ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Šárka Hájková

PROBLEMATIKA OMEZENÍ VÝKONNOSTI EGNOS V DŮSLEDKU IONOSFÉRICKÉ AKTIVITY

Bakalářská práce

2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
děkan
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K621..... **Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Šárka Hájková

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – LED – Letecká doprava

Název tématu (česky): **Problematika omezení výkonnosti EGNOS v důsledku ionosférické aktivity**

Název tématu (anglicky): Issues of EGNOS Performance Limitations due to Ionospheric Activity

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Faktory ovlivňující strukturu a vlastnosti ionosféry
- Vliv ionosféry na GNSS
- Ionosférické korekce v systému EGNOS, způsob jejich určení a jejich využití v GNSS přijímačích
- Problematika omezení výkonnosti služby EGNOS v důsledku solární aktivity a narušení zemské magnetosféry

ČVUT FD

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: European GNSS Agency: EGNOS Safety of Life - Servis definition document

PTÁČEK, P.: Výkonnost služby GNSS pro aplikace prostorové navigace civilního letectví v ČR

https://www.essp-sas.eu

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **28. října 2016**
(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 bakalářské práce: **28. srpna 2017**
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

L. S.

doc. Ing. Stanislav Szabo, PhD. MBA
vedoucí
Ústavu letecké dopravy

prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Šárka Hájková
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 28. října 2016

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji Ing. Stanislavu Pleningerovi, Ph.D. za odborné vedení a konzultování bakalářské práce a za rady, které mi poskytoval po celou dobu mého studia. V neposlední řádě je mou milou povinností poděkovat své matce a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 20. srpna 2017 ……

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

PROBLEMATIKA OMEZENÍ VÝKONNOSTI EGNOS V DŮSLEDKU IONOSFÉRICKÉ AKTIVITY

Bakalářská práce
Srpen 2017
Šárka Hájková

ABSTRAKT

Předmětem bakalářské práce „Problematika omezení výkonnosti EGNOS v důsledku ionosférické aktivity“ je vysvětlit vliv ionosféry na GNSS systémy, zpracovat přehled současných ionosférických modelů GNSS a přiblížit model, který pro výpočet korekce nad evropským kontinentem využívá rozšiřující systém EGNOS. Dalším cílem práce je také seznámit čtenáře se způsoby určení ionosférické korekce pomocí těchto modelů a také objasnit způsob implementace korekcí pomocí družic až k samotnému uživateli.

ABSTRACT

The subject of the bachelor thesis „Issues of EGNOS Performance Limitations due to Ionospheric Activity“ is to explain the influence of ionosphere on GNSS and to compile a summary of existing ionospheric GNSS models as well as model that use EGNOS for calculation of ionospheric corrections above the European continent. Another objective of the thesis is to familiarize the reader with the ways of determining the ionospheric corrections with the help of these models as well as approximate the way of correction by satellites to the reader.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ionosféra, GNSS, vliv ionosféry na GNSS, EGNOS, ionosférické modely, ionosférické korekce

KEYWORDS

Ionosphere, GNSS, ionospheric influence on GNSS, EGNOS, ionospheric models, ionospheric corrections

Obsah

1. ÚVOD 12

2. ATMOSFÉRA ZEMĚ 13

3. IONOSFÉRA 14

3.1. VRSTVY IONOSFÉRY 16

3.1.1. D vrstva 17

3.1.2. E vrstva 17

3.1.3. Es vrstva 17

3.1.4. F vrstva 18

3.2. ŠÍŘENÍ VLN 18

3.3. POZEMNÍ IONOSFÉRICKÉ SONDOVÁNÍ 19

3.3.1. Ionogram 20

4. ZEMSKÁ MAGNETOSFÉRA A SLUNEČNÍ AKTIVITA 22

4.1. ZEMSKÁ MAGNETOSFÉRA 22

4.1.1. Geomagnetické indexy 23

4.2. SLUNEČNÍ AKTIVITA 24

4.2.1. Sluneční vítr 24

4.2.2. Sluneční skvrny 25

4.2.3. Sluneční cyklus 25

4.2.4. Sluneční erupce 26

4.2.5. Koronální výtrysky hmoty 27

5. GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTÉM) 28

5.1. VLIV IONOSFÉRY NA GNSS 28

5.1.1. TEC 29

5.1.2. Ionosférická refrakce 31

5.1.3. Troposférická refrakce 31

6. IONOSFÉRICKÉ KOREKCE GNSS 34

6.1. DVOUFREKVENČNÍ IONOSFÉRICKÉ MODELY 34

6.1.1. Kódová měření 34

6.1.2. Fázová měření 36

6.1.3. MIDAS 37

6.2. JEDNOFREKVENČNÍ MODELY 38

6.2.1. Klobucharův model 38

6.2.2. BeDiou model 40

6.2.3. IRI 41

6.2.4. NeQuick model 41

6.2.5. NTCM 43

7. EGNOS 44

7.1. ARCHITEKTURA EGNOS 45

7.1.1. Geostacionární EGNOS družice 46

7.2. EGNOS SIGNÁL A NAVIGAČNÍ ZPRÁVA 47

8. IONOSFÉRICKÉ KOREKCE EGNOS 49
8.1. GIM (IONEX) MODEL 49
8.1.1. Rastr ionosférických bodů (Grid Point Mask) 50
8.1.2. Interpolace 51
8.1.2.1. Interpolace v rámci čtverce 52
8.1.2.2. Interpolace v rámci trojúhelníku 53
8.2. IONOSFÉRICKÉ NAVIGAČNÍ ZPRÁVY 54
8.2.1. Zpráva typu 18 54
8.2.2. Zpráva typu 26 55
8.3. PRINCIP PŘENOSU KOREKCE 56
8.3.1. Sběr dat 56
8.3.2. Výpočet 57
8.3.3. Přenos dat k uživateli 57
8.4. ZLEPŠENÍ A ODOLNOST DOSAŽENÁ SYSTÉMEM EGNOS 58
8.5. POROVNÁNÍ PŘESNOSTI GPS A EGNOS 59
9. ZÁVĚR 60
10. LITERATURA 62
11. SEZNAM OBRÁZKŮ 68
12. SEZNAM TABULEK 69

