.2 Safety of Life

Služba SoL má ako hlavný cieľ podporu riadenia civilného letectva až do miním pri priblížení LPV (Localiser Performance with Vertical Guidance). Aj keď je táto služba momentálne primárne využívaná v letectve, kde má spracované detailné charakteristiky výkonnosti, využitie nájde v budúcnosti aj v iných druhoch dopravy, či už námornej, železničnej alebo cestnej. SoL bola navrhnutá tak, aby spĺňala požiadavky leteckých predpisov ICAO SARPs pre systémy SBAS. Od roku 2011 boli schválené dva stupne služieb SoL EGNOSu, NPA (Non-precision Approach) a APV (Approach with Vertical Guidance). Neskôr od roku 2015 boli doplnené o LPV-200 s možnou výškou rozhodnutia 200 ft nad úrovňou prahu dráhy splňujúce podmienky ICAO Annexu 10. Vďaka tomuto rozšíreniu je možné vykonávať NPA a ďalšie letecké činnosti podporujúce špecifikácie PBN iné ako RNP APCH nie len pri priblížení, ale aj pri ostatných fázach letu, priblíženia s vertikálnym vedením APV podporujúce špecifikácie RNP APCH PBN až do miním LPV 250 ft, presné priblíženie kategórie I s upozornením vertikálneho limitu VAL (Vertical Alert Limit) 35m a podporujúcim špecifikácie RNP APCH PBN až do miním LPV 200ft [30].

6.2.3 EGNOS Data Access Service (EDAS)

EDAS je pozemná služba systému EGNOS poskytujúca prístup k dátam EGNOSu v reálnom čase a taktiež k historickým dátam uloženým v databáze. Ide predovšetkým o dáta vyzbierané pozemnými stanicami RIMS a NLES rozložených v Európe a severnej Afrike. Táto služba je dostupná od 26.7.2012 a podrobnejšie bude popísaná v samostatnej kapitole [30].

6.3 Dáta vysielané prostredníctvom systému EGNOS

Systém EGNOS podobne ako ostatné družicové augmentačné systémy poskytuje meracie signály vysielané geostacionárnymi družicami, diferenciálne korekcie pre veľkú plochu a ďalšie parametre s cieľom zabezpečiť integritu pre užívateľa GNSS. Systémy SBAS poskytujú informácie o orbite družice, opravy času existujúcich družicových systémov, ako aj odhad chýb spojených s družicami. Ďalej poskytujú ionosférické opravy pre danú sieť bodov a odhad chýb spôsobených ionosférickými vplyvmi (GIVE). Opravy chýb družicového času a ionosférické korekcie sú modelované dynamicky. Systém SBAS odovzdáva užívateľovi opravy chýb, ktoré sú dostupné a použiteľné pre daný prijímač. Troposférické korekcie sú modelované staticky, čo znamená, že informácie nezávisia na žiadnych externých vplyvoch, ale polohe užívateľa. Navigačné dáta pre každú GEO družicu podporujúcu meracie služby sú tiež vysielané cez SBAS, ktorý komunikuje s užívateľom prostredníctvom tzv. Signal in Space (SiS). SBAS vysiela tieto informácie pomocou správ zakódovaných v signáli, ktoré sú vysielané každú sekundu s tokom dát 250 bitov.

Navigačná správa pozostáva zo štyroch častí. Prvou je úvod, jedinečné 24-bitové pole distribuované prostredníctvom troch po sebe nasledujúcich slov. Druhá časť je identifikátor druhu správy, 6-bitové pole umožňujúce odosielanie až 64 rôznych druhov správ. Tretiu časť tvorí dátové pole obsahujúce rôzne korekcie a informácie integrity závislé na druhu správy. Poslednou, štvrtou časťou je informácia parity, 24-bitové pole na konci správy, poskytujúce ochranu voči náhodným chybám [37].

6.3.1 Druhy navigačných správ

Navigačné správy majú 6-bitový identifikátor správy, ktorý informuje prijímač o prenášanej informácii v správe. Možných druhov navigačných správ je síce 64, no v súčasnosti sa využíva len 20 definovaných. Existujú tri kategórie týchto správ: správy týkajúce sa informácií družice, správy s ionosférickými informáciami a ďalšie prídavné správy [37].

6.3.1.1 Správy o informáciách o družici

Správy o informáciách o družici obsahujú diferenciálne korekcie, ktoré by mali byť aplikované na každú družicu aby zlepšili presnosť družicového času a orbity družice.

Všetky správy týkajúce sa informácií o družici môžeme vidieť v nasledujúcej tabuľke:

Tabuľka 6-1: Druhy navigačných správ systémov SBAS, informácie o družici [37]

Druh správy	Obsah správy
1	Pridelené číslo PRN
2 - 5	Rýchle opravy
6	Informácie integrity
7	Degradačný faktor rýchlych opráv
9	Navigačná správa GEO družice
17	Almanach GEO družice
24	Zmiešané rýchle opravy a dlhodobé opravy chýb družice
25	Dlhodobé opravy chýb družice
28	Kovariancia hodín efemeridy

Navigačná správa typu 1 obsahuje pridelené číslo PRN vybrané z dostupných GNSS a GEO družíc. Napriek tomu, že v správe je voľných až 210 bitov, využívaných je len 51, a to z dôvodu, že v navigačnej správe typu 6 je možné odoslať informácie o maximálne 51 družiciach.

Správy typu 2, 3, 4, 5 zahŕňajú rýchle korekcie družíc a hodnoty UDRE prostredníctvom indikátora UDREI. Správa typu 2 obsahuje informácie spojené s prvými trinástimi družicami v dohľade. Správa 3 obsahuje informácie družíc 14 – 26, a tak ďalej. V prípade, že počet družíc v dohľade je menší ako 40, správa typu 5 nebude využitá. Ak ich je menej ako 26, využitá nebude ani správa 4. Čas aplikácie rýchlych korekcií využívaných vo výpočtoch je definovaný ako začiatok každej epochy SNT (SBAS Network Time), ktorá je rovnaká ako vysielanie prvého bitu správy. UDREI s hodnotami 0 – 13 indikuje, že družica je použiteľná, 14 že družica sa neobjavuje v dohľade alebo aj keď sa objavuje, nie sú pre ňu vytvorené korekcie alebo hodnoty UDRE a UDREI 15 indikuje, že pre danú družicu bola zistená nezlučiteľnosť alebo odhadovaná rýchla korekcia je väčšia ako 256,0 m.

Správa typu 6 obsahuje informácie o integrite pre 51 družíc a môže byť využitá v dvoch rôznych smeroch. Na jednej strane dovoľuje zriedkavú aktualizáciu rýchlych korekcií, v rozmedzí 12 – 120 s. Na druhej strane správa 6 môže byť využitá aj v stave družicového poplachu.

V správe typu 7 sú zahrnuté degradačné faktory v čase pre prijaté rýchle korekcie ako aj systémové časové oneskorenie. Indikátory degradačného faktoru rýchlych korekcií času, a_{ij} , kde j je družica v dohľade, sú preložené do rýchlych korekcií degradačných faktorov a_i v metroch, používaných na rýchlu korekciu a interval prestávky užívateľa pre rýchle korekcie I_{fc} v sekundách pre rôzne fázy letu.

Správa typu 9 obsahuje informácie o GEO navigácii. Keďže GEO družice nepatria pod žiadnu službu družicovej navigácie, nie sú pre tieto družice extérne dostupné ani efemeridy. SBAS je teda tým, kto dodáva používateľovi tieto informácie. K informáciám o efemeride sú pridané dáta presnosti merania užívateľa URA (User Range Accuracy) definované pre družice GPS.

Správa typu 17 udáva almanach pre maximálne tri GEO družice. Ten poskytuje informácie o zdraví a stave družice, ako aj jej približnú polohu. Nevyužitá miesta sú označené PRN 0. Presnosť parametrov správy 17 je horšia ako presnosť správy 9. Správa 17 informuje užívateľa len o existencii GEO družice, jej polohe, obecnej poskytovanej službe, zdraví a stave. Avšak na vypočítanie polohy užívateľa nemôžu byť použité polohy z GEO almanachu, ale musia byť zohľadnené parametre správy typu 9.

Správa typu 24 obsahuje rýchle aj dlhodobé korekcie družíc. Správa môže byť vysielaná ak počet družíc v poslednej správe rýchlych korekcií je menší alebo rovný 6. Prvá polovica správy zahŕňa rýchle korekcie pre maximálne 6 družíc a druhá obsahuje rovnaké dlhodobé informácie ako každá časť správy 25.

Správa typu 25 obsahuje odhady pomaly sa meniacej chyby efemeridy družice a času s ohľadom na parametre efemeridy a času vysielaných družicovou navigačnou službou. Dlhodobé korekcie sú použiteľné ako pre družice GNSS tak pre družice GEO patriace inému systému SBAS. Dlhodobé korekcie pre GEO družice patriace pod SBAS sú zahrnuté v správe typu 9. Dátové pole správy 25 je rozdelené do dvoch častí po 106 bitoch. Prvý bit sekvencie sa nazýva Velocity Code a ak má hodnotu 0, tak v tejto časti správy sa nenachádza odchýlka času a komponentov orbitálnej rýchlosti. V tomto prípade sa v tejto časti správy nachádzajú dlhodobé korekcie pre dve družice. Ak má Velocity Code hodnotu 1, komponenty odchýlky orbitálnej rýchlosti a času sú zahrnuté v správe, a teda dlhodobé korekcie sú udávané len pre jednu družicu.

Správa typu 28 je voliteľná správa zahrnutá v posledných verziách štandardov ale nie je zahrnutá v základoch EGNOSu. Môže vysielat' relatívnu kovariačnú maticu pre chybu času a efemeridy. Kovariačná matica každej družice je funkciou polohy družice, geometrie referenčnej pozorovacej stanice a dôveryhodnosti meraní referenčnej stanice a je to pomaly sa meniacia funkcia času [37].

6.3.1.2 Správy o ionosférických informáciách

Ionosférické oneskorenie závisí na ceste signálu, ktorou sa šíri. Nad elipsoidom modelu Zeme WGS-84 je vo výške 350 km definovaná sieť bodov IGP (Ionospheric Grid Point), pre ktoré sú udávané ionosférické korekcie. Ak poznáme polohu bodov IGP a ich odhadované ionosférické oneskorenie, prijímač užívateľa je schopný vypočítať ionosférické oneskorenie interpolované medzi bodmi v blízkosti čiary dohľadu užívateľ – družica.

Tabuľka 6-2: Druhy navigačných správ systémov SBAS, ionosférické informácie [37]

Druh správy	Obsah správy
18	Ionosférická maska
26	Opravy ionosférického oneskorenia

Správa typu 18 obsahuje ionosférickú masku. Bit s hodnotou 1 indikuje, že informácie ionosférických korekcií sú poskytované pre daný IGP. Správa tiež obsahuje IODI, s hodnotami 0 – 3, ktoré sa menia vždy keď je zmenená maska IGP (čo je očakávané veľmi zriedka). Pásma, ktoré SBAS nevyužíva nemusia byť vysielané v správe typu 18 s bodmi IGP nastavenými na hodnotu 0. Ak pásmo obsahuje menej ako 201 bodov IGP, chýbajúce body sú v správe označené hodnotou 0.

Správy typu 26 poskytujú korekcie ionosférického oneskorenia a ich presnosti v indikátoroch GIVEI. Každé ionosférické pásmo obsahuje až do 201 bodov IGP, no do správy 26 sa ich vojde len 15. Preto sú pásma rozdelené do blokov. Každý blok obsahuje 15 bodov IGP. Blok 0 obsahuje ionosférické korekcie pre prvých 15 IGP v maske. Stav IGP môže byť podobne ako stav družice rôzny. Use (využiteľný), sú dostupné odhady IGP oneskorenia a GIVEI, Not Monitored (nesledovaný), IGP sa neobjavuje v maske alebo aj keď sa objavuje, nie sú dostupné odhady alebo GIVEI, Don't Use (nepoužiteľný), pre daný bod IGP bola zistená nezlučiteľnosť alebo odhadované oneskorenie je väčšie ako 63,750 m [37].

6.3.1.3 Ostatné správy

Ostatné správy sú správy, ktoré priamo nesúvisia s korekciami družíc alebo ionosférickými korekciami. Informácie nachádzajúce sa v týchto správach sú prídavné informácie SBASu, užitočné pri vypočítavaní polohy užívateľa v prevádzke PA, na vypočítanie presného času UTC alebo degradáciu UDRE vo vybranej oblasti.

Tabuľka 6-3: Druhy navigačných správ systémov SBAS, ostatné správy [37]

Druh správy	Obsah správy
0	Nepoužívať na bezpečnostné užitie
10	Degradačné parametre
12	Čas SBASu, parametre posunu času UTC
27	Správa služby SBAS
62	Správa interného testu
63	Prázdna správa

Správa typu 0 je využívaná pri testovaní SBASu. Existencia správy 0 indikuje, že nie je zaistená úplná výkonnosť systému.

Správa typu 10 obsahuje degradačné parametre, nezávislé na družiciach alebo IGP, takže je potrebná len jedna správa tohto druhu pre systém SBAS. Tieto parametre sa používajú na výpočet degradačných parametrov rýchlych korekcií, dlhodobých korekcií a ionosférických korekcií pre prevádzku presného priblíženia.

Správa typu 12 obsahuje informácie o parametroch posunu času medzi rôznymi časmi v systéme. Prvých 104 bitov obsahuje parametre UTC vo formáte definovanom v GPS ICD. Nasleduje čas GPS a bit indikujúci či je posun času GLONASSu dostupný alebo nie. Poskytovateľ služby EGNOS využíva tieto parametre posunu času GLONASSU na výpočet dlhodobých korekcií času GLONASSu a užívatelia EGNOSu tento parameter potrebujú na skombinovanie meraní zo systémov GPS a GLONASS aby vedeli určiť ich polohu a čas.

Správa typu 27 je voliteľná správa a nie je zahrnutá v základe systému EGNOS. Tieto správy sú používané na zvýšenie hodnôt UDRE vysielaných správami typu 2 – 5 a 6 alebo 24 na vybranej oblasti. Táto degradácia je nekompatibilná so správou 28. Obsahuje hodnoty faktoru UDRE aplikovateľné na algoritmy monitorovania integrity v závislosti na polohe užívateľa. V definovanej oblasti, alebo mimo všetkých oblastí. Na umožnenie prekrývania oblastí sa využíva kód priority a v prípade, že sa užívateľ nachádza na rozmedzí dvoch oblastí, bude použitý UDRE oblasti s vyšším kódom priority. V prípade rovnosti týchto kódov bude použitý najmenší faktor UDRE, nakoľko tým sa dosiahne lepšia výkonnosť.

Správa typu 62 je taktiež voliteľná správa, ktorú systém EGNOS nevysiela a môže sa využiť na interný test SBASu.

Správa typu 63 opäť nie je vysielaná EGNOSom, je voliteľná a môže byť vysielaná v prípade, že nie je k dispozícii žiadna iná správa. Po prijatí tejto správy bude užívateľ naďalej používať dáta z GEO družice a meracie schopnosti, ale bez nadobudnutia pridaných informácií [37].

6.4 Služba EDAS

EDAS umožňuje registrovaným užívateľom prístup k získavaniu dát vyzbieraných systémom EGNOS. Poskytuje možnosť odovzdať tieto dáta užívateľom, ktorí nemajú neustály prístup k družiciam EGNOSu, ale aj pre potreby výskumných programov, aplikácií a iných služieb. Služba EDAS je rozdelená na dva samostatné elementy: EDAS system a EDAS Client SW. EDAS system zabezpečuje pripojenie s infraštruktúrou EGNOSu a vykonáva potrebné spracovania dát na poskytovanie služieb, ktoré sú založené na štandardných protokoloch FTP, SISNET a NTRIP. EDAS Client SW pracujúci na užívateľskej úrovni je zodpovedný za základné bezpečnostné funkcie a pripojenie so systémom EDAS, ktoré získajú užívatelia po registrácii.

6.4.1 Architektúra služby EDAS

Služba EDAS sa skladá z viacerých komponentov. Klientský softvér EDAS (Client Software), ktorý reprezentuje funkčné rozhranie medzi dátovým serverom EGNOSu (EGNOS Data Server) a poskytovateľom služby (Service Provider) a poskytuje overovanie, dátovú komunikáciu, kvóty a riadenie integrity dátového servera EGNOSu – transformuje dáta získané z rozhrania venovaného prístupu k dátam EGNOSu (INSPIRE) z chráneného formátu EGNOSu na ASN.1 a RTCM. Pre každú prijatú správu EDS vytvorí jeden alebo viac správ RTCM a jednu správu ASN.1. Architektúra EDASu je rozdelená na dva samostatné elementy:

Systém EDAS: realizujúci rozhranie s infraštruktúrou EGNOSu a vykonávajúci potrebné dátové procesy na poskytovanie rôznych služieb prostredníctvom internetu. Užívatelia sa môžu pripojiť priamo do systému EDAS na prístup k niektorým službám založených na štandardných protokoloch (FTP, SISNET a Ntrip)

Klientský softvér EDASu: nachádzajúci sa na užívateľskej úrovni, realizujúci externé rozhranie niektorých služieb EDASu (EDAS Service Level 0, Service Level 2 and EDAS Data Filtering Service). Je zodpovedný za základné bezpečnostné funkcie a rozhranie so systémom EDAS cez príslušné komunikačné prostriedky.

Klientský softvér EDASu je platformovo nezávislá časť rozhrania umožňujúca spojenie užívateľa so systémom EDAS na prijímanie hlavných dátových tokov. Tento nástroj je dostupný len po registrácii a užívateľ prostredníctvom neho získa produkty EGNOSu v reálnom čase zo systému EDAS, vykoná potrebné spracovania a poskytne službu konečnému užívateľovi prostredníctvom iných zdrojov ako GEO družice. EDAS ešte obsahuje

aj rozhranie medzi človekom a zariadením (Man Machine Interface MMI) pre každodenné činnosti, monitorovanie a riadenie [38].

6.4.2 Služba EDAS FTP

Služba EDAS FTP umožňuje užívateľom dostať sa k historickým dátam v rôznych formátoch a druhoch dát prostredníctvom softvéru FTP klient. Po prihlásení do softvéru môže užívateľ vykonávať operácie so súbormi, sťahovať ich a ďalej s nimi pracovať. Užívatelia EDASu sa k tejto službe dostanú použitím štandardného klienta FTP [30].

6.4.3 Služba EDAS SISNeT

Hlavným cieľom služby EDAS SISNeT je poskytovať celosvetový prístup k signálu EGNOSu prostredníctvom internetu. Ponúka tak novú technológiu pre vývoj aplikácií začleňujúcich navigáciu pomocou EGNOSu a rozvoj internetu. Hlavnými výhodami SISNeTu je, že signál EGNOSu je dostupný aj v prípade, že nie sú viditeľné GEO družice, akékoľvek užívateľské zariadenie môže mať prístup k virtuálnemu prijímaču EGNOSu s jedinou podmienkou pripojenia na internet a služba SISNeT vyžaduje veľmi nízku prenosovú rýchlosť, vďaka čomu je možné pripojenie z mobilného zariadenia. Služba EDAS SISNeT spĺňa všetky požiadavky pre protokol SISNet definovaný ESA. Informácie sú posielané v štandardnom otvorenom protokole, vďaka čomu je možné navrhnutie vlastnej aplikácie, pomocou ktorej sa užívateľ dostane k tejto službe, alebo využitie už existujúcej aplikácie [30].

6.4.4 Služba EDAS Ntrip

EDAS Ntrip poskytuje dáta GNSS prichádzajúce zo siete EGNOSu cez protokol Ntrip a v reálnom čase. EDAS šíri dáta GNSS vo formátoch RTCM 2.1, 2.3 a 3.1 prostredníctvom tohto protokolu. Navrhnutý bol aby šíril dáta diferenciálnych korekcií alebo iné druhy prúdiacich dát do stacionárnych alebo mobilných zariadení prostredníctvom internetu. Úroveň výkonnosti diferenciálnych korekcií GNSS dodaná cez systém EDAS Ntrip je menej ako 1 meter horizontálnej presnosti pre oblasti do 260 km vzdialené od určenej stanice EGNOSu. V kontexte precíznej agrikultúry môžu diferenciálne korekcie GNSS systému EDAS prispieť k presnostiam okolo 20 cm [36].

7 Korelácia medzi K-indexom a presnosťou meraní GNSS

V tejto kapitole diplomovej práce bude opísané praktické meranie za pomoci prijímača GNSS, krátky úvod a návod na využitie programy a analýza nameraných hodnôt pomocou porovnania indexu K_p , dát dostupných zo serverov EDASu a dát získaných meraniami prijímačom GNSS.