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK:

4D	čtyřrozměrný prostor
AE	Auroral Electrojet Index / Index magnetické aktivity v oblasti magnetických pólů
AOR-E	Atlantic Ocean Region East / Oblast Atlantického oceánu
APV	APproach with Vertical guidance / Přiblížení s vertikálním vedením
ASQF	Application Specific Qualification Facility / Aplikační kvalifikované centrum
BeiDou	Big Dipper constellation in Chinese / Autonomní družicový polohový systém
CME	Coron Mass Ejections / Koronální výtrysky hmoty
CPF	Central Processing Facility / Centrální výpočtové zařízení
Dst	Disturbance storm time index / Index intenzity magnetické bouře
EC	European Commission / Evropská komise
ECAC	European Civil Aviation Conference / Evropské sdružení civilního letectví
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service / Evropská podpůrná geostacionární navigační služba
ESA	European Space Agency / Evropská kosmická agentura
ESR	EGNOS System release / Verze EGNOS systému
ESSP SAS	European Satellite Services Provider / Evropský poskytovatel satelitních služeb
EUROCONTROL	European Organisation for the Safety of Air Navigation / Evropská organizace pro bezpečnost leteckého provozu
EWAN	EGNOS Wide Area Network / EGNOS široká síť
GAGAN	GPS Aided Geo Augmented Navigation / Autonomní družicový polohový systém
GBAS	Ground Based Augmentation System / Rozšiřující pozemní systém
GEO	Geostationary Orbit / Geostacionární oběžná dráha
GIM	Global Ionospheric Maps / Globální ionosférické mapy
GIVE	Grid Ionospheric Vertical Error / Zbytková ionosférická vertikální chyba
GIVEI	GIVE Indicators / GIVE indikátory
GIVD	Grid Ionospheric Vertical Delay / Ionosférická korekce mezi satelitem a bodem IGP
GLONASS	Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistěma / Globální navigační družicový systém

GNSS	Global Navigation Satellite System / Globální družicový polohový systém
GPS	Global Positioning System / Globální polohový systém
GRAS	Ground Regional Augmentation System / Systém s pozemním regionálním rozšířením
GSA	European GNSS Agency / Agentura pro evropský GNSS
HDOP	Horizontal Dilution of Precision / Horizontální snížení přesnosti
ICAO	International Civil Aviation Organization / Mezinárodní organizace pro civilní letectví
IGP	Ionospheric Grid Point / Rastr ionosférických bodů
INMARSAT	International Maritime Satellite Organization / Mezinárodní družicová telekomunikační společnost
IODI	Issue of Data Ionosphere / Parametr koordinující různé typy zpráv
IONEX	IONosphere map EXchange format / Formát dat používaný pro vysílání ionosférických map
IOR-W	Indian Ocean Region West / Oblast Indického oceánu
IPP	Ionospheric Pierce Point / Body průniku ionosféry
IRI	International Reference Ionosphere / Standardní referenční model ionosféry
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System / Regionální navigační satelitní systém pro Indii
MCC	Master Control Center / Řídící centrum
MIDAS	Multi-Instrument Data Analysis System / Systém pro analýzu dat
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System / Autonomní multifunkční družicový polohový systém
MT	Message Type / Typy zpráv
NAVSTAR	NAVigation Signal Timing and Ranging / Družicový navigační systém
NLES	Navigation Land Earth Station / Navigační pozemní stanice
NTCM	Neustrelitz TEC Model
PACF	Performance Assessment and Checkout Facility / Centrum pro analýzu výkonů a výstupů
PRN	PseudoRandom Noise / Kódy vysílané družicemi
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System / Regionální navigační systém pro Japonsko
RIMS	Ranging and Integrity Monitoring Station / Monitorovací stanice
SBAS	Satellite Based Augmentation System / Systém s družicovým rozšířením

SDCM	System for Differential Corrections and Monitoring / Systém pro diferenciální korekce a monitorování
STEC	Slant TEC / Šikmý TEC
TEC	Total Electron Content / Celkový obsah elektronů
TECU	TEC Unit / TEC jednotka
UDRE	User Differential Range Error / Chyba uživatele diferenciálního rozsahu
UERE	User Equivalent Range Error / Chyba uživatele ekvivalentního rozsahu
UIVD	User Ionospheric Vertical Delay / Ionosférická korekce mezi uživatelem a satelitem
UT	Universal Time / Světový čas
UTC	Universal Time Coordinated / Světový koordinovaný čas
UV	ultraviolet / ultrafialové
WAAS	Wide Area Augmentation System / Rozšiřující autonomní navigační systém

1. Úvod

Poslední desetiletí se vyznačují velký progresem letecké dopravy a tím i vzrůstajícími nároky na letový provoz, kde je mimo jiné třeba zvyšovat a hodnotit přesnost navigačních systémů. S tímto rozvojem letecké dopravy tedy souvisí i rychlý rozvoj nových globálních satelitních navigačních systémů (GNSS). Hlavním představitelem a základním prvkem uváděných satelitních systémů je americký globální polohový systém (GPS). Na satelitní systémy působí různé chyby, které mají za následek snížení přesnosti určení polohy uživatele. Prioritním zdrojem těchto chyb je ionosféra.

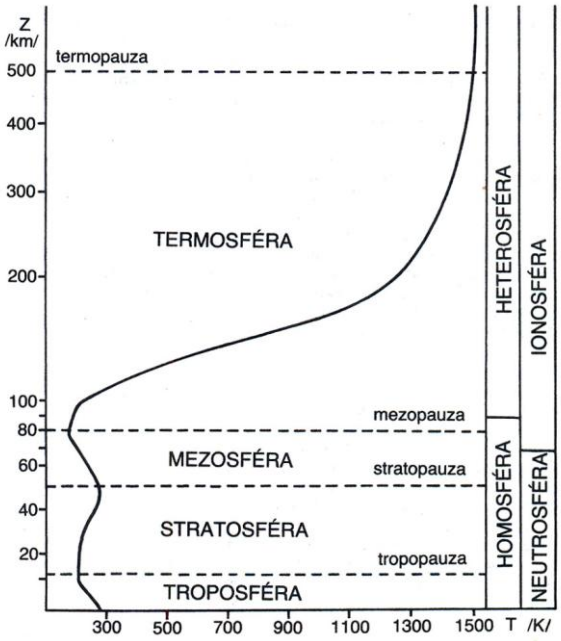
Ionosféra silně ovlivňuje šíření elektromagnetických signálů. Při průchodu signálu ionosférou dochází ke změně směru šíření signálu a ke zpoždění signálu. Za účelem snížení či eliminování těchto nedostatků vznikly tzv. rozšiřující systémy. Na evropském kontinentě byl certifikován rozšiřující prvek GNSS, který je nazýván EGNOS (European Geostacionary Navigation Overlay Service). Evropský rozšiřující systém pracuje jako podpora systému GPS a využívá se mimo jiné pro účely civilního letectví.

Ionosférické účinky na družicové signály musí být v procesu určování polohy GNSS patřičně zohledněny, aby bylo možné získat přesnou polohu. Přestože ionosférické zpoždění signálu GNSS je vždy přítomné a mění se pouze jeho velikost, lze tento zdroj chyb eliminovat pomocí ionosférických korekcí. Aby bylo možno využít technologii GNSS pro navigaci v pokud možno reálném čase, je nutné tyto korekce přenášet do aparatury uživatele. Bylo vyvinuto několik modelů a metod, které tyto korekce počítá.

Cílem této bakalářské práce je popsat vliv ionosféry na GNSS systémy, zpracovat přehled současných ionosférických modelů GNSS a přiblížit model, který pro výpočet korekce nad evropským kontinentem využívá rozšiřující systém EGNOS. Dále také seznámit čtenáře se způsoby určení ionosférické korekce pomocí těchto modelů a také objasnit způsob, jakým se korekce přenáší pomocí družic až k samotnému uživateli.

2. Atmosféra Země

Dělení zemské atmosféry lze provést dle několika různých parametrů. Patrně za nejvíce užívané kritérium lze považovat změnu teploty v závislosti na výšce. Se stoupající nadmořskou výškou dochází k řídnutí vzduchu, ale současně se mění také další fyzikální vlastnosti atmosféry. Na tomto základě se atmosféra rozděluje na troposféru, stratosféru, mezosféru, termosféru a exosféru, jež je už přechodem do meziplanetárního prostoru. Hlavním znakem troposféry je ubývání teploty se stoupající výškou. Opačně ve stratosféře je teplota nejprve neměnná, později s přibývající výškou narůstá. V mezosféře teplota s výškou zase klesá a v termosféře narůstá až k hodnotám přesahujícím 1000°C. Další způsob dělení atmosféry je na základě chemického složení vzduchu. Pro homosféru je typická velmi malá proměnlivost složení atmosféry v závislosti na výšce. U heterosféry, která navazuje na homosféru, intenzita vertikálního promíchávání vzduchu slábne a s rostoucí výškou ubývají těžší plyny. Existuje značné množství parametrů, podle kterých lze atmosféru dělit, nicméně pro tuto práci je nejdůležitější stupeň ionizace, který atmosféru rozděluje na ionosféru a neutrosféru. Neutrosféra sahá od zemského povrchu do výšky přibližně 60 km ve dne a 150 km v noci. V této vrstvě vzduch není takřka vůbec ionizován, to znamená, že je elektricky neutrální. Krátké rádiové vlny neutrosférou hladce prochází. Nad neutrosférou se nachází ionosféra, které bude věnována následující samostatná část.