7.1 u-Center, u-blox

Na merania signálu GNSS bol využitý prijímač Navilock NL-8012U u-blox 8 multi GNSS USB receiver. Tento prijímač obsahuje 72 kanálov, disponuje citlivosťou -167dBm a je schopný prijímať signály zo systému GPS na frekvencii L1, 1575,4200 MHz, BEIDOU COMPASS na frekvencii B1, 1561,0980 MHz, GALILEO na frekvencii E1, 1575,4200 MHz a GLONASS na frekvencii G1, 1602,5625 ~ 1615,5000 MHz. Cieľové presnosti prijímača sú pri horizontálnej polohe GPS/SBAS/QZSS+GLONASS a TCXO 2,0 m, rýchlosti 0,1 m/s a čase jednej mikrosekundy synchronizovanom s časom GPS. Prijímač vychádza zo súradníc WGS-84 a obsahuje protokoly NMEA-0183 V3.01 GGA, GSA, GSV, RMC, VTG. Prijímač je napájaný pomocou USB káblu, dokáže pracovať pri teplotách v rozmedzí -20°C – 60°C . Limity prijímača sú 4g pre zrýchlenie, výška 50 km a maximálna rýchlosť 500 m/s. Jeho rozmery sú približne 65 x 45 x 22 mm.

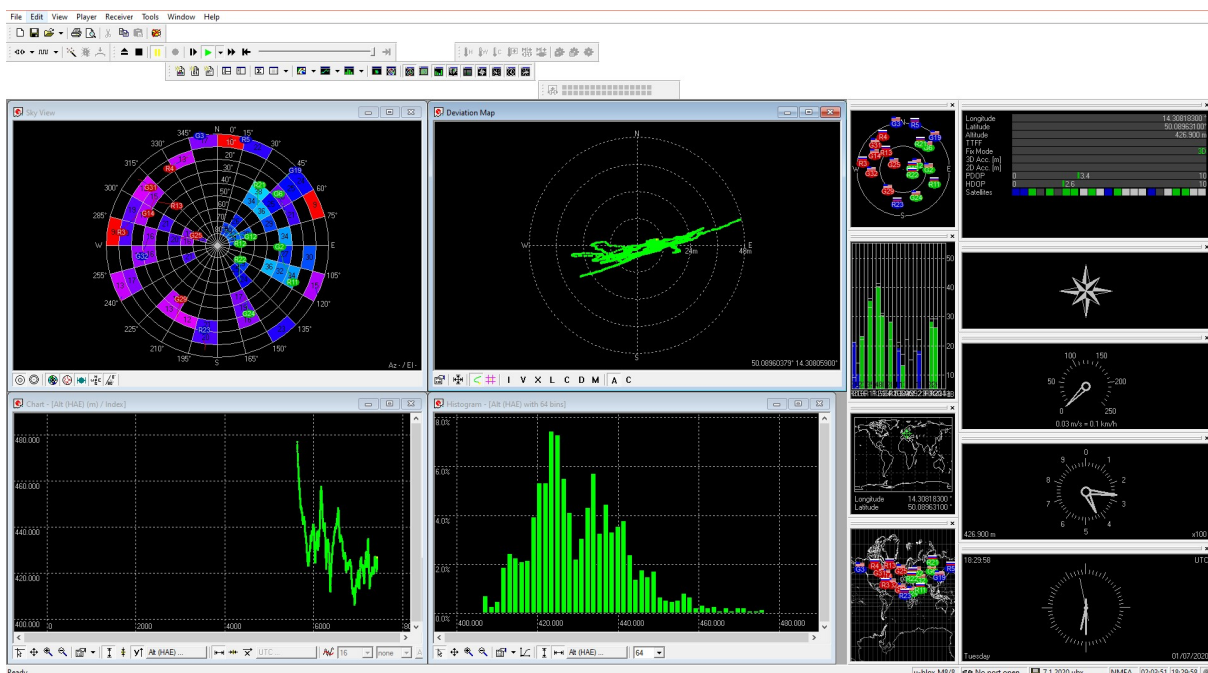


Obr. 7-1: GNSS prijímač Navilock NL-8012U u-blox 8 multi GNSS [43]

Prijímač sa počas meraní nachádzal bez pohybu vždy na rovnakom mieste. Vzhľadom na obmedzené možnosti bol prijímač situovaný na okne 11. poschodia panelákového domu orientovaný na východ. Nadmorská výška prijímača bola približne 380 metrov nad morom.

Na zaznamenanie nameraných dát bol použitý softvér u-center, pomocou ktorého je možné sledovať aktuálny stav prijímaného signálu, jeho nahrávanie a spätné prehratie. V tomto programe je možné ďalej zobrazíť to, z ktorých družíc je signál prijímaný, a z ktorých naopak

nie, priebeh nameranej nadmorskej výšky a deviačnú mapu, na ktorej sa zobrazuje vždy aktuálne nameraná poloha. V pravej časti obrazovky sú následne zobrazené zvolené informácie o družiciach, nameraná poloha na svetovej mape, polohy družíc na svetovej mape a v polárnom zobrazení, kompas, rýchlomer, výškomer a čas UTC. Program u-center je voľne dostupný na webstránkach u-bloxu. Nakoľko prijímač je vybavený chipsetom u-blox, je odporúčané a vhodné na merania využívať práve program u-center. Výhodou softvéru sú aj vyššie spomínané funkcie zobrazenia informácií a ich následné zobrazenie v inej aplikácii. V našom prípade bol na zobrazenie deviačnej mapy použitý program Google Earth, pomocou ktorého sa všetky zaznamenané polohy premietli priamo na mapu. Z týchto dôvodov bol práve program u-center vybraný na zaznamenanie a analýzu meraní.



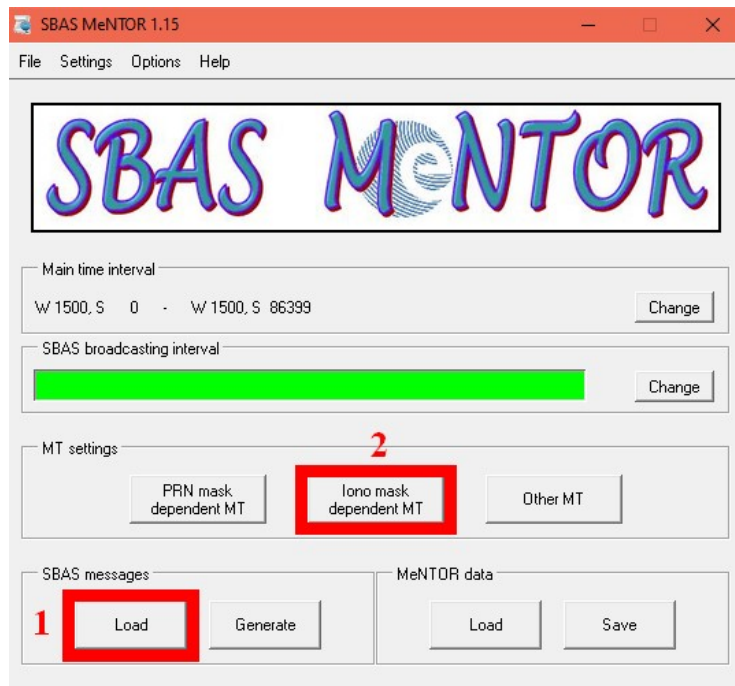
Obr. 7-2: Príklad zobrazenia informácií v programe u-center

7.2 SBAS MeNTOR

SBAS Mentor (SBAS MESSage GENerator) je program vyvinutý agentúrou ESA v spolupráci s Iguassu software systems. Vďaka tomuto programu je možné vytvoriť alebo dekódovať správy SBAS vo vybranom časovom úseku. SBAS MeNTOR je nástupcom programu SBAS TeACHER, ktorý navyše dovoľuje pracovať so súbormi EMS, kde si užívateľ môže vybrať konkrétny časový úsek na rozdiel od jednej správy použiteľnej pre program SBAS TeACHER [42].

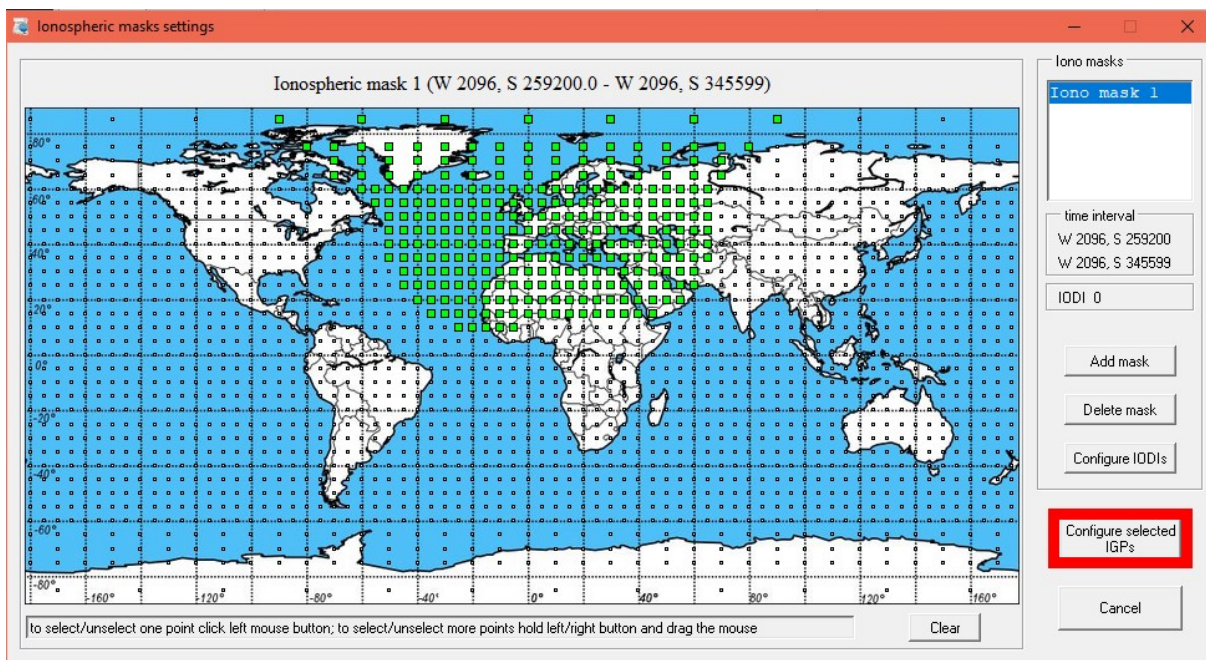
Po stiahnutí dát zo serveru EDAS FTP ich nahráme do programu cez tlačidlo „Load“ v časti SBAS Messages (Obr. 7-3, krok 1). Následne vyberieme, ktoré súbory EMS chceme nahráť a zaklikneme možnosť „Load files“. Nahrávanie trvá približne 2-3 minúty v závislosti na počte

vybraných súborov. Všetky súbory však musia mať rovnaké číslo PRN. Po nahrať súborov klikneme na tlačidlo „Iono mask dependent MT“ (obr. 7-3, krok 2).



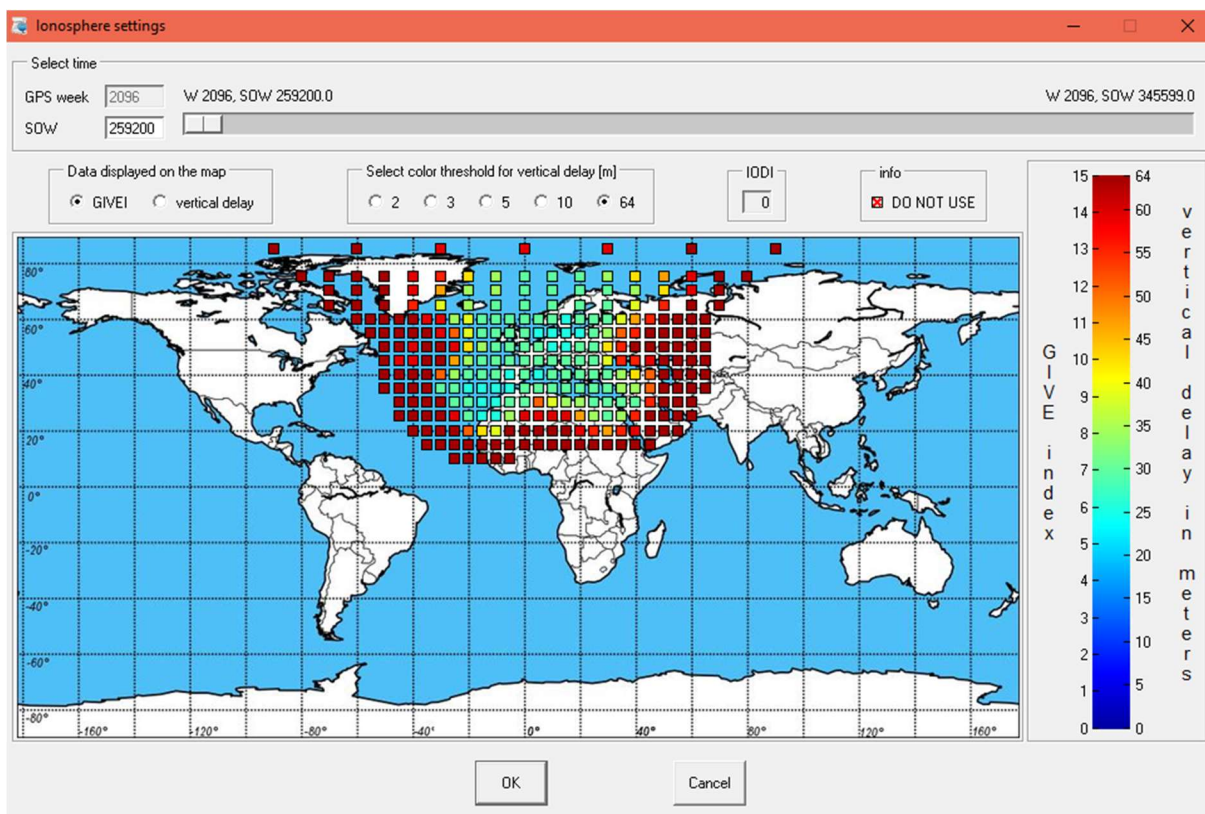
Obr. 7-3: Rozhranie programu SBAS MeNTOR

Po rozkliknutí „Iono mask dependent MT“ sa zobrazí nové okno (obr. 7-4). V tomto novom okne klikneme na možnosť „Configure selected IGPs“.



Obr. 7-4: SBAS MeNTOR

Po kliknutí na tlačidlo „Configure selected IGPs“ sa opäť zobrazí nové okno, v ktorom už vidíme všetky zvolené body IGP (obr. 7-5). Vo vrchnej časti okna sa nachádza časová os zvolených súborov EMS, po ktorej sa môžeme pohybovať. V časti Data displayed on the map si môžeme vybrať medzi zobrazením hodnoty GIVEI a vertikálnej chyby. Napravo od tejto časti sa nachádzajú rôzne úrovne vertikálneho oneskorenia, ktoré si užívateľ môže zvoliť. Po kliknutí na konkrétny bod IGP sa zobrazí nové okno grafu GIVEI, prípadne vertikálneho oneskorenia, podľa toho čo sme zvolili v časti Data displayed on the map. Tieto grafy môžeme vidieť v ďalšej časti tejto práce.



Obr. 7-5: SBAS MeNTOR, prehľad bodov IGP zvoleného časového úseku

Čas, ktorý je zobrazený v tabuľkách týchto dát je čas daného týždňa v sekundách. K presnému času UTC pre náš vybraný deň sa dostaneme nasledujúcim spôsobom:



Obr. 7-6: Príklad prepočtu času

1. Odpočítame počiatkový čas od vybraného času:

$$449280 - 432000 = 17280 \quad (7.1)$$

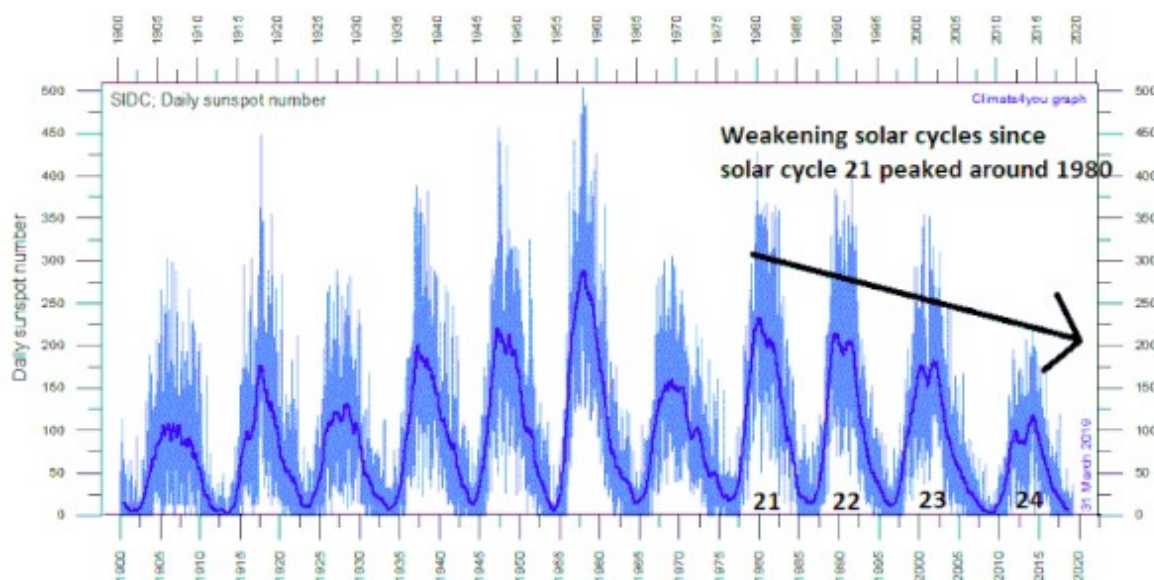
2. Výsledok vydělíme 3600 (sekundy na hodiny)

$$\frac{17280}{3600} = 4,8 = 4^{\circ}48' \quad (7.2)$$

To znamená, že čas 449 280 z tabuľky sú 4 hodiny a 48 minút UTC.

7.3 Praktické merania zobrazené pomocou Google Earth

Ako už bolo spomenuté v predchádzajúcich častiach práce, meranie prijímačom GNSS prebiehalo na stacionárnom mieste v panelákovom dome. Merania boli zahájené v januári 2020 a zaznamenaných bolo približne 200 hodín za 24 nameraných dní. Pre porovnanie meraní s ionosférickou aktivitou boli okrem indexov Kp použité hodnoty GIVEI a vertikálnej chyby bodu IGP situovaného nad Českou republikou so súradnicami 50N 15E. Momentálne sa nachádzame v minime slnečného cyklu, pričom svoje maximum dosiahol v roku 2015, kedy bolo zaznamenaných viacero solárnych búrok. Rok 2020 tvorí prechod 24. slnečného cyklu do 25. cyklu v poradí. Ďalšie maximum sa očakáva v roku 2025. Slnečná aktivita má však klesajúcu tendenciu a každý cyklus je od 21. cyklu v 80. rokoch 20. storočia slabší ako ten predchádzajúci.



Obr. 7-7: Slnečné cykly [40]

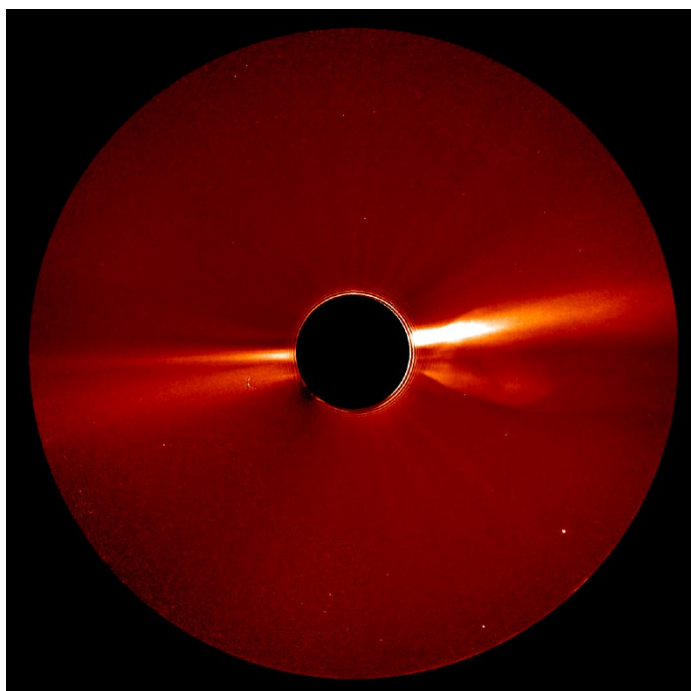
Použité indexy Kp sú v tejto práci v tvare podľa nasledujúcej tabuľky:

Tabuľka 7-1: Zápisy indexu Kp

0	0+	1-	1	1+	2-	2	2+	3-	3	3+	4-	4	4+	5-	5	5+
0	3	7	10	13	17	20	23	27	30	33	37	40	43	47	50	53

6-	6	6+	7-	7	7+	8-	8	8+	9-	9	9+
57	60	63	67	70	73	77	80	83	87	90	93

Dňa 6.1.2020 došlo k erupcii na Slnku a výronu koronálnej hmoty ako môžeme vidieť na obrázku 7-8. Táto erupcia sa prejavila zvýšeným indexom Kp počas nasledujúcich dní, pričom maximum bolo dosiahnuté 9.1.2020. Stále je to ale pomerne slabá erupcia v porovnaní s tými, ktoré nastali v období slnečného maxima.