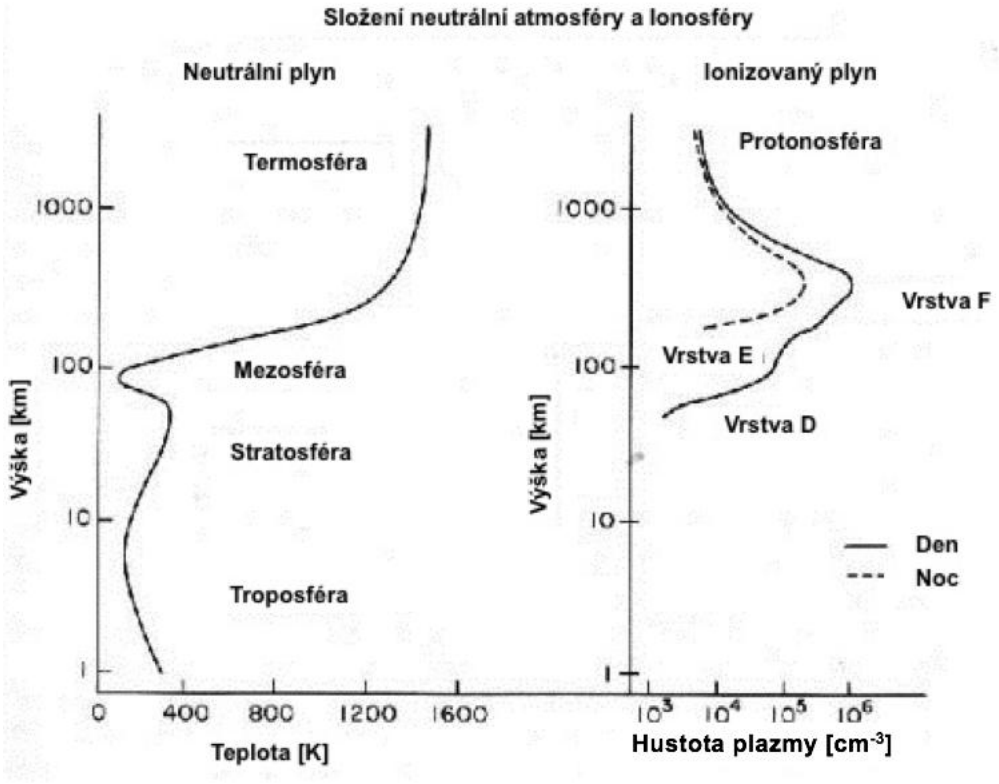


Obrázek 1: Rozdělení atmosféry [2]

3. Ionosféra

Ionosféra je ionizovaná část horní atmosféry, která je charakteristická svým velkým vlivem na šíření elektromagnetických signálů. Tyto signály mohou být odráženy, tlumeny nebo ohýbány. Když v roce 1901 v Kanadě zachytil G. Marconi signál vyslaný z Cornwallu přes Atlantický oceán, experimentálně tím dokázal přítomnost atmosférické odrazivé vrstvy.

Ionosféra se nachází v oblastech mezosféry a termosféry, přibližně ve výškách nad 60 km nad zemským povrchem. Jejím obsahem jsou neutrální plyny, ionty a volné elektrony. K ionizaci atomů a molekul (rozdělení na kladně nabité ionty a záporně nabité elektrony na základě odštěpení jednoho nebo více elektronů) neutrálních plynů dochází hlavně ultrafialovým, případně měkkým rentgenovým zářením ze Slunce nebo kosmickým zářením. Z toho plyne, že stupeň ionizace závisí na sluneční činnosti. Důsledkem ionizace je přeměna elektricky inertního prostředí na vodivé prostředí. Ve vodivém prostředí dochází ke snížení rychlosti šíření rádiového signálu a na rozhraní mezi inertní atmosférou a ionizovaným plynem se láme směr šíření rádiového signálu.

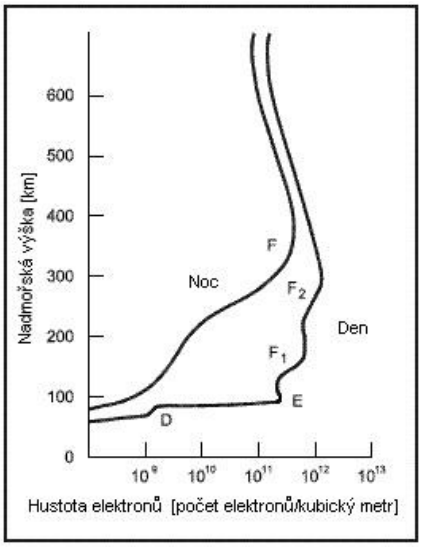


Obrázek 2: Struktura atmosféry a ionosféry [5]

Důležitým faktorem ionizačních procesů je nejen intenzita a spektrum ionizujícího záření, ale také jaké plyny se v dané výšce nacházejí a v jaké koncentraci. Stupeň ionizace závisí také na rychlosti rekombinace a na délce působení záření. Objevuje se zde tedy souvislost se slunečním zářením, s denní a noční dobou, ročním obdobím apod.

Protože vzduch je zde velice řídký, trvá značně dlouhou dobu, než dojde k setkání elektronu s atomem a proběhne neutralizace iontu. Na druhou stranu v nižších vrstvách atmosféry je hustota vzduchu tak vysoká, že se kladný iont vzniklý ionizací téměř hned srazí s elektronem a rekombinuje se s ním opět na neutrální atom nebo molekulu. V noci koncentrace nabitých částic rychle klesá a ionizované částice v podstatě vymizí. Ve vyšších hladinách atmosféry, kde je hustota plynů nižší, je doba života ionizovaných částic podstatně delší. Z toho vyplývá, že současně s ionizací dochází i k opětné rekombinaci částic. Výsledkem těchto dvou procesů se oblast ionosféry rozloží na podoblasti s různou koncentrací ionizovaných částic tak, že lze zde pozorovat vrstvy s podobnými elektrickými vlastnostmi. Tyto vrstvy se z historického hlediska nazývají D, E a F. V letních měsících se vrstva F přes den rozděluje ještě na vrstvy F1 a F2.

Jak bylo již zdůrazněno výše, při ionizaci dochází k odštěpení elektronu. Tyto volné elektrony pak mají vliv na šíření rádiových kmitočtů v mezích zhruba 10 MHz až 100 MHz. Po východu Slunce iontová koncentrace silně stoupá až k maximu, kterého nabývá odpoledne. Po té se koncentrace postupně snižuje až na minimum, kterého dosahuje před východem Slunce [8]. Závislost koncentrace elektronů a výšky je zobrazena na obrázku. Zde je uvedeno i rozdělení vrstev ionosféry.



Obrázek 3: Závislost koncentrace elektronů na výšce [8]

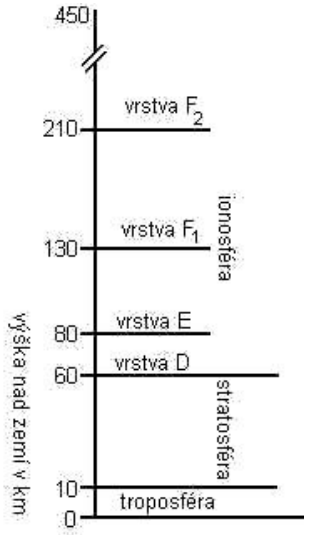
Vzduch ionosféry postupně přechází v meziplanetární prostor do kosmického vakua. Ionizovaná složka v oblasti uzavřených magnetických siločar se nazývá plazmasféra. Ta dosahuje do výšek tří až šesti zemských poloměrů, ve vyšších výškách je koncentrace iontů značně nižší. Tato oblast se nazývá plazmapauza.

3.1. Vrstvy ionosféry

Sluneční záření je při svém průchodu atmosférou filtrováno – čím je větší výška, tím je méně plynů a větší intenzita slunečního záření. Z toho plyne, že se s výškou mění i chemické složení plynů. Výsledkem je vznik ionosférických vrstev D, E, F1 a F2. Obecně vzrůstá ionizace od nejméně ionizované spodní vrstvy D k nejvíce ionizované horní vrstvě F2.

Podle frekvence vlny dochází v těchto vrstvách k odrazu od ionosféry. Každá z vrstev představuje pro rádiové vlny určitý útlum, ohyb nebo odraz. Při překročení mezního neboli kritického kmitočtu začne vlna ionosférou pronikat do kosmického prostoru. Jestli vlna ionosférou skutečně pronikne – to je dáno jak stavem ionosféry, tak úhlem pod níž do ionosféry vstupuje.

Během dne, roku a v průběhu jedenáctiletého cyklu sluneční aktivity se mění vlastnosti jednotlivých vrstev. Ale tyto vlastnosti vrstev závisí také na zeměpisné šířce. Proto základní vlastnosti ionizovaných vrstev je možno určit z výsledků měření na ionosférických stanicích rozmístěných téměř po celém světě.



Obrázek 4: Vrstvy ionosféry [9]

3.1.1. D vrstva

D vrstva je nejnižší ionosférická vrstva. Vyskytuje se ve výškách přibližně 50-90 km nad zemským povrchem. Je ionizována UV zářením a rentgenovým zářením procházejícím skrz výše položené ionizační vrstvy, a proto má vrstva nízkou úroveň ionizace. Existence D vrstvy je podmíněna stále dopadajícím zářením. Rekombinace v ní probíhá nejrychleji ze všech vrstev a po soumraku vrstva díky chybějícímu slunečnímu záření téměř zaniká, zůstává jen malá část, která je způsobená ionizací kosmickým zářením. Maxima dosahuje v poledne.

D vrstva je velmi důležitá pro přenos rádiových signálů. Vzhledem k nízké úrovni ionizace neodráží vysokofrekvenční rádiové vlny, ale odráží zejména dlouhé vlny, ostatní jsou průchodem vrstvou zeslabovány nebo pohlcovány [7]. Teprve po rekombinaci vrstvy během noci procházejí vlny lehce k vyšším vrstvám ionosféry. Stupeň ionizace, což znamená poměr nabitých a neutrálních částic, v této vrstvě značně vzrůstá v průběhu slunečních erupcí, obzvláště ve vyšších zeměpisných šířkách. Zvýšený počet ionizovaných částic může mít za důsledek krátkodobý výpadek rádiového spojení.

3.1.2. E vrstva

Vrstva, která vzniká ve výškách 90–150 km nad zemským povrchem, nicméně pro šíření rádiových vln je důležitá část ve výšce 95 až 120 km. Vrstva je složena z atomů kyslíku a dusíku, ionizovaných ultrafialovým zářením o kratších vlnových délkách a dlouhovlnným rentgenovým zářením. Odráží zejména střední vlny (do frekvence 10 MHz). V noci, po zániku vrstvy D, odráží i vlny dlouhé [7]. Vzhledem k tomu, že tato vrstva má velkou nestabilitu, k pravidelnému vysílání není její odraz vhodný. Vyskytuje se převážně přes den, v noci se její účinek snižuje.

3.1.3. Es vrstva

Es vrstva je sporadická vrstva, která se objevuje především ve středních zeměpisných šířkách a to v podobě silně ionizovaných plošných mraků o rozloze asi 100 km, ve stejné výšce jako vrstva E. Malá oblaka intenzivní ionizace významně podporují odrazivost rádiových signálů, které se pak šíří na neobvykle velké vzdálenosti. Mraky se tvoří nečekaně a délka jejich trvání se pohybuje od několika minut až po několik hodin. Výskyt nezávisí jednoznačně na sluneční aktivitě. Příčinou vzniku vrstvy jsou dynamické procesy v atmosféře, které mají za důsledek místní zvýšení hustoty volných elektronů. Jejich výskyt je obvykle v letních měsících případně v období od poloviny prosince do poloviny dubna.