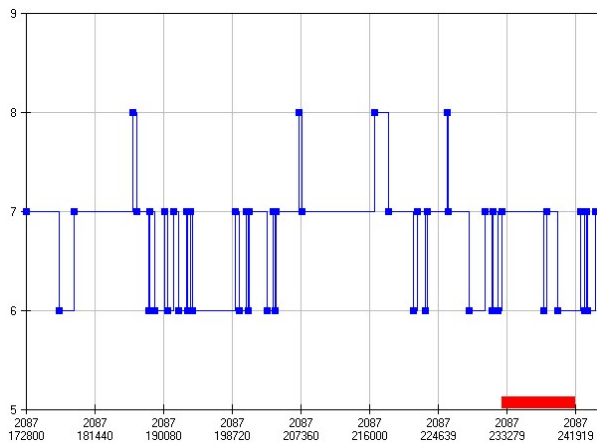


Obr. 7-8: Výron koronálnej hmoty zo dňa 6.1.2020 [24]

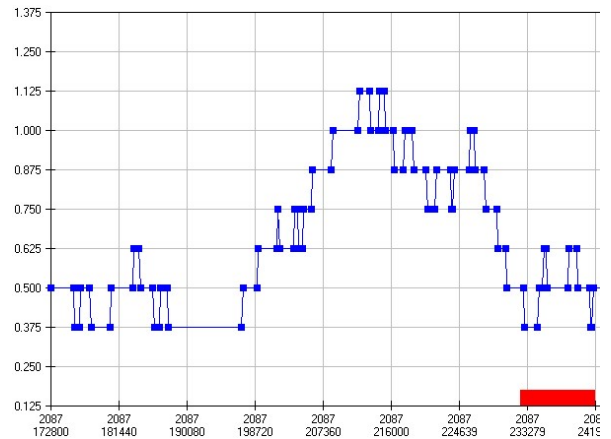
Tabuľka 7-2: Indexy Kp pre deň 7.1.2020 [41]

7.1.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	10	17	10	3	7	10	13	20	90

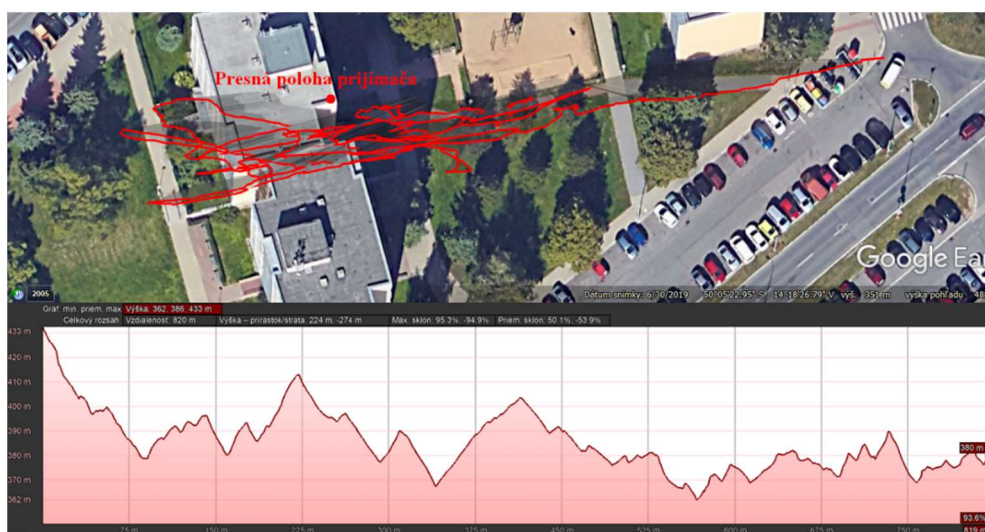
Prvé meranie bolo zaznamenané dňa 7.1.2020 od 16:26 UTC. Ako môžeme vidieť tabuľke, počas celého dňa neprebíhala žiadna výrazná slnečná aktivita, ktorá by pôsobila na zemskú magnetosféru. Maximálna chyba merania polohy nastala v čase 18:00, kedy bola nameraná poloha vzdialená od skutočnej o viac ako 90 metrov, pričom súčasne bola nameraná aj nadmorská výška až 433 metrov nad morom, teda až o viac ako 50 metrov vyššia ako skutočná.



Obr. 7-9: Hodnota GIVEI dňa 7.1.2020



Obr. 7-10: Hodnota vertikálnej chyby dňa 7.1.2020

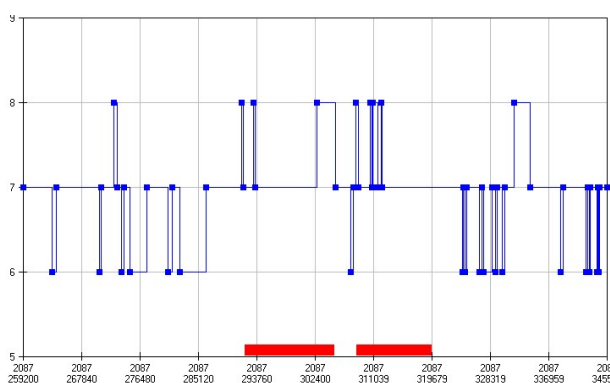


Obr. 7-11: Zobrazenie nameranej polohy dňa 7.1.2020 v čase 18:30

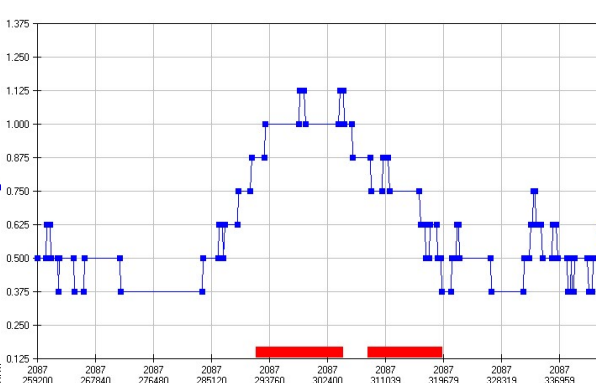
Tabuľka 7-3: Indexy Kp pre deň 8.1.2020 [41]

8.1.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	10	10	3	3	17	27	17	23	110

Dňa 8.1. bolo meranie spustené o 9. hodine UTC, výrazné chyby sa objavili už v čase medzi 9:45 a 9:50, kedy bola zaznamenaná odchýlka od 50 do 90 metrov od polohy prijímača. V ostatných časoch tohto merania, ako je možné vidieť na obrázku 7-14, bola zaznamenaná pomerne presná poloha vzhľadom na okolité prostredie. Maximum polohovej chyby počas druhého merania bolo zaznamenané v čase medzi 14:20 a 14:30 a neskôr v čase 15:20 s odchýlkou od skutočnej polohy o viac ako 80 metrov. V časoch medzi 15:00 a 18:00 boli taktiež zaznamenané pomerne veľké chyby, a to do vzdialenosti 50 metrov. Vo všetkých týchto prípadoch bola zaznamenaná aj chyba v nadmorskej výške, a to približne o 20 metrov smerom nahor.



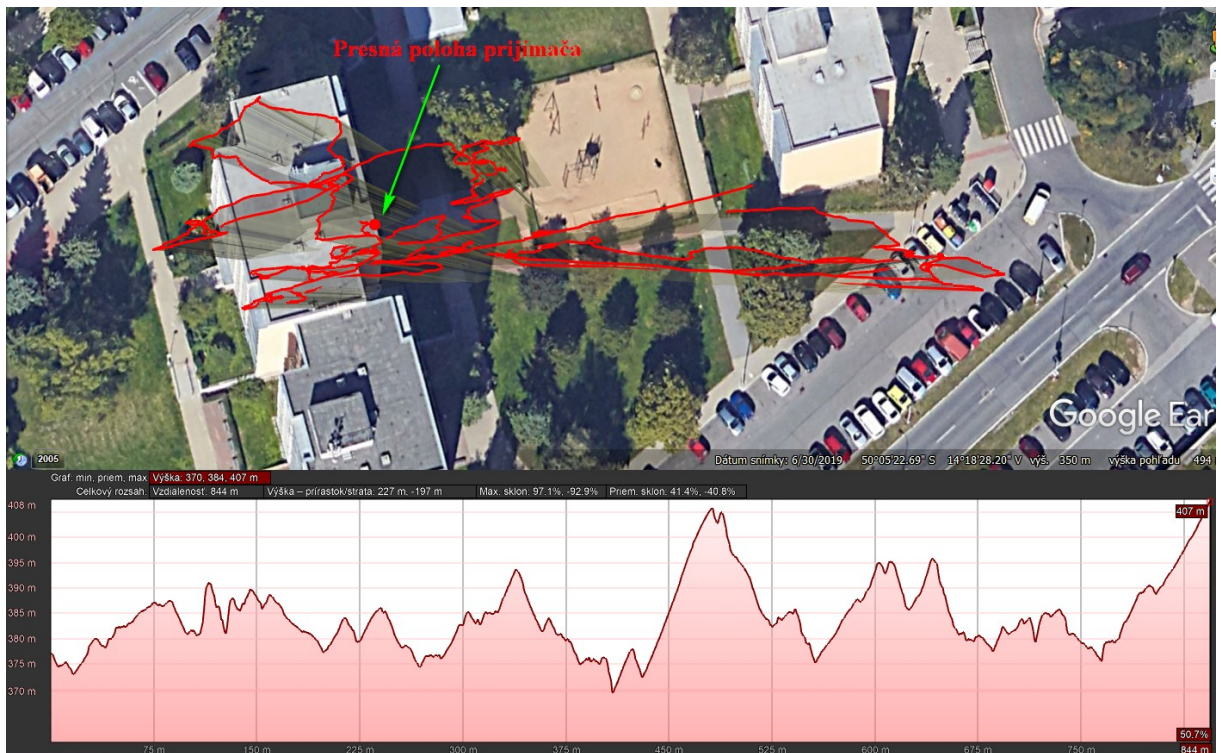
Obr. 7-12: Hodnota GIVEI dňa 8.1.2020



Obr. 7-13: Hodnota vertikálnej chyby dňa 8.1.2020



Obr. 7-14: Zobrazenie nameranej polohy dňa 8.1.2020 v čase 12:40

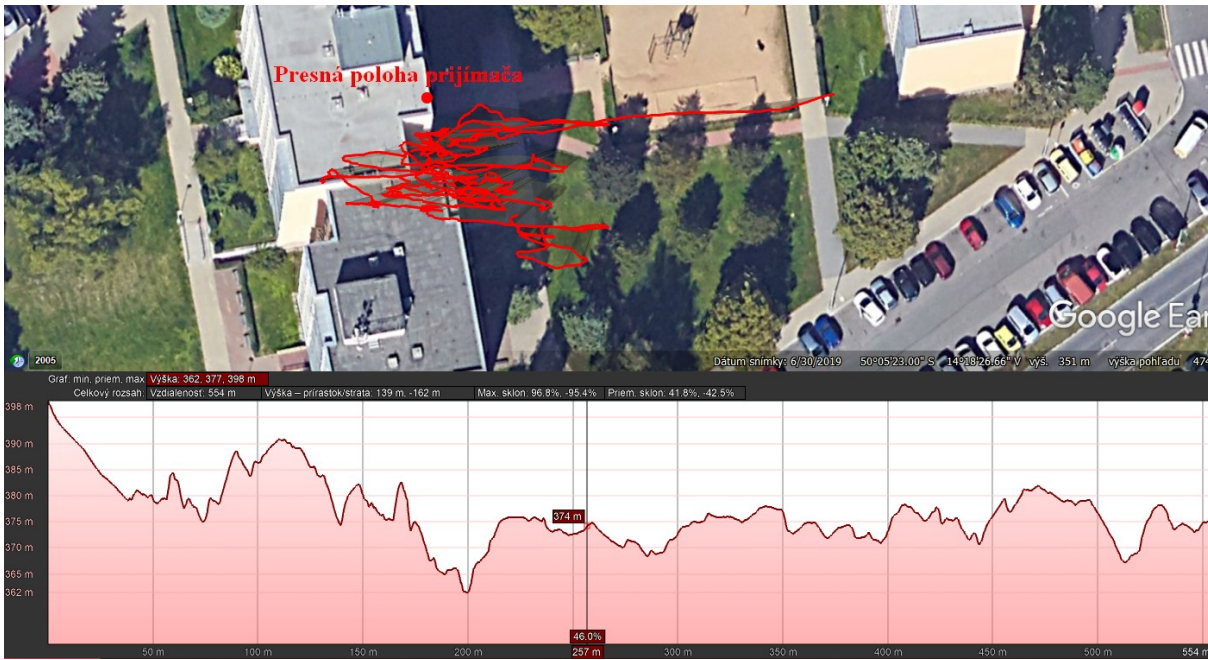


Obr. 7-15: Zobrazenie nameranej polohy dňa 8.1.2020 v čase 14:30

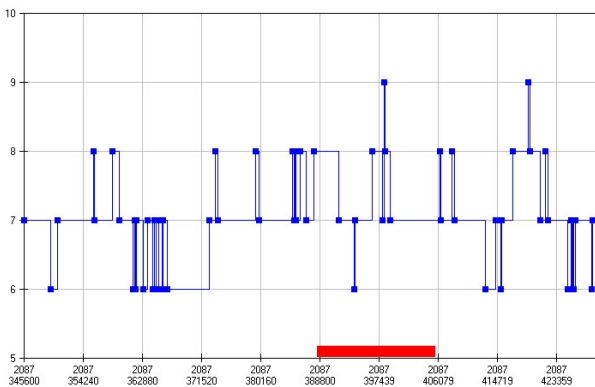
Tabuľka 7-4: Indexy Kp pre deň 9.1.2020 [41]

9.1.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	27	30	37	23	17	23	23	17	197

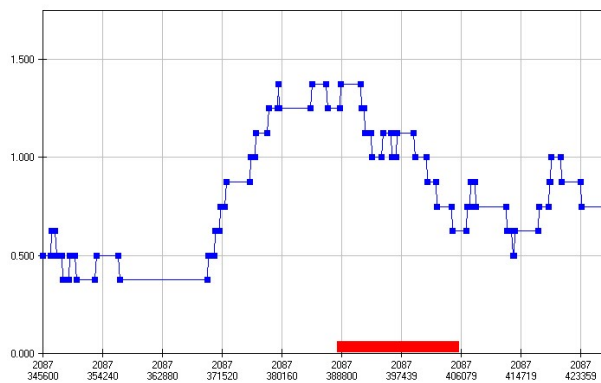
Dňa 9.1. ešte viac vystúpili hodnoty indexu Kp, čo sa prejavilo aj na zvýšenej úrovni hodnoty GIVEI a vertikálnej chyby bodu IGP situovaného nad územím ČR. Merania v tento deň prebiehali v čase od 11:52 a počas takmer celého meraného časového úseku neboli zaznamenané výrazne odchýlky a nameraná poloha a nadmorská výška boli pomerne presné s výnimkou v čase 15:30 a 16:30, kedy nameraná poloha uskočila o 40 metrov. Celkovo boli ale merania omnoho presnejšie ako počas predchádzajúcich dvoch dní.



Obr. 7-16: Zobrazenie nameranej polohy dňa 9.1.2020 v čase 15:30



Obr. 7-17: Hodnota GIVEI dňa 9.1.2020



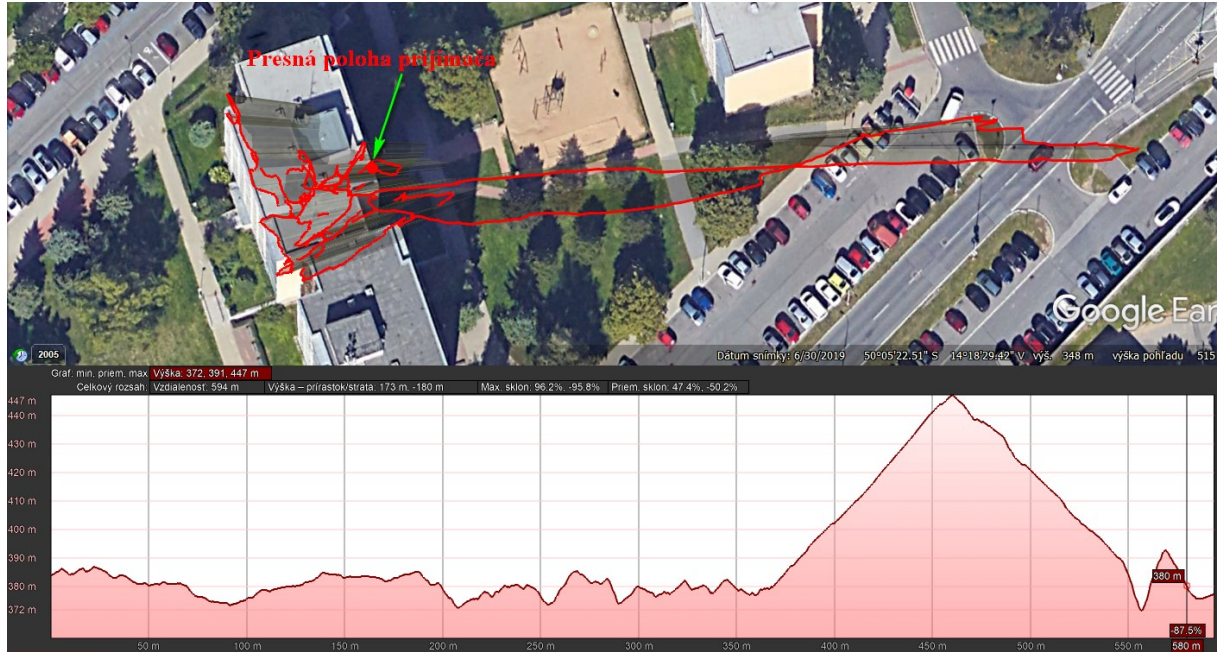
Obr. 7-18: Hodnota vertikálnej chyby dňa 9.1.2020

Tabuľka 7-5: Indexy Kp pre deň 10.1.2020 [41]

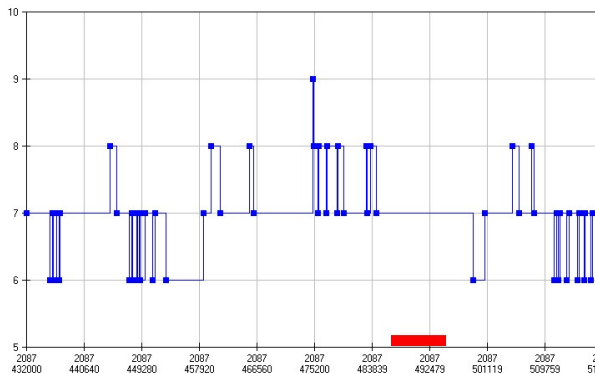
10.1.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kp	10	7	23	23	17	17	13	7	117

Počas dňa 10.1.2020 sa indexy Kp začali opäť znižovať a s nimi aj hodnota GIVEI a hodnota vertikálnej chyby. Výraznejšie hodnoty nadobudli približne v čase 12:00. Merania boli tohto dňa zahájené o 15. hodine, prvých približne 45 minút bolo určenie polohy pomerne nepresné s chybou okolo 30 metrov. Neskôr sa určená poloha stabilizovala ako je možné vidieť na

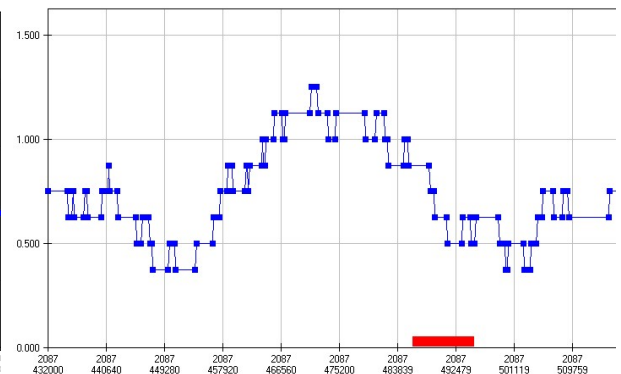
obrázku 7-19. Výraznejšia chyba nastala v čase 16:20, kedy bola nameraná poloha vzdialená od skutočnej až 80 metrov a nameraná nadmorská výška dosiahla hodnotu 447 metrov nad morom. V tomto čase však hodnoty GIVEI ani vertikálnej chyby IGP nenadobúdali žiadne nezvyklé hodnoty.