3.1.4. F vrstva

F vrstva se vyskytuje ve výškách od 150 do 400 km. Je velmi významná pro šíření krátkých vln na velké vzdálenosti. Je to nejvyšší vrstva ionosféry vytvářená kyslíkovými atomy ionizovanými slunečním ultrafialovým zářením. Vlivem tohoto záření se za dne v letních měsících rozpadá na dvě vrstvy F1 a F2. Rekombinace elektronů probíhá velmi pomalu, neboť koncentrace molekul je značně nízká. Z důvodů maximální koncentrace volných elektronů má vrstva velký význam pro rádiový přenos. Maximum ionizace je hodně závislé na fázi slunečního cyklu a na roční a denní době. V nočních hodinách zůstává vrstva ve výšce nad 250 km a odráží kmitočty do 5 MHz. V období maximální sluneční činnosti může vrstva odrážet i kmitočty do 50 MHz. Pokud jsou antény vhodně směrovány, lze dosáhnout i vícenásobných odrazů mezi ionosférou a povrchem Země. To znamená, že se může vysílané záření šířit okolo celé Země.

- F1 vrstva

Denní vrstva F1 vzniká ve výšce 150–250 km nad zemským povrchem. Vlny o kmitočtech do 10 MHz nedosahují až k vrstvě, ale jsou absorbovány vrstvou D, nebo lomeny vrstvou E. Signály nad 10 MHz procházející k vrstvě F2, jsou však touto vrstvou tlumeny. Maximum elektronové hustoty je ve výšce kolem 170 km. V noci se vrstva F1 vytrácí.

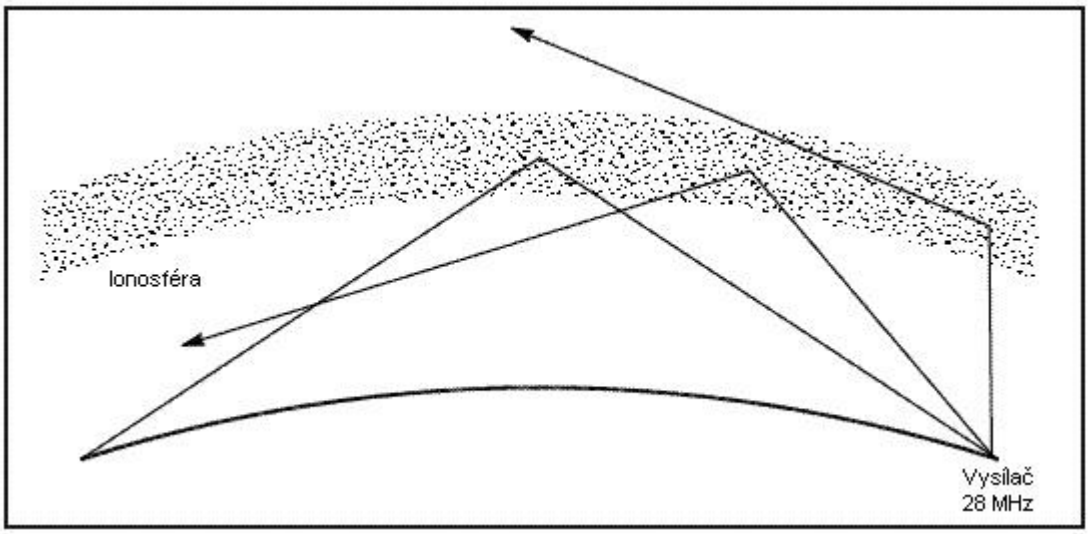
- F2 vrstva

Vrstva F2 se nachází ve výšce nad 250–400 km a je zcela ionizována. To znamená, že večer umožňuje i spojení na značně velké vzdálenosti. Projevuje se u ní anomální jev rychlého nárůstu koncentrace elektronů po východu slunce proti značně mírnému poklesu po západu slunce. Vrstva však nikdy úplně nezaniká, a to ani v období minima sluneční činnosti.

3.2. Šíření vln

Základním mechanizmem ionosférického šíření je lom neboli refrakce. K tomu dochází při přechodu záření do nevodivého prostředí nebo na ostrých hranách vodivých překážek. Od elektricky vodivých předmětů se záření odráží. Index lomu se zvyšuje s rostoucí ionizací a závisí na frekvenci. Pokud vnikne šířící se elektromagnetické vlnění do ionosféry, začne se dráha tohoto vlnění působením elektrického pole ionizovaných částic stáčet, a to přímo úměrně: Dráha vlnění se stáčí tím rychleji, čím vyšší je hustota ionizovaných částic. Rychlost stáčení však závisí i na kmitočtu vlnění, v tomto případě s nepřímou úměrou: stáčení je tím pomalejší, čím vyšší je kmitočet vlnění.

Do určitého kmitočtu, který se nazývá kritický, se dráha vnikajícího vlnění stáčí tak, že vlnění vrstvu opustí a navrátí se zpět k zemskému povrchu. Při přesažení kritického kmitočtu se kolmo vyslaný signál nevrátí k Zemi, ale prochází ionosférou stále dál do mezihvězdného prostoru. Nicméně i při přesažení tohoto kmitočtu může dojít k situaci, kdy se vyslaný signál vrátí k Zemi, a to v případě, kdy je signál vyslán pod úhlem menším než 90° k zemskému povrchu [8]. Signály vyslané pod většími úhly se k Zemi už nevracejí. Kritický kmitočet je závislý na koncentraci iontů, to znamená, že čím více je vzduch ionizován, tím vyšší je kritický kmitočet a také se tím více rádiových vln od ionosféry odráží.