Obr. 7-19: Zobrazenie nameranej polohy dňa 10.1.2020 v čase 16:10



Obr. 7-20: Hodnota GIVEI dňa 10.1.2020

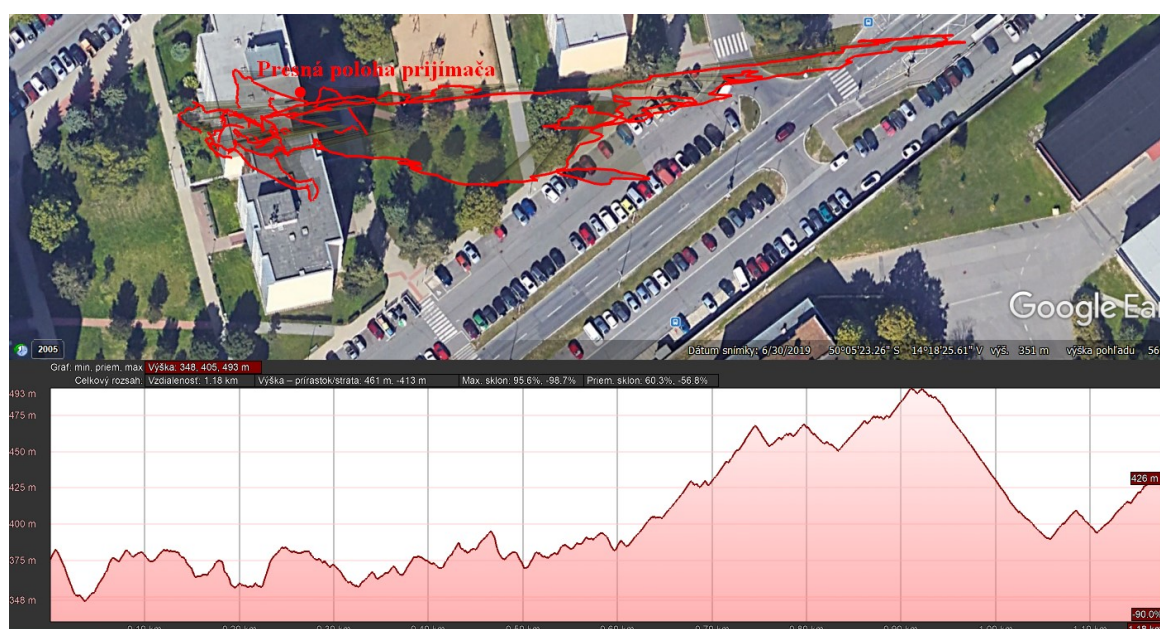


Obr. 7-21: Hodnota vertikálnej chyby dňa 10.1.2020

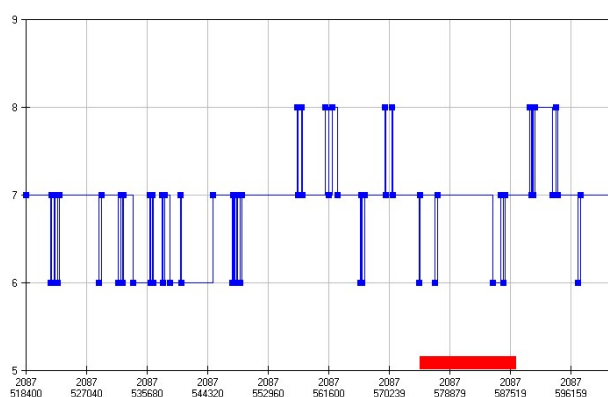
Tabuľka 7-6: Indexy Kp pre deň 11.1.2020 [41]

11.1.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	20	23	20	13	3	13	3	7	103

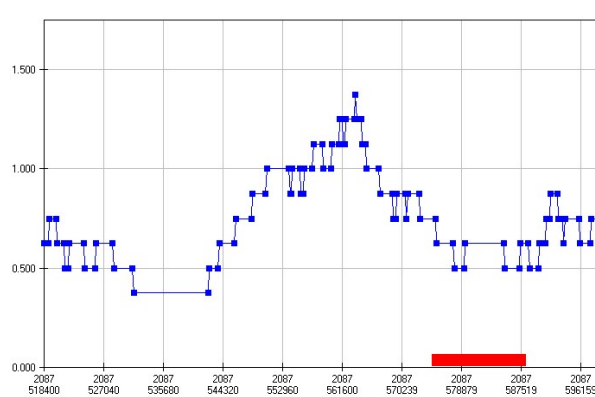
Podobne ako predchádzajúci deň, aj 11.1. boli namerané nízke hodnoty indexu Kp, ktoré sa v priebehu dňa ešte znižovali. Merania v tento deň začali v čase 15:30, kedy sa hodnoty GIVEI a vertikálnej chyby držali na konštantnej úrovni, ktorá nebola nijak výrazná. Presnosť nameranej polohy sa pohybovala počas takmer celej meranej časti v rozmedzí od 10 do 25 metrov až do času 19:30, kedy nameraná poloha bola vzdialená od skutočnej až o 80 metrov. Nadmorská výška nameraná prijímačom v tomto prípade dosiahla až 493 metrov nad morom, čo je o viac ako 100 metrov vyššie ako skutočná nadmorská výška prijímača.



Obr. 7-22: Zobrazenie nameranej polohy dňa 11.1.2020 v čase 19:30



Obr. 7-23: Hodnota GIVEI dňa 11.1.2020

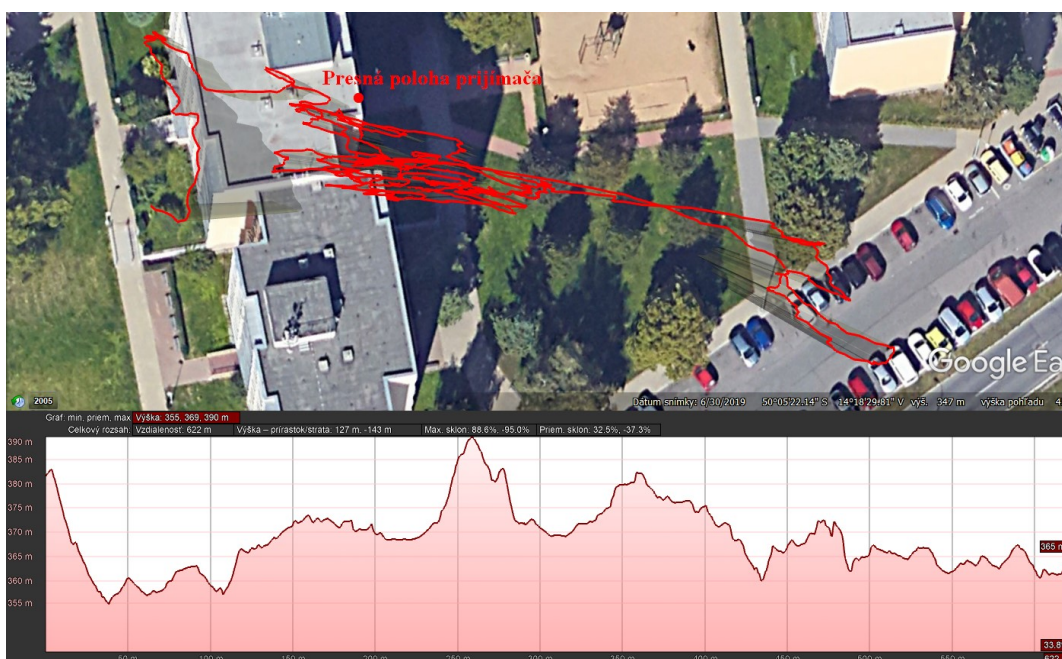


Obr. 7-24: Hodnota vertikálnej chyby dňa 11.1.2020

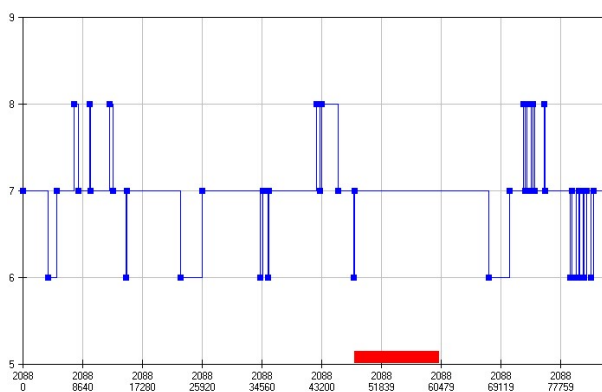
Tabuľka 7-7: Indexy Kp pre deň 12.1.2020 [41]

12.1.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	10	17	7	3	3	0	0	3	43

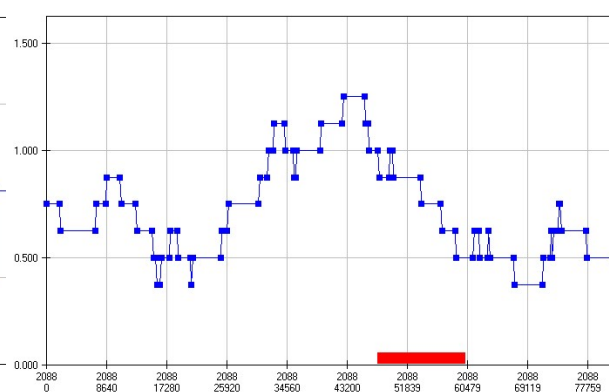
Dňa 12.1. došlo ešte k ďalšiemu zníženiu hodnôt indexu Kp, ktorý sa od 15. hodiny UTC dokonca dostal na hodnotu 0. Merania boli začaté v čase 13:08. Chyba nameranej polohy bola počas tohto obdobia stabilná do vzdialenosti približne 20 metrov, medzi 15. a 16. hodinou dochádzalo k pravidelným väčším nepresnostiam podobným tej na obrázku 7-25, kedy chyby nameranej polohy dosahovali odchýlky okolo 40 metrov a hodnoty nadmorskej výšky počas tohto merania ukazovali výšku nižšiu ako skutočnú pohybujúcu sa od 355 do 375 metrov nad morom.



Obr. 7-25: Zobrazenie nameranej polohy dňa 12.1.2020 v čase 15:15



Obr. 7-26: Hodnota GIVEI dňa 12.1.2020



Obr. 7-27: Hodnota vertikálnej chyby dňa 12.1.2020

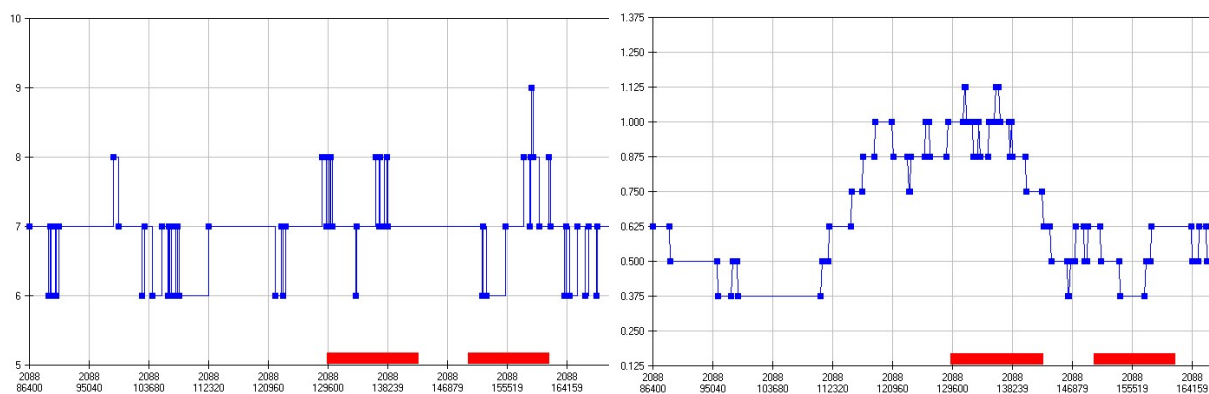
Tabuľka 7-8: Indexy Kp pre deň 13.1.2020 [41]

13.1.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	3	7	3	3	3	0	7	7	33

Dňa 13.1. boli hodnoty indexu Kp opäť na minimálnych hodnotách počas celého dňa, hodnota GIVEI sa poväčšine držala na čísle 7 a hodnoty vertikálnej chyby nepresiahli úroveň 1,125 m. Prvé meranie začalo krátko pred 12. hodinou a neprineslo výraznejšie polohové odchýlky. Nadmorská výška nameraná prijímačom sa pohybovala v rozmedzí od 370 do 390 metrov nad morom.



Obr. 7-28: Zobrazenie nameranej polohy dňa 13.1.2020 v čase 18:30



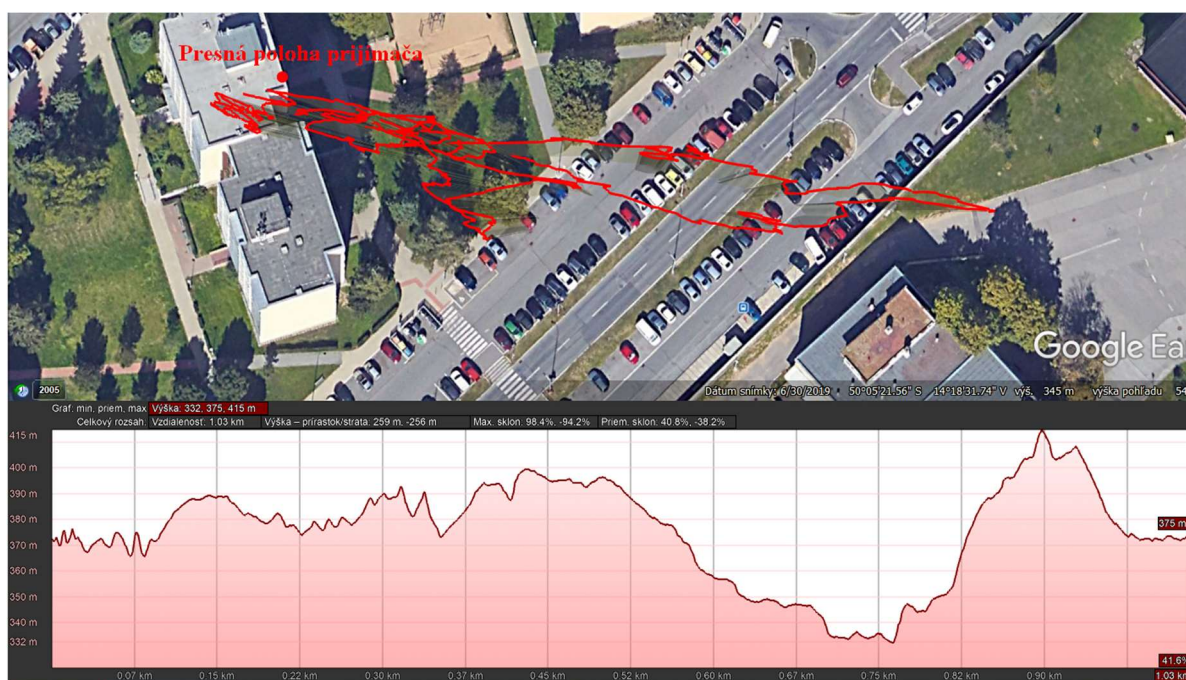
Obr. 7-29: Hodnota GIVEI dňa 13.1.2020

Obr. 7-30: Hodnota vertikálnej chyby dňa 13.1.2020

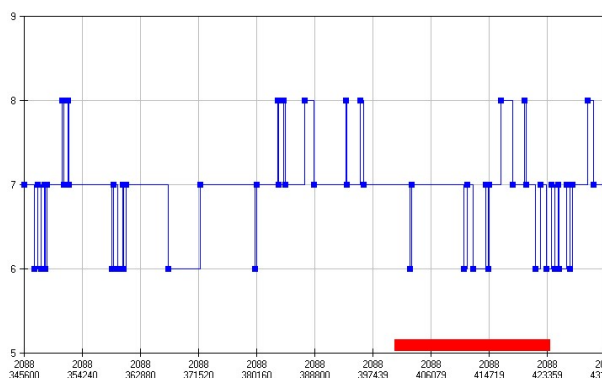
Tabuľka 7-9: Indexy Kp pre deň 16.1.2020 [41]

16.1.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	7	23	17	13	7	7	3	3	80

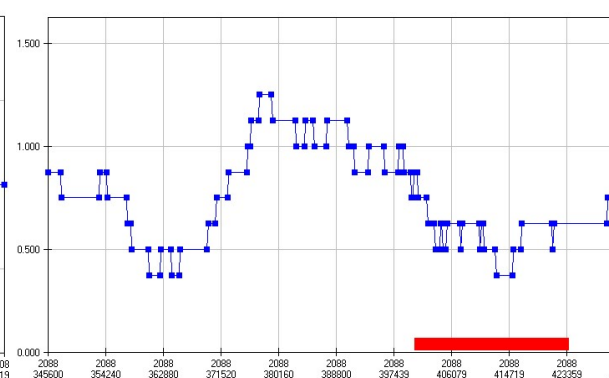
Dňa 16.1.2020 došlo v dopoludňajších hodinách k zvýšeniu indexu Kp a od 12. hodiny k jeho opätovnému poklesu. Meranie bolo zahájené v čase 15:47, počas tohto obdobia boli hodnoty GIVEI a vertikálnej chyby na svojej obvyklej úrovni bez výraznejšej zmeny. Od začiatku meraní bola nameraná poloha pomerne správna s odchýlkou okolo 10, maximálne 20 metrov. V čase 21:05 došlo k výraznejšej odchýlke, ktorá dosiahla až 114 metrov, pričom ale hodnota nadmorskej výšky stúpala len o 10 metrov oproti skutočnej, no následne pri približovaní sa nameranej polohy k skutočnej klesala až do úrovne 332 metrov nad morom.



Obr. 7-31: Zobrazenie nameranej polohy dňa 16.1.2020 v čase 21:05



Obr. 7-32: Hodnota GIVEI dňa 16.1.2020

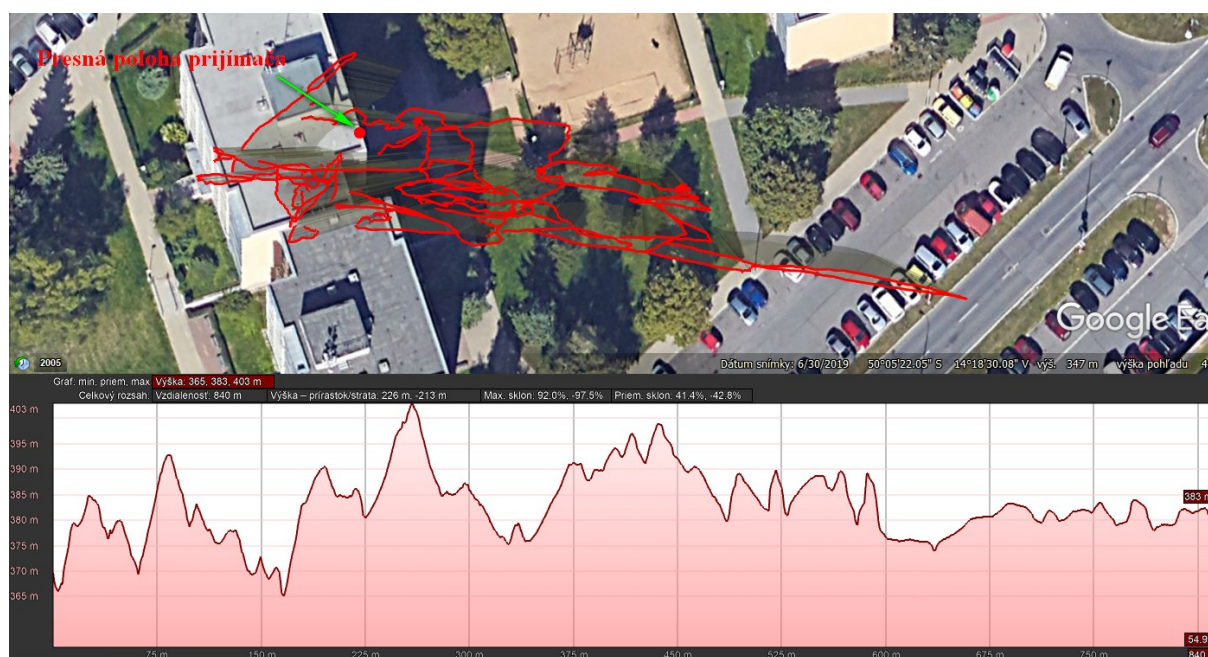


Obr. 7-33: Hodnota vertikálnej chyby dňa 16.1.2020

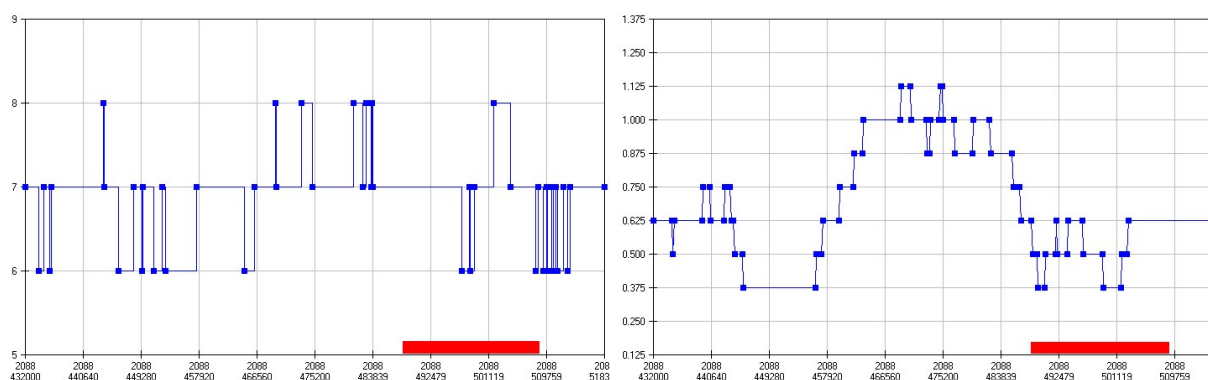
Tabuľka 7-10: Indexy Kp pre deň 17.1.2020 [41]

17.1.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	7	3	3	0	3	13	10	3	43

17.1.2020 došlo opäť k zníženiu indexu Kp, hodnoty GIVEI a hodnoty vertikálnej chyby neboli nijak výrazné. Meranie bolo začaté v čase 15:45, výraznejšia odchýlka nastala v čase 18:00 s nameranou polohou vzdialenou 70 metrov od skutočnej polohy prijímača, nameraná nadmorská výška však v tomto okamihu bola úplne presná. Od približne 20. hodiny boli zaznamenané častejšie odchýlky polohy približne o 40 – 50 metrov. Hodnoty indexu Kp sa v tomto čase však držali na nízkej úrovni podobne ako GIVEI a hodnota vertikálnej chyby.



Obr. 7-34: Zobrazenie nameranej polohy dňa 17.1.2020 v čase 18:00



Obr. 7-35: Hodnota GIVEI dňa 17.1.2020

Obr. 7-36: Hodnota vertikálnej chyby dňa 17.1.2020

Tabuľka 7-11: Indexy Kp pre deň 18.1.2020 [41]

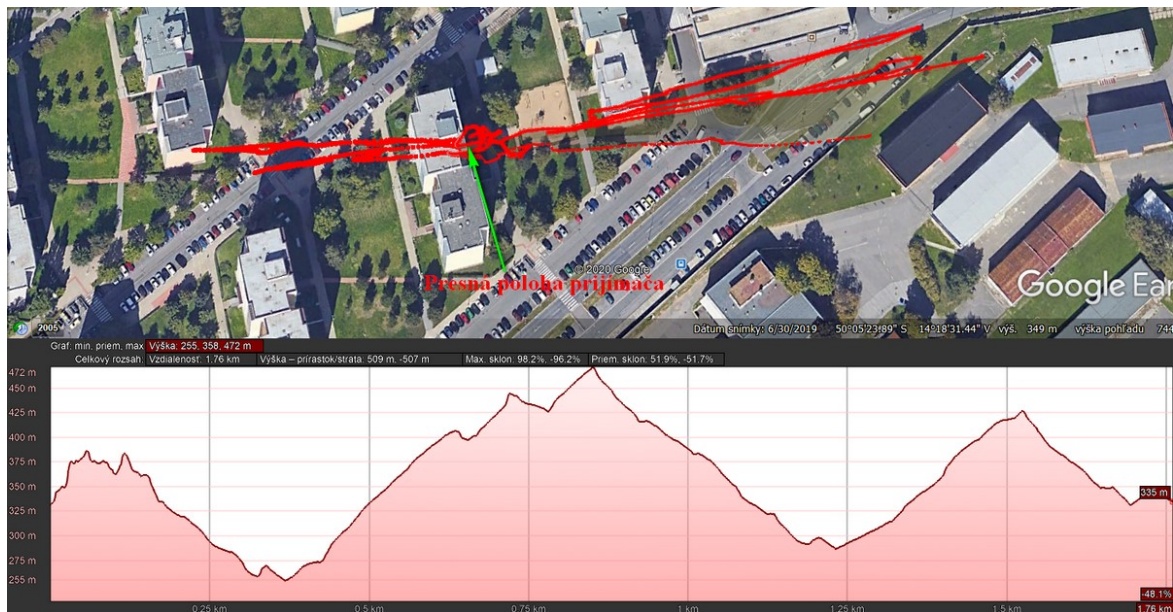
18.1.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	17	17	7	0	3	0	0	3	47

Deň 18.1. bol opäť bez výraznej aktivity, hodnoty indexu Kp boli spočiatku mierne zvýšené, no od 9. hodiny boli minimálne. Hodnoty GIVEI a vertikálnej chyby IGP sa opäť držali na svojich štandardných hodnotách. Meranie bolo spustené v čase 11:49 a od jeho začiatku približne do 12:30 bola nameraná poloha spolu s nameranou nadmorskou výškou výrazne odlišná od skutočnej, pričom index Kp bol na hodnote 0 a neskôr na hodnote 3. Neskôr sa nameraná poloha stabilizovala v rozmedzí 25 metrov od skutočnej.

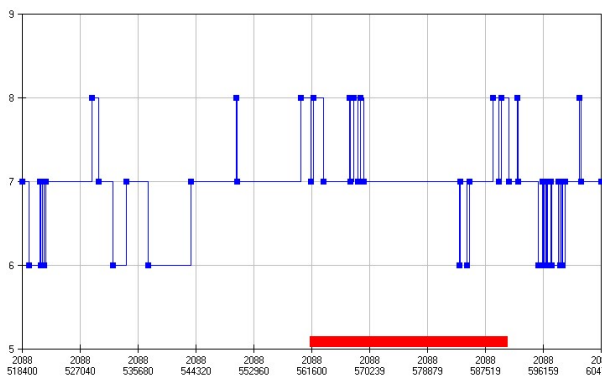


Obr. 7-37: Zobrazenie nameranej polohy dňa 18.1.2020 v čase 12:30

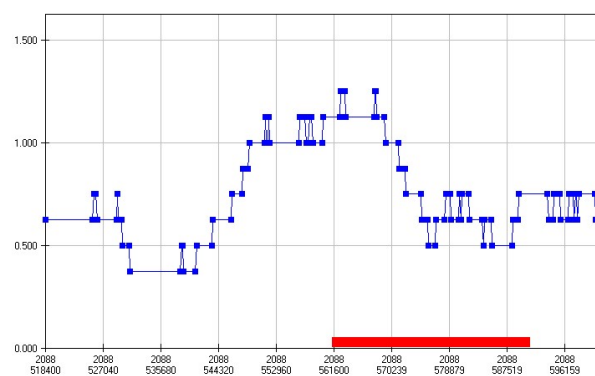
V čase medzi 14:00 a 14:45 (obr. 7-38) bola nameraná poloha vzdialená od skutočnej polohy prijímača vzdialená v niektorých okamihoch až 200 metrov, pričom aj hodnota nadmorskej výšky kolísala v rozmedzí +/- 100 metrov. Index Kp bol v tom čase na hodnote 3. V nasledujúcich hodinách merania polohová chyba naďalej prudko kolísala s občasným ustálením na hodnotách okolo 25 metrov, ale boli ešte zaznamenané ďalšie štyri výrazné zmeny v nameranej polohe s odchýlkou od 50 do 70 metrov.



Obr. 7-38: Zobrazenie nameranej polohy dňa 18.1.2020 v čase 14:00 – 14:45



Obr. 7-39: Hodnota GIVEI dňa 18.1.2020



Obr. 7-40: Hodnota vertikálnej chyby dňa 18.1.2020

Tabuľka 7-12: Indexy Kp pre deň 19.1.2020 [41]

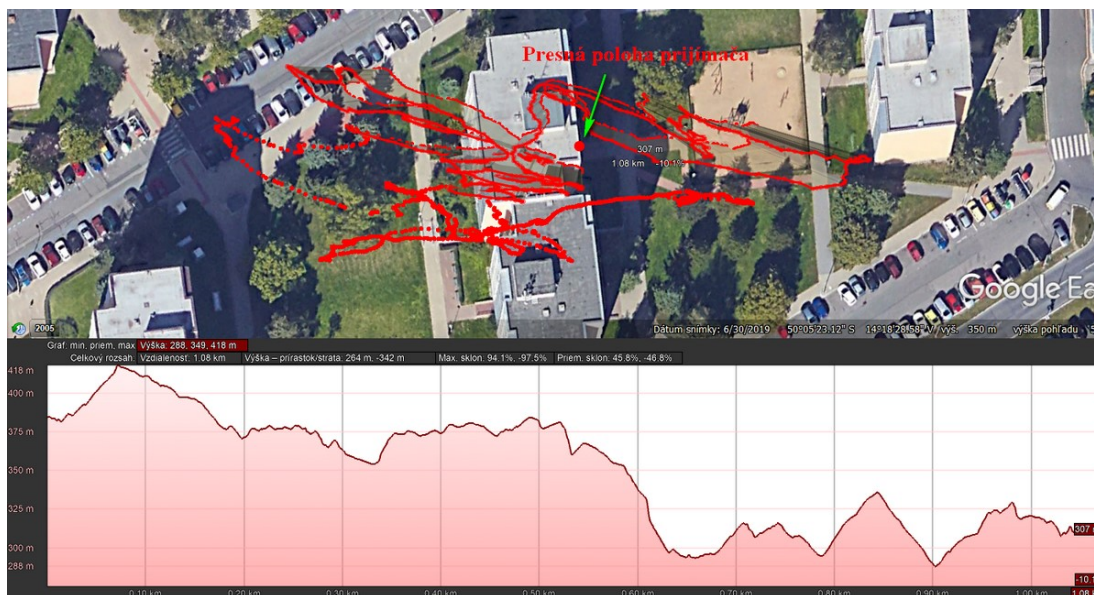
19.1.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	0	7	0	0	0	3	0	0	10

Dňa 19.1.2020 bol index Kp väčšinu času na hodnote 0, čo znamená, že v našej magnetosfére neboli zachytené skoro žiadne narušenia. Meranie v tento deň začalo v čase 11:33, poloha nameraná prijímačom bola stabilná v rozmedzí 10 – 20 metrov od presnej polohy prijímača až do 14. hodiny, kedy začala byť chyba výraznejšia, vid'. obr. 7-42, a dosiahla maximálnu

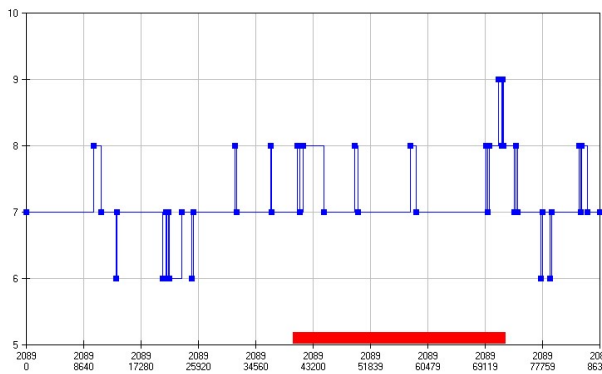
hodnotu 65 metrov. V čase od 18:50 do 19:05 bola zaznamenaná ďalšia séria väčších odchýlok od skutočnej polohy prijímača ako je možné vidieť na obrázku 7-41. Chyba oproti polohe prijímača dosiahla hodnoty 50 – 60 metrov pričom počas celého tohto časového úseku kolísala v tomto rozmedzí. Spolu s chybou v polohe kolísala aj nameraná nadmorská výška, ktorá dosiahla svoje minimum o 100 metrov nižšie ako skutočná nadmorská výška prijímača. Po 19:05 sa meranie polohy stabilizovalo na úrovni chyby od 10 do 20 metrov.



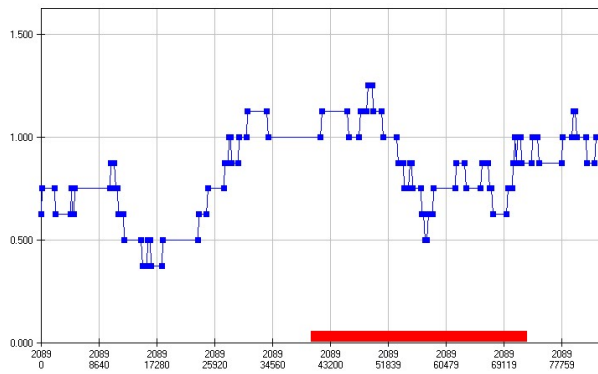
Obr. 7-41: Zobrazenie nameranej polohy dňa 19.1.2020 v čase 14:00



Obr. 7-42: Zobrazenie nameranej polohy dňa 19.1.2020 v čase 18:50 – 19:05



Obr. 7-43: Hodnota GIVEI dňa 19.1.2020



Obr. 7-44: Hodnota vertikálnej chyby dňa 19.1.2020

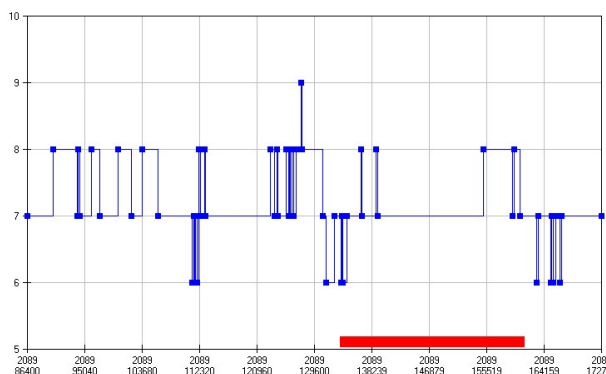
Tabuľka 7-13: Indexy Kp pre deň 20.1.2020 [41]

20.1.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	0	3	0	0	0	0	3	0	7

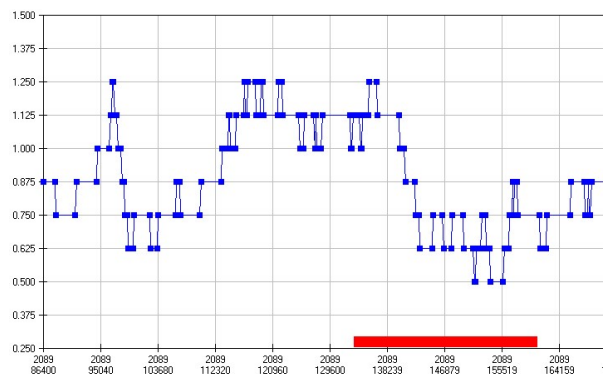
Nízke hodnoty indexu Kp boli zaznamenané aj nasledujúci deň, 20.1., kedy podobne ako deň predtým boli väčšinu času ustálené na hodnote 0. Merania v tento deň začali o 13:09 s polohovou chybou približne 30 metrov, ktorá sa v priebehu nasledujúcej hodiny ustálila v rozmedzí 15 – 25 metrov. V čase 14:40 došlo k prudkej zmene tejto chyby a chyba na krátky moment dosiahla až 50 metrov. Od 15:30 do 16:30 dochádzalo opäť k výraznejším zmenám v nameranej polohe, pričom chyba dosahovala približne 50 metrov. Ďalšia výrazná zmena nastala v čase 19:00 kedy polohová chyba dosiahla hodnotu až 90 metrov a nameraná nadmorská výška narástla o takmer 100 metrov. Po zvyšku merania sa nameraná hodnota prijímača pohybovala do vzdialenosti 25 metrov od skutočnej. Počas celého úseku merania nedosiahli hodnoty GIVEI ani hodnoty vertikálnej chyby žiadne výrazné hodnoty.



Obr. 7-45: Zobrazenie nameranej polohy dňa 20.1.2020 v čase 19:00



Obr. 7-46: Hodnota GIVEI dňa 20.1.2020



Obr. 7-47: Hodnota vertikálnej chyby dňa 20.1.2020

Tabuľka 7-14: Indexy Kp pre deň 21.1.2020 [41]

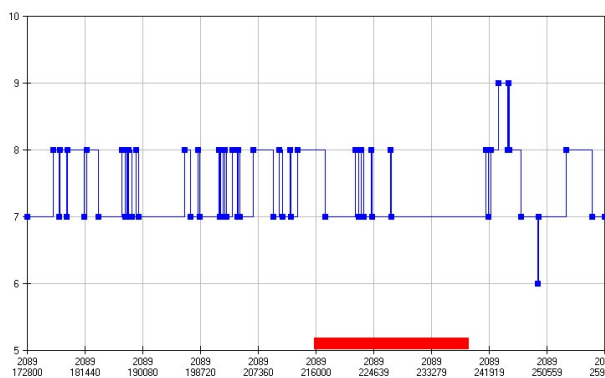
21.1.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	0	0	7	10	13	27	23	23	103

Merania boli dňa 21.1. zahájené v čase 11:50, od ich začiatku do 12:50 bola nameraná poloha odlišná od tej skutočnej o približne 15 metrov. Od času 12:50 až do 16:00 táto chyba dosahovala od 30 do 60 metrov. Ako je možné vidieť na obrázku 7-48, v čase 14:00 bola nameraná poloha veľmi nepresná s chybami až do 80 metrov a nameranou nadmorskou výškou pulzujúcou medzi hodnotami 400 a 436 metrov nad morom. V tomto čase index Kp,

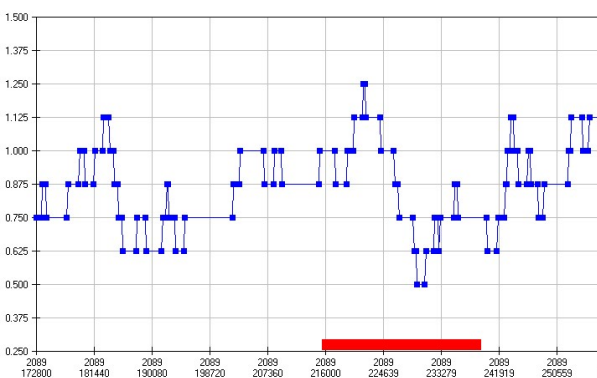
GIVEI a vertikálna chyba dosahovali mierne zvýšené hodnoty. Neskôr sa nameraná poloha líšila od skutočnej o približne 20 metrov.



Obr. 7-48: Zobrazenie nameranej polohy dňa 21.1.2020 v čase 14:00



Obr. 7-49: Hodnota GIVEI dňa 21.1.2020



Obr. 7-50: Hodnota vertikálnej chyby dňa 21.1.2020

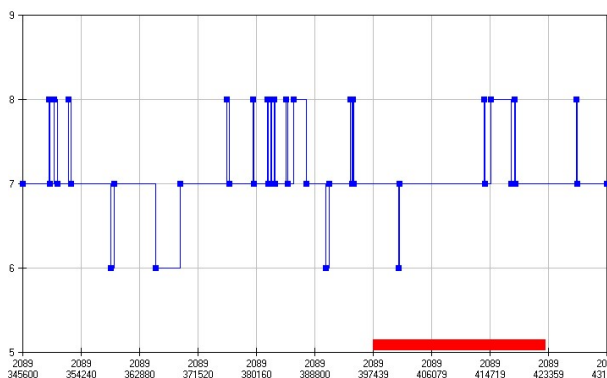
Tabuľka 7-15: Indexy Kp pre deň 23.1.2020 [41]

23.1.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	17	23	3	3	0	3	13	7	70

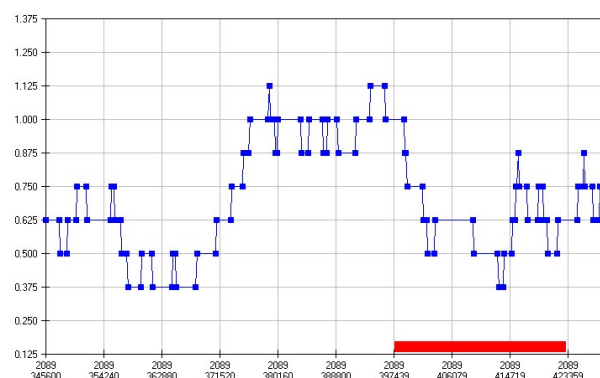
Dňa 23.1. opätovne poklesli indexy Kp, hodnoty GIVEI boli občasne miestami zvýšené na hodnotu 8 a hodnoty vertikálnej chyby neboli na žiadnych neobvyklých hodnotách. Meranie bolo začaté v čase 15:52 a od jeho začiatku až do 17:30 bola nameraná poloha nepresná oproti skutočnej v rozmedzí 10 – 20 metrov. V čase 17:30 táto chyba vystúpila na hodnotu 30 metrov, následne sa ustálila na vzdialenosti do 15 metrov a v čase 18:40 opäť narástla až na 50 metrov a chyba v nameranej nadmorskej výške dosiahla od -50 do +40 metrov oproti skutočnej. Približne v rovnakom čase došlo k zvýšeniu indexu Kp ako aj hodnoty GIVEI na 8 a miernemu nárastu vertikálnej chyby IGP, avšak stále pohybujúcej sa na úrovni pod 1 meter.



Obr. 7-51: Zobrazenie nameranej polohy dňa 23.1.2020 v čase 19:00



Obr. 7-52: Hodnota GIVEI dňa 23.1.2020



Obr. 7-53: Hodnota vertikálnej chyby dňa 23.1.2020

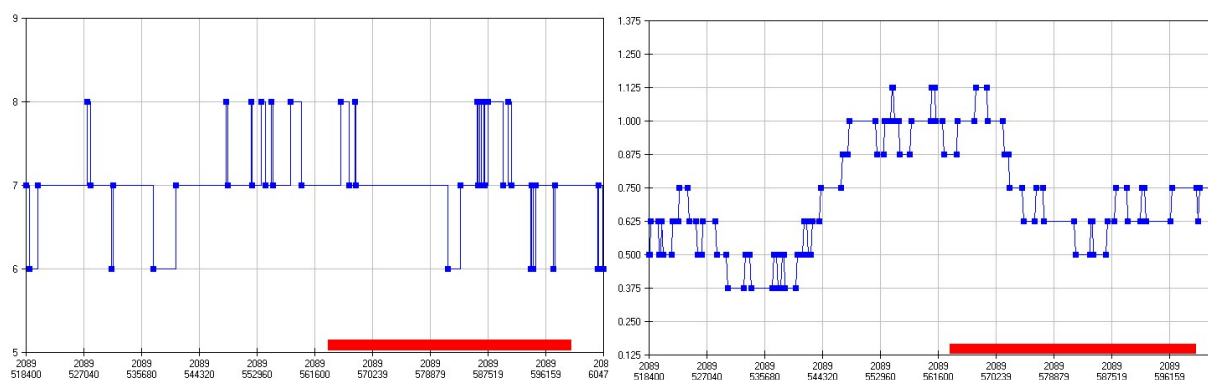
Tabuľka 7-16: Indexy Kp pre deň 25.1.2020 [41]

25.1.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	0	23	7	3	3	0	3	0	40

25.1. došlo k poklesu hodnoty indexu Kp a v priebehu dňa dosahoval veľmi nízke hodnoty. Meranie bolo začaté v čase 12:23 s chybou nameranej polohy, ktorá narástla na úroveň 50 metrov a približne od 13. hodiny sa ustálila na hodnote chyby 20 metrov. Od času 13:30 do 14:15 dochádzalo k výkyvom v nameranej polohe prijímača oproti skutočnej, a to až o 50 metrov (obr. 7-54). Nadmorská výška sa menila tiež pomerne výrazne, dostala sa až do maximálnej hodnoty 414 metrov nad morom. Neskôr sa presnosť nameranej polohy líšila od skutočnej približne o 25 metrov až do 19:45, kedy opäť na pár minút vystúpila na 50 metrov. Po zvyšok času sa táto chyba držala na úrovni 25 metrov.