Obrázek 5: Odraz a průchod signálu ionosférou [8]

Obecně lze říci, že ke kmitočtům, které nepřesáhnou kritický kmitočet, se ionosféra chová jako zrcadlo upevněné vysoko nad zemským povrchem. Spodní vrstva ionosféry zpravidla odráží vlny nižšího kmitočtu, zatímco vyšší kmitočty se postupně odrážejí od vyšších vrstev. Pro velmi vysoké kmitočty však netvoří zábranu ani vrstva F2 a signály pronikají dále do kosmického prostoru. Odrazivost ionosféry se tedy liší na základě kmitočtu elektromagnetického vlnění [8].

3.3. Pozemní ionosférické sondování

Pozemním sondováním ionosféry získáme informaci o stavu ionosféry, kterou je elektronová koncentrace v dané výšce, popřípadě i pohyb vrstev. Tyto údaje se zjišťují vertikálním sondováním pomocí zařízení zvaného ionosonda. Ionosonda funguje na stejném principu jako klasický radar. Principem měření je vyslání krátkého impulzu o frekvenci nejčastěji 1-20 MHz svisle vzhůru do prostoru z pozemní vysílací antény a měření času návratu signálu, po

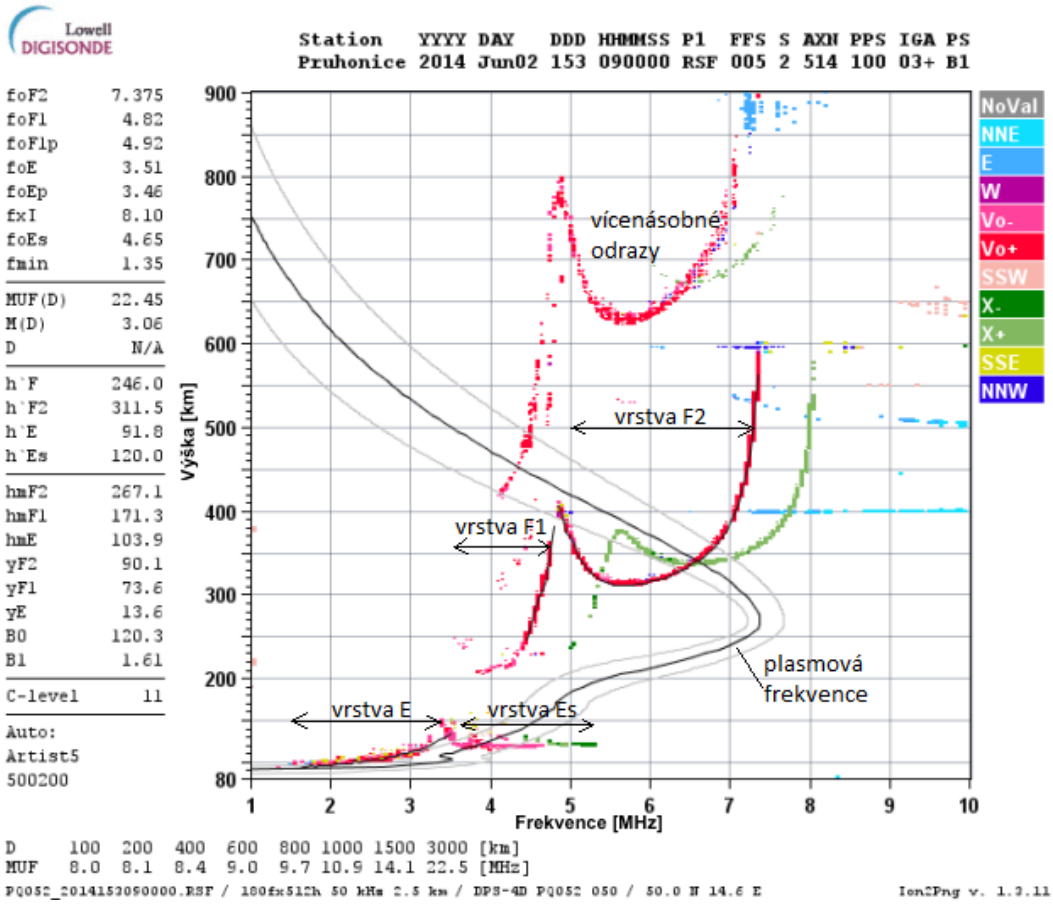
kterém se vrací do přijímací antény. V případě pokročilejšího systému se měří i Dopplerův posun. Ionosonda je tvořena vysílací anténou a jednou nebo více přijímacími anténami.

Vyslaný elektromagnetický signál se v prostředí, jehož plazmová frekvence je nižší než frekvence signálu, pohybuje po své dráze. Odrazí se od ionosféry v bodě, kde se jeho frekvence rovná plazmové frekvenci prostředí. Vlny s vyšší frekvencí prostředím plazmatu procházejí. Systém přijímacích antén přijme odražený impulz a ze zjištěného časového zpoždění návratu lze spočítat tzv. virtuální výšku odrazu *h'.* Takovéto měření se provádí v České republice v observatoři Průhonice pomocí digitální ionosondy DPS-4D. Tato stanice je součástí celosvětové ionosférické měřící sítě.