Obr. 7-54: Zobrazenie nameranej polohy dňa 25.1.2020 v čase 14:00



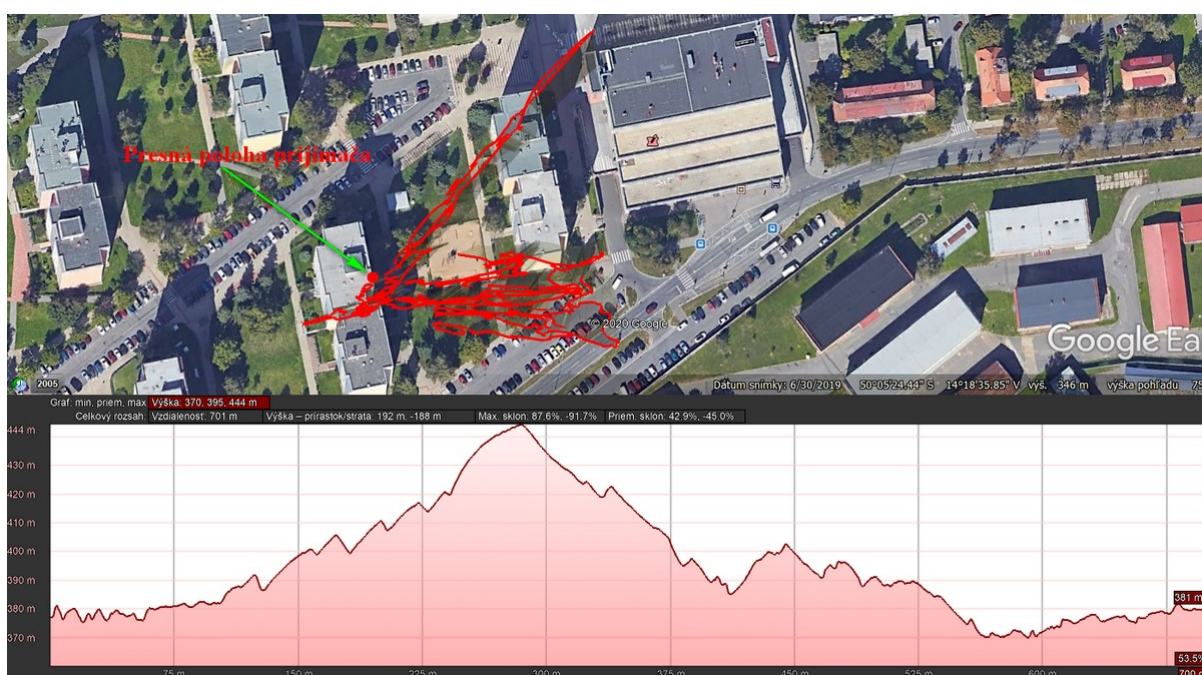
Obr. 7-55: Hodnota GIVEI dňa 25.1.2020

Obr. 7-56: Hodnota vertikálnej chyby dňa 25.1.2020

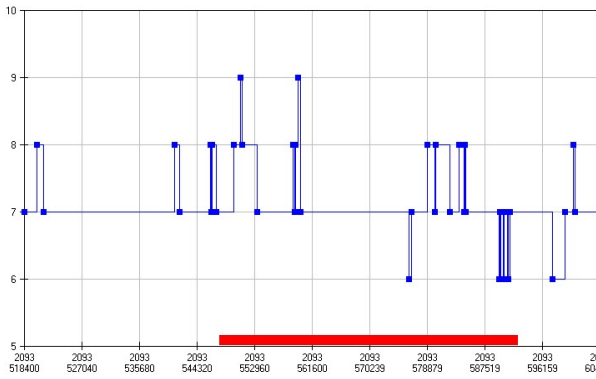
Tabuľka 7-17: Indexy Kp pre deň 22.2.2020 [41]

22.2.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	27	20	13	17	17	20	27	17	157

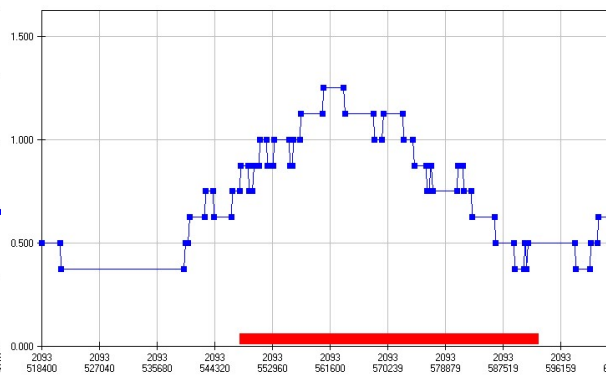
Dňa 22.2.2020 boli hodnoty indexu Kp mierne zvýšené, hodnota GIVEI sa na dva krátke momenty dostala na úroveň 9 a hodnota vertikálnej chyby IGP dosiahla maximum 1,25 metra. Meranie bolo začaté v čase 8:27 s počiatočnou chybou polohy oproti skutočnej polohe prijímača v rozmedzí 15 – 25 metrov. V čase 9:45 došlo k výraznejšej odchýlke nameranej polohy, ktorá dosiahla až 112 metrov a maximálnu nadmorskú výšku 444 metrov nad morom. V priebehu 10 minút sa nameraná poloha spresnila a až do 11:10 pohybovala do odchýlky 30 metrov od skutočnej polohy. V čase 11:20 sa táto chyba dočasne vyšplhala až na 60 metrov. V čase od 18:10 do 18:40 došlo k výraznejšiemu nárastu polohovej chyby, ktorá dosiahla 70 metrov.



Obr. 7-57: Zobrazenie nameranej polohy dňa 22.2.2020 v čase 9:45



Obr. 7-58: Hodnota GIVEI dňa 22.2.2020



Obr. 7-59: Hodnota vertikálnej chyby dňa 22.2.2020

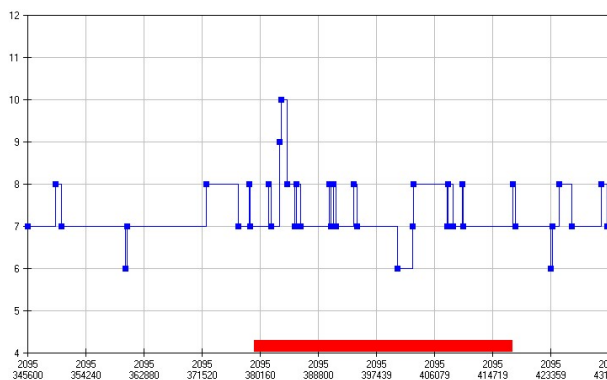
Tabuľka 7-18: Indexy Kp pre deň 5.3.2020 [41]

5.3.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	7	10	10	7	17	7	7	0	63

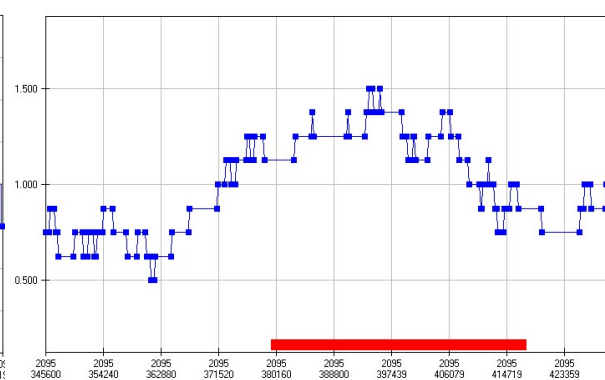
Dňa 5.3.2020 boli indexy Kp na nízkej úrovni, hodnota GIVEI sa dostala až na číslo 10 v čase približne 10:48. V tomto čase bolo však meranie polohy prijímačom pomerne presné ako je možné vidieť na obrázku 7-60. V ďalšom meraní došlo k občasnému nárastu chyby prijímača na 50 metrov a v čase od 16:30 si prijímač udržoval presnosť oproti skutočnej na hodnotách do 10 metrov s občasným krátkotrvajúcim výkyvom do 30 metrov.



Obr. 7-60: Zobrazenie nameranej polohy dňa 5.3.2020 v čase 10:50



Obr. 7-61: Hodnota GIVEI dňa 5.3.2020

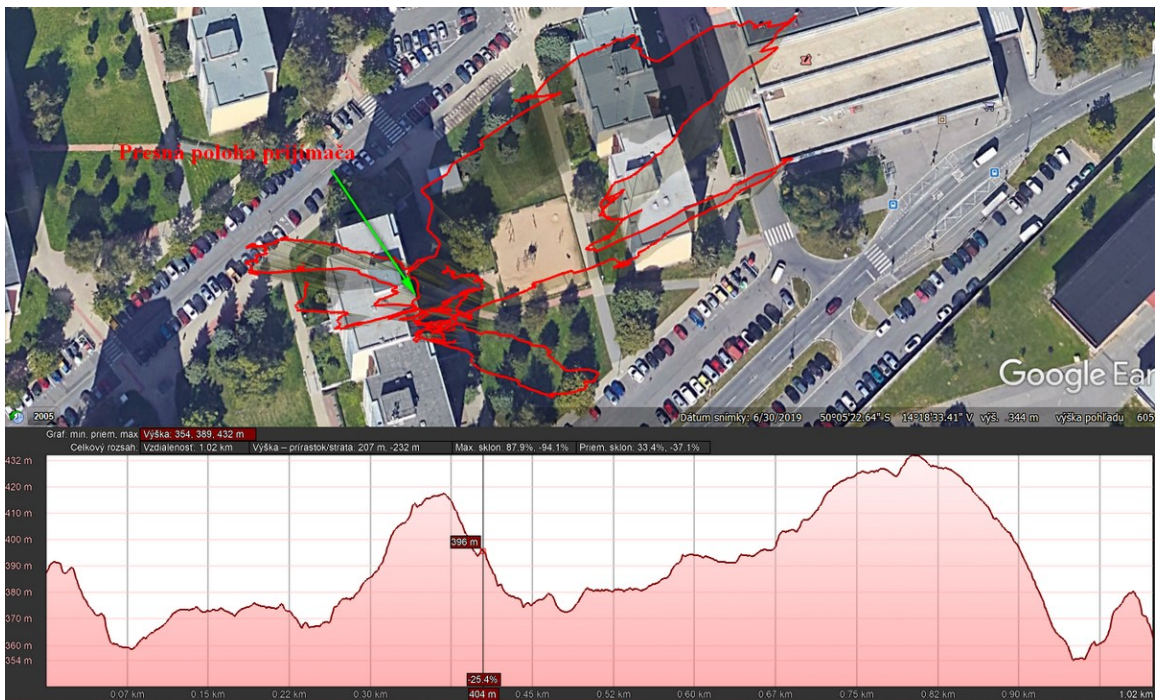


Obr. 7-62: Hodnota vertikálnej chyby dňa 5.3.2020

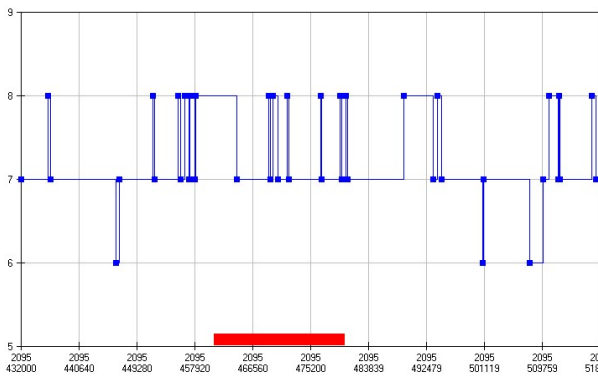
Tabuľka 7-19: Indexy Kp pre deň 6.3.2020 [41]

6.3.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	7	3	10	17	20	17	0	0	73

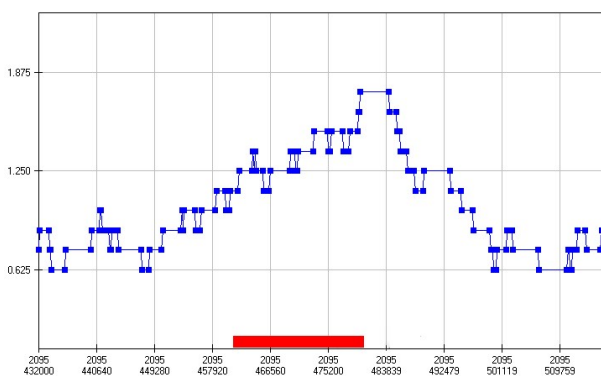
Počas dňa 6.3. došlo k miernemu nárastu a následnému poklesu hodnoty indexu Kp, hodnota GIVEI kolísala medzi hodnotami 7 a 8 a hodnota vertikálnej chyby sa dostala na úroveň 1,75 metra. Meranie bolo tento deň zahájené v čase 8:21 s chybou pohybujúcou sa do 25 metrov od skutočnej polohy prijímača, nárast chyby nastal v čase 9:30 a 10:15, kedy chyba dosiahla hodnotu 50 metrov. K ďalšiemu zväčšeniu chyby došlo v čase od 11:30 ako je možné vidieť na obrázku 7-63, nameraná poloha bola od skutočnej vzdialená až 124 metrov. V tomto čase zároveň došlo aj k maximálnej chybe v nadmorskej výške, ktorá dosiahla až 432 metrov nad morom.



Obr. 7-63: Zobrazenie nameranej polohy dňa 6.3.2020 v čase 11:30



Obr. 7-64: Hodnota GIVEI dňa 6.3.2020



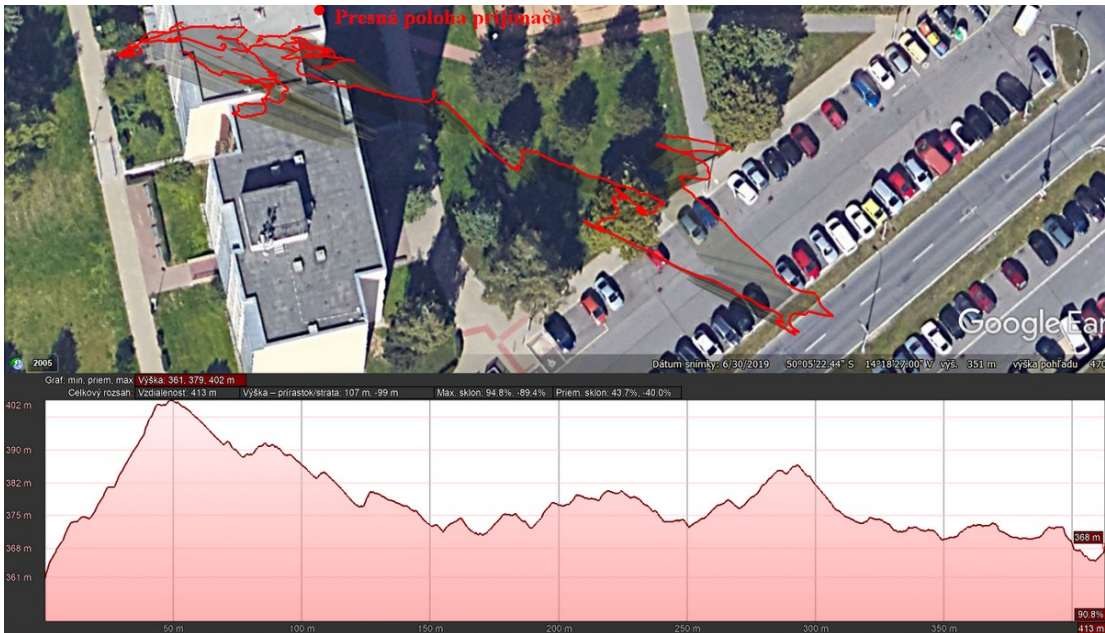
Obr. 7-65: Hodnota vertikálnej chyby dňa 6.3.2020

Tabuľka 7-20: Indexy Kp pre deň 7.3.2020 [41]

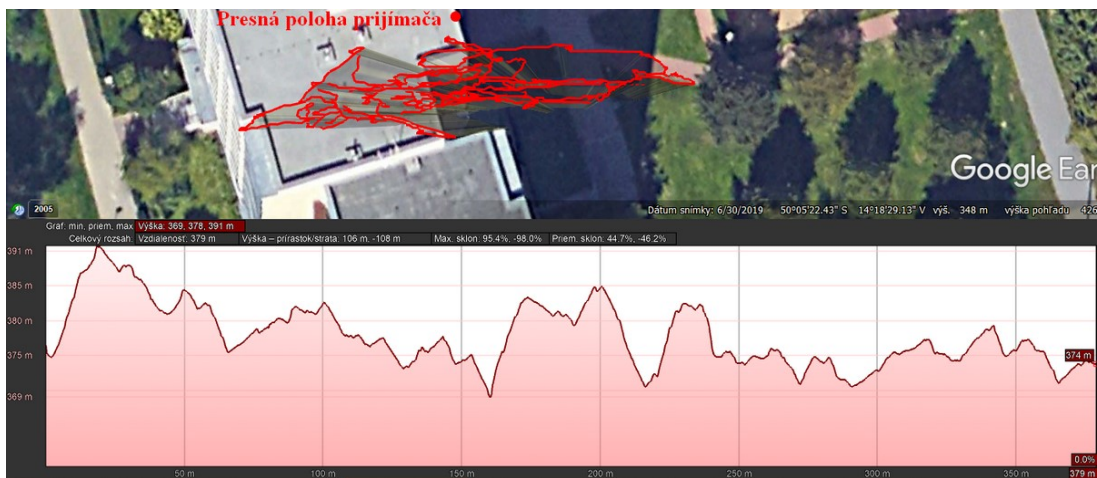
7.3.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	3	10	13	10	20	7	3	3	70

Dňa 7.3. si indexy Kp držali veľmi podobné hodnoty ako predchádzajúci deň, počas merania bol index na hodnote 3. Hodnoty GIVEI ani hodnoty vertikálnej chyby nedosahovali žiadne neobvyklé úrovne. Meranie bolo v tento deň začaté o 21. hodine, v čase 21:30 (obr. 7-66) došlo k výraznejšej chybe určenia polohy prijímačom, ktorá dosiahla približne 73 metrov a nameraná nadmorská výška sa dostala na hodnotu 402 metrov nad morom. Okrem tohto

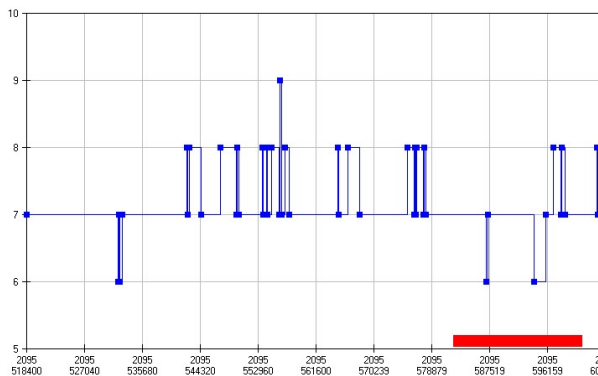
nárastu však po zvyšok merania nenastali žiadne výrazné zmeny, meranie bolo jedným z najpresnejších čo sa týka nameranej polohy.



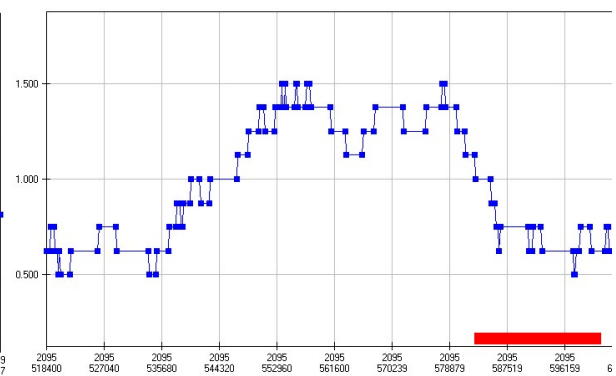
Obr. 7-66: Zobrazenie nameranej polohy dňa 7.3.2020 v čase 21:30



Obr. 7-67: Zobrazenie nameranej polohy dňa 7.3.2020 v čase 22:50



Obr. 7-68: Hodnota GIVEI dňa 7.3.2020



Obr. 7-69: Hodnota vertikálnej chyby dňa 7.3.2020

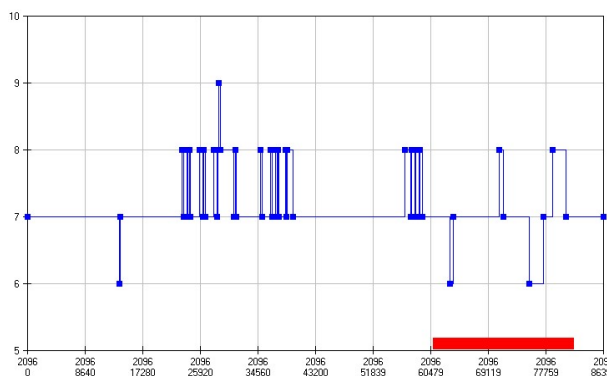
Tabuľka 7-21: Indexy Kp pre deň 8.3.2020 [41]

8.3.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	13	17	13	3	7	17	17	17	103

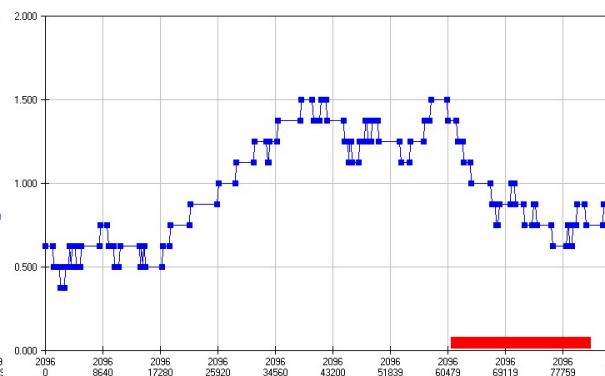
8.3.2020 opäť o niečo narástli indexy Kp, no stále sa držali na nízkych hodnotách. Hodnoty GIVEI a vertikálnej chyby boli na svojich bežných hodnotách, úroveň vertikálnej chyby si hodnotu 1,5 metra udržala o niečo dlhšie ako ostatné dni, no na vyššiu hodnotu sa nedostala. Meranie bolo v tento deň zahájené o 17:45, od začiatku merania prevládali chyby v rozsahu až do 50 metrov, v čase 19:05 došlo k výraznejšej chybe nameranej polohy prijímača, ktorá dosiahla až 100 metrov, pričom nameraná nadmorská výška dosahovala konštantne hodnoty výrazne vyššie ako skutočná. Od tohto momentu bola nameraná poloha veľmi presná, podobne ako počas predchádzajúceho dňa, pričom dosahovala chybu do 10 metrov s jedným momentom, kedy vystúpila na 25 metrov.



Obr. 7-70: Zobrazenie nameranej polohy dňa 8.3.2020 v čase 19:05



Obr. 7-71: Hodnota GIVEI dňa 8.3.2020



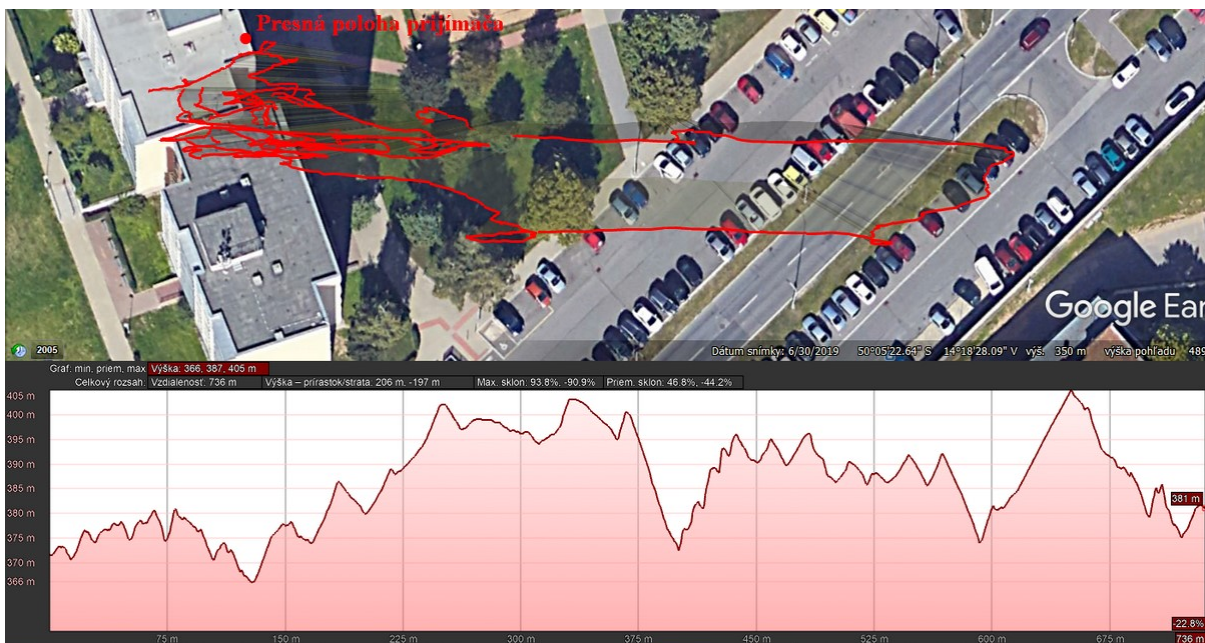
Obr. 7-72: Hodnota vertikálnej chyby dňa 8.3.2020

Tabuľka 7-22: Indexy Kp pre deň 9.3.2020 [41]

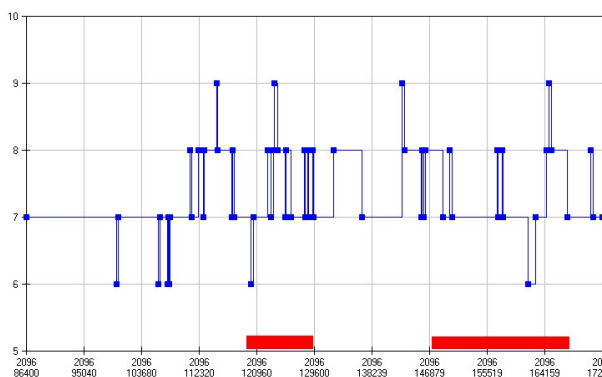
9.3.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	7	20	17	7	10	13	17	10	100

Dňa 9.3. dosahoval index Kp podobné hodnoty ako predchádzajúci deň, hodnota GIVEI sa v štyroch krátkych momentoch dostala na číslo 9 a hodnota vertikálnej chyby opäť dosiahla 1,5 metra. Meranie bolo zahájené v čase 9:05, k väčšej chybe došlo už v čase 10:20, nepresnosť nameranej polohy bola oproti skutočnej až 80 metrov, nameraná nadmorská výška sa pohybovala v rozmedzí +/- 20 výškových metrov. V rovnakom čase došlo aj k nárastu hodnoty GIVEI na číslo 9, index Kp bol na hodnote 7. K ďalšej ešte výraznejšej chybe došlo o hodinu neskôr, kedy chyba v nameranej polohe dosiahla približne 90 metrov a nadmorská výška v jednom momente klesla na úroveň 331 metrov, teda o takmer 50 metrov nižšie ako skutočná výška prijímača.

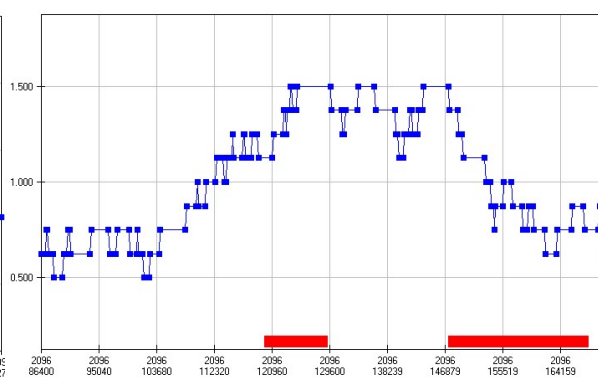
Druhá časť merania začala v čase 18:05, už v čase 18:35 došlo k polohovej chybe na úrovni 50 metrov a v čase 18:50 na 60 metrov. Od tohto okamihu až do 22:00 bola nameraná poloha vzdialená od tej skutočnej do 20 metrov s pomerne dobrou presnosťou. V čase 22:00 dosiahla chyba na krátky moment 64 metrov. Hodnoty GIVEI ani vertikálnej chyby neboli v tom čase na žiadnej neobvyklej úrovni.



Obr. 7-73: Zobrazenie nameranej polohy dňa 9.3.2020 v čase 10:20



Obr. 7-74: Hodnota GIVEI dňa 9.3.2020



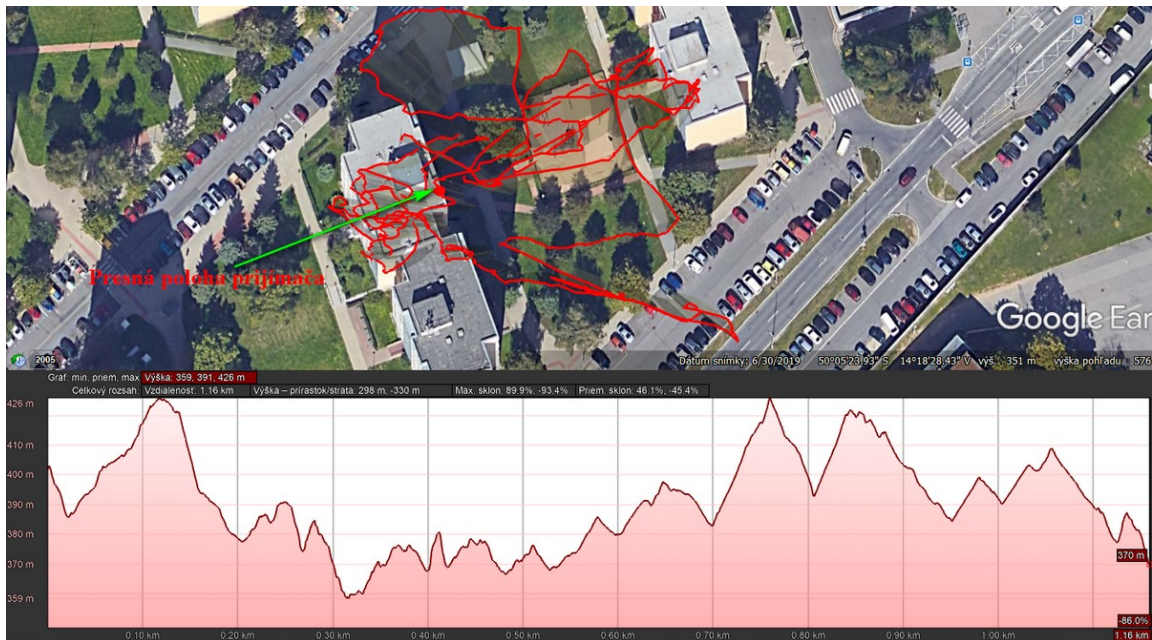
Obr. 7-75: Hodnota vertikálnej chyby dňa 9.3.2020

Tabuľka 7-23: Indexy Kp pre deň 10.3.2020 [41]

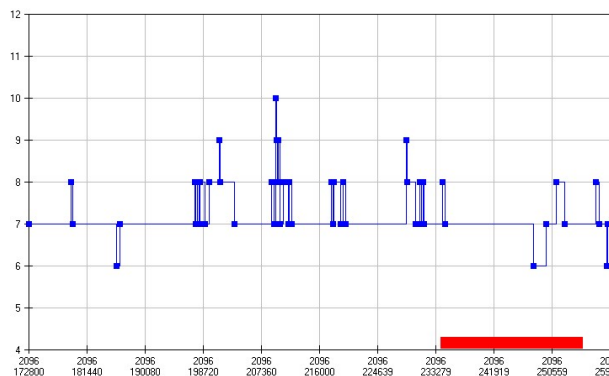
10.3.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kp	20	3	13	7	7	7	0	10	67

Počas dňa 10.3. indexy Kp postupne klesali a od 9. hodiny už dosahovali minimálne hodnoty. Meranie bolo v tento deň zahájené v čase 18:25, počas merania bol index na hodnote 0, hodnoty GIVEI na čísle 7 a úroveň vertikálnej chyby sa pohybovala okolo jedného metra. Od začiatku merania boli zaznamenávané veľké chyby v nameranej polohe, v čase 19:00 (obr. 7-74) táto chyba dosiahla svoje maximum, 95 metro, pričom nameraná nadmorská výška sa vyšplhala až na 460 metrov nad morom. Do času 20:20 bola polohová chyba na úrovni 25

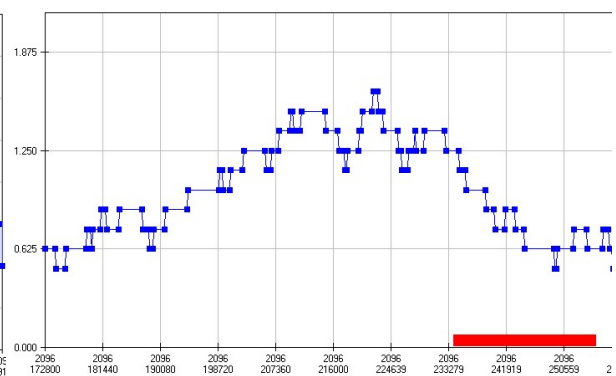
metrov, potom došlo k ďalším výraznejším výkyvom, ktoré trvali približne hodinu (obr. 7-76). V rovnakom čase bola hodnota GIVEI na čísle 6 a 7 a vertikálna chyba dosahovala 0,625 metra. Po týchto výkyvoch sa nameraná poloha stabilizovala a chyba dosahovala do 20 metrov.



Obr. 7-76: Zobrazenie nameranej polohy dňa 10.3.2020 v čase 20:50



Obr. 7-77: Hodnota GIVEI dňa 10.3.2020



Obr. 7-78: Hodnota vertikálnej chyby dňa 10.3.2020

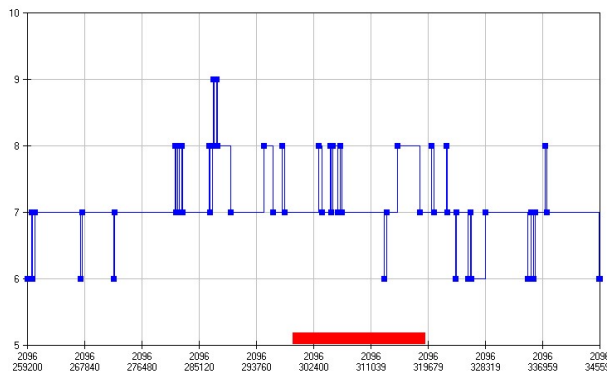
Tabuľka 7-24: Indexy Kp pre deň 11.3.2020 [41]

11.3.2020	0000	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	Sum
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0300	0600	0900	1200	1500	1800	2100	2400	
Kp	17	3	3	7	7	3	0	3	43

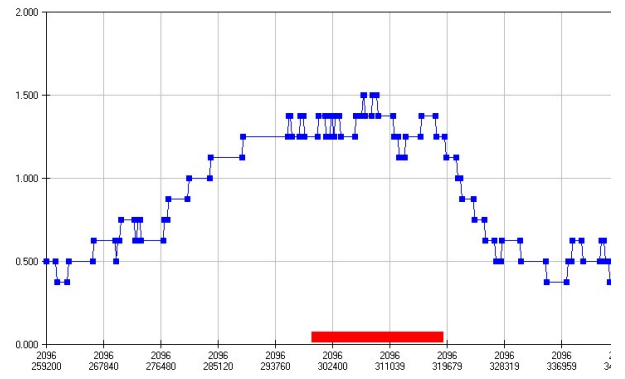
Ďalší pokles indexov Kp nastal aj počas dňa 11.3.2020, v priebehu ktorého bol tento index na veľmi nízkych hodnotách. Napriek tomu na malý moment, približne v čase 7:45 došlo k nárastu hodnoty GIVEI na číslo 9, no počas meraní sa väčšinu času pohyboval na hodnote 7 a 8. Hodnota vertikálnej chyby počas dňa vystúpila na maximum 1,5 metra, ktorú dosiahla počas merania v čase 13:10. Merania boli zahájené v čase 10:41, v čase 11:27 došlo k prvej výraznejšej chybe nameranej polohy, ktorá dosiahla 70 metrov. Ďalšia väčšia chyba bola nameraná v čase 12:05 a dosiahla približne 55 metrov odchýlky od skutočnej polohy prijímača. V ostatných okamihoch bola chyba nameranej polohy menšia ako 25 metrov. Ako môžeme vidieť na obrázku 7-79, v časoch okolo 13:30 dosahovala hodnoty odchýlky od presnej polohy len približne 10 metrov, pričom hodnota vertikálnej chyby dosahovala svoje denné maximum a index Kp bol na hodnote 7. Aj nameraná nadmorská výška bola v tomto prípade pomerne presná s odchýlkou približne 10 metrov.



Obr. 7-79: Zobrazenie nameranej polohy dňa 11.3.2020 v čase 13:30



Obr. 7-80: Hodnota GIVEI dňa 11.3.2020



Obr. 7-81: Hodnota vertikálnej chyby dňa 11.3.2020

8. Výsledky meraní, návrhy a odporúčenia

Vykonané merania vykazovali pomerne veľké chyby v nameranej polohe aj nameranej nadmorskej výške. Vzhľadom na nízku aktivitu Slnka v období meraní je veľmi nepravdepodobné, že tieto chyby boli spôsobené pôsobením vplyvov vesmírneho počasia. S najväčšou pravdepodobnosťou sa jedná o chyby spôsobené odrazom signálu od okolitých budov a terénu. Po väčšinu času boli dostupné družice situované len na východnej strane práve kvôli východnej orientácii okna, na ktorom bol prijímač uložený. Podobné merania by určite bolo vhodné situovať do otvoreného priestoru. Problémom by mohlo byť pripojenie prijímača k PC, ktorý by zaznamenával polohové informácie počas tak dlhého meraného časového úseku.

Korelácia medzi indexom K_p a presnosťou meraní nebola počas meraní dokázaná. Nameraná poloha bola často desiatky metrov vzdialená od skutočnej polohy prijímača aj počas veľmi kľudných dní, kedy indexy K_p dosahovali minimálne hodnoty. Naopak počas zvýšenej slnečnej aktivity a zvýšeného indexu K_p boli občas merania ešte presnejšie ako počas dní s nízkou hodnotou indexu K_p . V meraniach, ktoré nedosahovali väčšie chyby sa v priemere nameraná poloha líšila od skutočnej o 10 – 20 metrov, čo je v daných podmienkach okolia celkom štandardný výsledok. Maximálny index K_p dosiahol počas meraní hodnoty 37 (3+), čo je aj tak pod úrovňou indexu solárnej búrky (6). Solárna erupcia zo dňa 6.1. bola taktiež z tých slabších a pomalších, trvalo jej 3 dni kým sa dostala až k Zemi.

Veľmi podobný výsledok bol dosiahnutý aj pri hodnotení korelácie medzi presnosťou nameranej polohy a hodnotami GIVEI a vertikálnej chyby. Hodnota GIVEI sa pohybovala v rozmedzí od 6 do 9, kedy 9 dosiahla vždy len na niekoľko minút. Hodnota vertikálnej chyby sa počas dňa so zvýšenou aktivitou hýbala v okolí 1,5 m a v okolí 1 m pri nízkej aktivite. Korelácia medzi nameranými dátami a hodnotami GIVEI a vertikálnej chyby bola minimálna, počas meraní nastali situácie, kedy bola v čase vyšších hodnôt GIVEI nameraná poloha presnejšia ako v prípadoch s jeho nižšou hodnotou. Vertikálna chyba sa zvyšovala so zvyšujúcim sa indexom K_p , no opäť dochádzalo k prípadom, že nameraná poloha bola menej presná aj v prípade nižšej vertikálnej chyby.

Vzhľadom na situáciu, ktorá nastala začiatkom roka 2020 a autorovu neprítomnosť na mieste merania v Prahe nebolo možné pokračovať v meraniach v mesiacoch, kedy sa slnečná aktivita začína stupňovať. Ako je možné vidieť v nameraných dátach a získaných indexoch K_p , za celé obdobie merania došlo k jednej, aj to slabej slnečnej erupcii s následným mierne zvýšeným indexom K_p . Momentálne sa taktiež nachádzame v minime na rozhraní tohto, 24. slnečného cyklu a nasledujúceho 25. cyklu, ktorý maximum dosiahne okolo roku 2025.

V prípade opakovaných meraní by teda bolo rozhodne vhodné tieto merania vykonávať na odľahlejšom mieste, na ktorom sa nenachádzajú vysoké budovy, ktoré spôsobujú odrazy signálu. Ideálnym miestom by mohlo byť napríklad jedno z veľkého množstva aeroklubových letísk v okolí Prahy, kde by bol zabezpečený prístup k elektrickej sieti, do ktorej by bolo možné zapojiť počítač. Merania by taktiež bolo vhodné situovať do letných mesiacov kedy je Slnko aktívnejšie. Situácia by mohla byť zaujímavá v období maxima nasledujúceho slnečného cyklu, ktoré nastane približne v spomínanom roku 2025. Autor by zároveň po vlastných skúsenostiach odporučil program u-center, ktorý ponúka širokú škálu možností zobrazenia informácií a nameraných dát a ich export do ďalších programov.

8.1 Výpočet korelačného indexu

Na výpočet korelačného indexu bol vybraný deň 9.1. s najvyšším denným indexom Kp a deň 25.1.2020, kedy meranie prebiehalo počas štyroch časových období vydávania indexu Kp.

Korelačný index môže nadobúdať hodnoty od -1 do 1, pričom platí, že čím je výsledná hodnota bližšie k 1, tým viac jednotlivé hodnoty medzi sebou priamo závisia, v prípade -1 závisia nepriamo. V prípade čísiel v okolí 0 hodnoty medzi sebou nesúvisia.

V nasledujúcej tabuľke môžeme vidieť hodnoty indexu Kp a priemernú chybu (d) v trojhodinovom období vydania indexu Kp pre deň 9.1.2020.

Tabuľka 8-1: Výpočet korelačného indexu pre deň 9.1.2020

Kp	23	17	23
d (m)	10	13,7	26,25

Ako prvé musíme vypočítať aritmetický priemer hodnôt \bar{x} , \bar{y} a rozptyly s_x^2 a s_y^2 , pričom hodnoty Kp sú označené ako x a hodnoty chyby ako y.

$$\bar{x} = 21 \quad (8.1)$$

$$\bar{y} = 16,65 \quad (8.2)$$

$$s_x^2 = 8 \quad (8.3)$$

$$s_y^2 = 48,36 \quad (8.4)$$

Z rozptylu jeho odmocnením získame smerodajnú odchýlku:

$$s_x = 2,828 \quad (8.5)$$

$$s_y = 6,954 \quad (8.6)$$

Na výpočet korelačného indexu dosadíme tieto hodnoty do nasledujúcej rovnice:

$$r_{x,y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \bar{y}}{s_x s_y} \quad (8.7)$$

Po dosadení dostaneme výsledok, $r_{x,y} = 0,3$.

Korelačný index má v tomto prípade hodnotu 0,3, čo znamená, že dané hodnoty medzi sebou nesúvisia.

V tabuľke 8-2 môžeme vidieť hodnoty indexu K_p a priemernú chybu (d) v trojhodinovom období vydania indexu K_p pre deň 25.1.2020.

Tabuľka 8-2: Výpočet korelačného indexu pre deň 25.1.2020

K_p	3	0	3	0
d (m)	21,1	9,34	13,9	17,8

$$\bar{x} = 1,5 \quad (8.8)$$

$$\bar{y} = 4,36 \quad (8.9)$$

$$s_x^2 = 2,25 \quad (8.10)$$

$$s_y^2 = 19,0184 \quad (8.11)$$

Z rozptylu jeho odmocnením získame smerodajnú odchýlku:

$$s_x = 1,5 \quad (8.12)$$

$$s_y = 4,36 \quad (8.13)$$

Na výpočet korelačného indexu dosadíme tieto hodnoty do nasledujúcej rovnice:

$$r_{x,y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \bar{y}}{s_x s_y} \quad (8.14)$$

Po dosadení dostaneme výsledok, $r_{x,y} = 0,4455$.

S výsledkom 0,4455 korelačný index opäť nedokazuje súvislosť medzi indexom K_p a chybou nameranej polohy.

Záver

V rámci diplomovej práce bol čitateľ uvedený do histórie pozorovaní vesmírneho počasia, do problematiky javov vesmírneho počasia od ich vzniku na Slnku v slnečných škvrnách, vývoja slnečnej erupcie, pohybu slnečného vetra a jeho pôsobenia na zemskú atmosféru. Objasnený bol aj vznik polárnej žiary ako sprievodného javu vesmírneho počasia a index K_p určujúci silu geomagnetickej búrky. Ďalšie kapitoly boli venované vplyvu vesmírneho počasia na systémy využívané v letectve, a to konkrétne systémy pracujúce v pásme HF a systémy GNSS. V týchto kapitolách bolo objasnené to, ako konkrétne javy vesmírneho počasia vplyvajú na dané systémy. V ďalšej časti práce boli predstavené ionosférické modely využívané na korekcie chýb spôsobené ionosférou používané v rôznych družicových navigačných systémoch. Medzi tieto modely patrí Klobucharov model alebo model NeQuick navrhnutý pre systém Galileo.

Piata kapitola bola venovaná princípu fungovania družicových systémov. Vzhľadom na množstvo informácií dostupných k tejto téme boli vybrané podľa autora najdôležitejšie informácie, a teda boli vysvetlené základy diaľkovej metódy určovania polohy, ktorá je najpoužívanejšou v súčasných družicových navigačných systémoch, no nie je jedinou metódou. Predstavené boli aj základné charakteristiky európskeho systému Galileo, jeho vesmírneho segmentu, pozemného segmentu a užívateľského segmentu, na ktorý v ďalšej kapitole nadväzujú informácie o systéme EGNOS, európskom augmentačnom systéme, založenom na geostacionárnych družiciach a pozemných stanicach, ktoré vysielajú správy a korekcie pre navigačné systémy. EGNOS bol zvolený aj z dôvodu, že dáta tohto systému boli následne využité aj pri praktických meraniach. V tejto časti práce boli detailnejšie vysvetlené služby systému EGNOS, správy vysielané týmto systémom a samostatná podkapitola bola venovaná službe EDAS, ktorá taktiež poslúžila ako zdroj ionosférických informácií pri praktických meraniach pomocou ich FTP servera, na ktorom môžu registrovaní užívatelia získať všetky dostupné informácie zo systému EGNOS.

Praktické merania boli vykonávané v Prahe pomocou prijímača Navilock NL-8012U u-blox 8 multi GNSS USB receiver umiestnenom na okne 11. poschodia bytového domu. Počas meraní bol prijímač na jednom mieste a zaznamenával svoju polohu a informácie o družiciach GNSS prostredníctvom programu u-center. Tieto merania boli následne analyzované a porovnané s indexom K_p a dátami z EDASu, hodnotou GIVEI a vertikálnou chybou pre gridový bod IGP nad Českou republikou. Po získaní dát z EDASu bol na ich analýzu využitý program SBAS MeNTOR, použitie, ktorého je taktiež detailne popísané v tejto práci, a ktorý poslúžil na zobrazenie mapy gridových bodov IGP nad Európou. Vzhľadom na aktuálne slnečné minimum, kedy sa nachádzame na konci 24. slnečného cyklu a nedochádza k výraznejšej

slnečnej aktivite boli aj indexy Kp počas týchto meraní na nízkych hodnotách. Porovnanie nameraných polohových dát s indexom Kp bolo o to náročnejšie a nebola ani v nich, ani pri porovnaní s hodnotami GIVEI a vertikálnej chyby, nájdená korelácia medzi týmito hodnotami a presnosťou meraní. Chyby merania, ktoré boli zaznamenané boli s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobené odrazom od okolitých budov. Korelácia medzi indexom Kp a chybou v nameranej polohe nebola dokázaná ani pomocou výpočtu korelačného indexu.

Odporúčania v prípade budúcich podobných meraní môžeme nájsť v samostatnej ôsmej kapitole. Medzi hlavné myšlienky patrí nájdenie vhodnejšej lokality, ideálne nachádzajúcej sa mimo zastavané územie mesta, kde by mohlo dochádzať k odrazu signálov a uskutočnenie týchto meraní v letných mesiacoch, kedy je slnečná aktivita výraznejšia. Približne v roku 2025 nás čaká maximum 25. slnečného cyklu, ktoré so sebou určite prinesie zaujímavé slnečné erupcie a s veľkou pravdepodobnosťou aj rozsiahle geomagnetické búrky. Verme, že systémy GNSS nebudú touto slnečnou činnosťou veľmi ovplyvnené a nedôjde k ohromeniu leteckej ani inej dopravy alebo odvetví využívajúcich globálne družicové navigačné systémy.

Systémy GNSS sú neustále vylepšované a ich presnosť sa zvyšuje. Čím ďalej, tým sú viac využívané aj v letectve, kde pomaly vytláčajú konvenčné navigačné systémy ako VOR alebo ILS. Systém ILS však pravdepodobne ešte nejakú dobu ostane hlavným systémom využívaným pre presné priblíženie lietadiel na pristátie. Hlavne v Spojených štátoch amerických je ale možné vidieť ako priblíženia pomocou systémov GNSS nahrádzajú systém VOR alebo sú umožnené na takých letiskách, kde sa maják VOR nenachádza alebo kde by iné priblíženie nebolo možné.

Zoznam použitých zdrojov

- [1] Galileo's Observations of the Moon, Jupiter, Venus and the Sun. NASA Science [online]. 2009 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://solarsystem.nasa.gov/news/307/galileos-observations-of-the-moon-jupiter-venus-and-the-sun/>
- [2] Who discovered the first aurora?. NASA IMAGE Education Center [online]. [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://image.gsfc.nasa.gov/poetry/ask/a10455.html>
- [3] Sir Edward Sabine. Britannica.com [online] 1999 [cit. 2020-27-21]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/Edward-Sabine>
- [4] Samuel Heinrich Schwabe. Britannica.com [online] 1998 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/Samuel-Heinrich-Schwabe>
- [5] George Ellery Hale. Britannica.com [online]. 1998 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/George-Ellery-Hale>
- [6] Mariner 2. National Aeronautics and Space Administration [online]. NASA 2012 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_964.html
- [7] Earth's Sun: Facts About the Sun's Age, Size and History. Space.com [online]. Space.com 2017 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://www.space.com/58-the-sun-formation-facts-and-characteristics.html>
- [8] Parker Solar Probe: Humanity's First Visit to a Star. National Aeronautics and Space Administration [online]. NASA [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/content/goddard/parker-solar-probe-humanity-s-first-visit-to-a-star>
- [9] HARDEN, Paul. Solar Activity & HF Propagation [online]. 2005 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.qrparci.org/resource/FDIM81.pdf>
- [10] ŠEBESTA, Jiří. Globální navigační systémy [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~sebestaj/RAR/literatura/Globalni_navigacni_systemy.pdf

- [11] RAPANT, Petr. Družicové polohové systémy. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0124-8.
- [12] GALILEO: The Future Becomes Reality. ESA [online]. European Space Agency 2016 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/BR-320/>
- [13] Galileo Space Segment. ESA Navipedia [online]. GMV 2011 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Space_Segment
- [14] Galileo IOV Satellites. ESA Navipedia [online]. D.Liberatore, Airbus Defence and Space 2014 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_IOV_Satellites
- [15] Galileo Ground Segment. ESA Navipedia [online]. GMV 2011 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Ground_Segment
- [16] Galileo User Segment. ESA Navipedia [online]. GMV 2011 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_User_Segment
- [17] Polar Cap Absorption. Australian Government, Bureau of Meteorology, Space Weather Services [online]. Space Weather Services [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: https://www.sws.bom.gov.au/HF_Systems/6/3
- [18] HF RADIO COMMUNICATIONS. Space Weather Prediction Center NOAA [online]. SWPC NOAA [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/hf-radio-communications>
- [19] SPACE WEATHER AND GPS SYSTEMS. Space Weather Prediction Center NOAA [online]. SWPC NOAA [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/space-weather-and-gps-systems>
- [20] What is a Coronal Mass Ejection (CME)?. SpaceWeatherLive.com [online]. Spaceweatherlive [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.spaceweatherlive.com/en/help/what-is-a-coronal-mass-ejection-cme>
- [21] CORONAL MASS EJECTIONS. Space Weather Prediction Center NOAA [online]. SWPC NOAA [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/coronal-mass-ejections>
- [22] FOX, Karen. Solar Flares: What Does It Take to Be X-Class? [online]. National Aeronautics and Space Administration, 2011 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/X-class-

[flares.html#:~:text=Solar%20flares%20are%20classified%20according,M%20and%20X%2C%20the%20largest.&text=Solar%20flares%20are%20giant%20explosions,high%20speed%20particles%20into%20space.](#)

- [23] RUŠIN, Vojtech. Slnečná koróna a jej výskum. Pozorovanislunce.eu [online]. Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica 2013 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://pozorovanislunce.eu/odborne-clanky/slnečna-koróna-a-jej-výskum.html>
- [24] Helioviewer.org [online]. [zobr 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.helioviewer.org/>
- [25] HEINZEL, Peter. Sluneční erupce. Pozorovanislunce.eu [online]. Astronomický ústav AV ČR, v.v.i., observatoř Ondřejov, 2013 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://pozorovanislunce.eu/odborne-clanky/slunecni-erupce.html>
- [26] ŘEZÁČ, Karel. Sluneční vítr. Aldebaran.cz [online]. 2004 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_26_sow.php
- [27] Northern Lights: What Causes the Aurora Borealis & Where to See It. Space.com [online]. 2017 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.space.com/15139-northern-lights-auroras-earth-facts-sdcmp.html>
- [28] MAGIC OF AURORA BOREALIS. Kingdomnewsnet.org [online]. McKenzie Louise, 2019 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://kingdomnewsnet.org/magic-of-aurora-borealis/>
- [29] Sun By the Numbers. NASA Science [online]. NASA Science [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/sun/by-the-numbers/>
- [30] EGNOS Data Access Service (EDAS). EGNOS [online]. European GNSS Agency, 2019 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/library/official_docs/egnos_edas_sdd_in_for_ce.pdf
- [31] TEC. Space Weather Application Center – Ionosphere (SWACI) [online]. SWACI [zobr. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://swaciweb.dlr.de/data-and-products/public/tec/tec-eu/?L=1>
- [32] Tropospheric Corrections for GNSS Receivers, The Atmosphere and its Effect on GNSS Systems. CAASD [online]. Dr. M. Bakry El-Arini, Chile, 2008 [cit. 2020-07-01]. Dostupné z: <https://www.icao.int/SAM/Documents/2008/IONOSFERASEMINAR/Tropospheric%20Corrections%20for%20GNSS%20Receivers.pdf>

- [33] Tropospheric Delay. ESA [online]. J. Sanz Subirana, J.M. Juan Zornoza and M. Hernández-Pajares, Technical University of Catalonia, Španielsko, 2011 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Tropospheric_Delay
- [34] The Ionosphere and its Effects on GNSS Systems. CAASD [online]. Dr. M. Bakry El-Arini, Ing. Roland O. Lejeune, Dr. S. Vincent Massimini, Chile, 2008 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.icao.int/SAM/Documents/2008/IONOSFERASEMINAR/04SemlonosGNS_S_Mitre.pdf
- [35] SEGURA, Deimos Ibáñez. Implementation of GNSS ionospheric models in gLAB [online]. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2014 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24770/Implementation%20of%20GNSS%20ionospheric%20models%20in%20gLAB.pdf>
- [36] EDAS Ntrip service evolution to support HTTP-based communication: Coming soon!. GSA [online]. GSA, 2018 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/news-events/news/edas-ntrip-service-evolution-support-http-based-communication-coming-soon
- [37] The EGNOS SBAS Message Format Explained. ESA Navipedia [online]. Daniel Porras Sánchez & César Pisonero Berges, GMV S.A., Španielsko, 2006 [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/The_EGNOS_SBAS_Message_Format_Explained#Ionospheric_information_messages
- [38] EGNOS Data Access Service (EDAS) [online]. GMV, 2011 [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/EGNOS_Data_Access_Service_\(EDAS\)](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/EGNOS_Data_Access_Service_(EDAS))
- [39] LETECKÝ PŘEDPIS METEOROLOGIE L3. Úřad pro civilní letectví [online]. Úřad pro civilní letectví 2018 [cit. 2020-07-25]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-3/data/print/L-3_cely.pdf
- [40] DORIAN, Paul. Deep Solar Minimum Fast-Approaching: Cosmic Rays Continue To Rise [online]. GWPF, 2019 [cit. 2020-07-11]. Dostupné z: <https://www.thegwpf.com/deep-solar-minimum-fast-approaching-cosmic-rays-continue-to-rise/>
- [41] EOP and Space Weather Data, Celestrak.com [online]. Celestrak [zob. 2020-01-09]. Dostupné z: <https://celestrak.com/SpaceData/SW-Last5Years.txt>

- [42] SBAS MeNTOR. ESA [online]. ESA [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <http://www.egnos-pro.esa.int/sbasmentor/>
- [43] Navilock NL-8012U u-blox 8 multi GNSS USB receiver [online]. amazon [zobr. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://www.amazon.de/NAVILOCK-NL-8012U-Multi-Empf%C3%83%C2%A4nger-u-blox/dp/B00R998MJQ>

Zoznam obrázkov

Obr. 2-1: Záber koronagrafu LASCO C3 na výron koronálnej hmoty z dňa 27.2.2000

Obr. 2-2: Slnčné škvrny

Obr. 2-3: Elektrické pole Slnka a prúdenie slnečného vetra

Obr. 2-4: Geomagnetické pole Zeme pri slnečnom vetre

Obr. 2-5: Priebeh solárnej búrky

Obr. 2-6: Aurora borealis

Obr. 3-1: Optické a rádiové vyžarovanie zo Slnka

Obr. 3-2: Optické vyžarovanie krátkodobej a dlhodobej erupcie

Obr. 3-3: Röntgenové žiarenie po solárnej erupcii

Obr. 3-4: Rádiové žiarenie na základe interakcie s magnetickými siločiarami Slnka a magnetickými siločiarami solárnej erupcie

Obr. 3-5: TEC v oblasti Európy 10.7.2020 o 14:00 UTC

Obr. 3-6: Priemerné sezónne hodnoty na výpočet troposférického oneskorenia

Obr. 4-1 a 4-2: kosínusová funkcia klobucharovho modelu a ilustrácia výpočtu šikmého oneskorenia

Obr. 4-3: Oblasti modelu NeQuick

Obr. 4-4: Definícia interpolačného algoritmu štyroch bodov

Obr. 5-1: Kozmický segment systému Galileo

Obr. 5-2: Riadiaci segment systému Galileo

Obr. 6-1: Svetové augmentačné systémy SBAS

Obr. 6-2: Pokrytie systému EGNOS aktuálnymi družicami v prevádzke

Obr. 6-3: Stanice RIMS systému EGNOS

Obr. 6-4: Architektúra fungovania systému EGNOS

Obr. 7-1: GNSS prijímač Navilock NL-8012U u-blox 8 multi GNSS

Obr. 7-2: Príklad zobrazenia informácií v programe u-center

Obr. 7-3: Rozhranie programu SBAS MeNTOR

Obr. 7-4: SBAS MeNTOR

Obr. 7-5: SBAS MeNTOR, prehľad bodov IGP zvoleného časového úseku

Obr. 7-6: Príklad prepočtu času

Obr. 7-7: Slnéčné cykly

Obr. 7-8: Výron koronálnej hmoty zo dňa 6.1.2020

Obr. 7-9 – 7-81: Zobrazenie nameranej polohy, hodnoty GIVEI a vertikálnej chyby

Zoznam tabuliek

Tabuľka 2-1: Geomagnetické indikátory a podmienky

Tabuľka 6-1: Druhy navigačných správ systémov SBAS, informácie o družici

Tabuľka 6-2: Druhy navigačných správ systémov SBAS, ionosférické informácie

Tabuľka 6-3: Druhy navigačných správ systémov SBAS, ostatné správy

Tabuľka 7-1: Zápisy indexu Kp

Tabuľka 7-2: Indexy Kp pre deň 7.1.2020

Tabuľka 7-3: Indexy Kp pre deň 8.1.2020

Tabuľka 7-4: Indexy Kp pre deň 9.1.2020

Tabuľka 7-5: Indexy Kp pre deň 10.1.2020

Tabuľka 7-6: Indexy Kp pre deň 11.1.2020

Tabuľka 7-7: Indexy Kp pre deň 12.1.2020

Tabuľka 7-8: Indexy Kp pre deň 13.1.2020

Tabuľka 7-9: Indexy Kp pre deň 16.1.2020

Tabuľka 7-10: Indexy Kp pre deň 17.1.2020

Tabuľka 7-11: Indexy Kp pre deň 18.1.2020

Tabuľka 7-12: Indexy Kp pre deň 19.1.2020

Tabuľka 7-13: Indexy Kp pre deň 20.1.2020

Tabuľka 7-14: Indexy Kp pre deň 21.1.2020

Tabuľka 7-15: Indexy Kp pre deň 23.1.2020

Tabuľka 7-16: Indexy Kp pre deň 25.1.2020

Tabuľka 7-17: Indexy Kp pre deň 22.2.2020

Tabuľka 7-18: Indexy Kp pre deň 5.3.2020

Tabuľka 7-19: Indexy Kp pre deň 6.3.2020

Tabuľka 7-20: Indexy Kp pre deň 7.3.2020

Tabuľka 7-21: Indexy Kp pre deň 8.3.2020

Tabuľka 7-22: Indexy Kp pre deň 9.3.2020

Tabuľka 7-23: Indexy Kp pre deň 10.3.2020

Tabuľka 7-24: Indexy Kp pre deň 11.3.2020

Tabuľka 8-1: Výpočet korelačného indexu pre deň 9.1.2020

Tabuľka 8-2: Výpočet korelačného indexu pre deň 25.1.2020