3.3.1. Ionogram

Na obrázku je grafický výstup pozemního ionosférického sondování - ionogram, na kterém je zakreslena koncentrace elektronů v závislosti na výšce. Čas návratu vyslaného a od ionosféry odraženého signálu o dané frekvenci (vodorovná osa) určuje virtuální výšku ionosférických vrstev (svislá osa). Černou čárou je vykreslen skutečný průběh elektronové koncentrace, která v tomto případě dosahuje maxima ve výšce 260 km. Barvy použité pro vykreslení odrazů z jednotlivých vrstev udávají mimo jiné i směr odrazu a rozlišují řádný a mimořádný mód signálu [11].

V ionogramu je každá ionosférická vrstva reprezentovaná hladkou křivkou, oddělenou od sousední vrstvy asymptotou na hodnotě kritické frekvence. Vzestupný zakřivený začátek křivky každé vrstvy je způsoben pomalejším šířením vlny o této frekvenci než vlny o vyšších frekvencích. Výška jednotlivých vrstev se určuje jako nejnižší hodnota na svislé ose v dané části grafu.



Obrázek 6: Ionogram měřený na stanici v Průhonicích [11]

Hodnota fo_{F2} je maximem pro celou ionosféru (kromě občasného výskytu Es vrstvy s vyšší hodnotou fo_{Es}). Je měřitelná v průběhu celého dne a sledovaná od úplného počátku ionosférického sondování. Další veličinou je hm_{F2}, což je výška maxima elektronové koncentrace vrstvy F2 spočtená z modelu ionosféry. Kromě hm_{F2} popisuje výšku vrstvy F2 také výška virtuální h'_{F2}, která se přímo odečítá z ionogramu.

Kromě vrstev E, F1 a F2 je možné zaznamenat i sporadickou vrstvu Es, která je typická pro střední šířky a letní období a je reprezentována úzkou linií ve výšce asi 90-130 km [11]. Intenzivní vrstva Es může zabránit proniknutí vyslané vlny k vyšším vrstvám. Tento jev se nazývá blanketing.

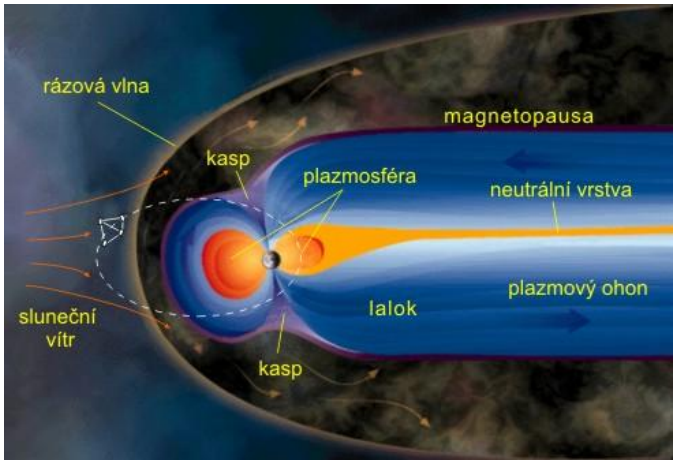
4. Zemská magnetosféra a sluneční aktivita

Chování ionosféry ovlivňuje především sluneční a geomagnetická aktivita, která zase ovlivňuje družice na oběžné dráze. Díky rotaci Země a vzdalování a přibližování Země vůči Slunci, se intenzita dopadajícího vlnění periodicky mění v závislosti na střídání dne a noci a na střídání ročních období. Stejnými periodami se mění i míra ionizace atmosféry.

Tuto sluneční i geomagnetickou aktivitu lze předvídat, toho se využívá zejména u družic, které se přepínají do bezpečného režimu, z důvodu toho, aby se předešlo větším škodám. V ojedinělých případech to není dostačující. Například u navigačního systému WAAS díky účinkům sluneční bouře došlo k problémům, kdy se stalo, že systém nebyl schopen poskytovat informace nutné pro navigaci letadel na přistání.

4.1. Zemská magnetosféra

Existence zemské magnetosféry je důsledkem existence elektrických proudů tekoucích v jádru Země. Zemská magnetosféra chrání naši Zemi před sluneční aktivitou, především před slunečním větrem. Sluneční vítr naráží na zemskou magnetosféru a silné magnetické pole Země při obtékání slunečním větrem brání elektricky nabitým částicím jejich průniku do horních vrstev atmosféry. V oblastech geomagnetických pólů Země existují otevřená místa, tzv. kasp, kde magnetické pole téměř vymizí, a proto zde mohou částice slunečního větru pronikat do zemské atmosféry. Uvolněná energie vzniklá tímto procesem je ze zemského povrchu pozorována jako známý jev - polární záře, které vznikají následkem ionizace neutrálních částic [12].



Obrázek 7: Magnetosféra Země [13]

Magnetické pole má dipólový charakter, ale magnetické póly Země nejsou shodné se zeměpisnými. V současnosti je jižní magnetický pól v blízkosti severního zeměpisného pólu a naopak [13]. Magnetický dipól je nakloněn vůči rotační ose Země o 11.5°, ale sklon osy dipólu se mění nepravidelně s časem (cca 15-60 km/rok). Díky slunečnímu větru je tvar magnetického pole deformován a to tak, že na přivrácené straně (denní strana) je magnetické pole stlačeno a jeho siločáry jsou uzavřené křivky, zatímco na odvrácené straně (noční strana) se vytváří dlouhý magnetický ohon magnetosféry.

4.1.1. Geomagnetické indexy

Jelikož geomagnetická aktivita významně ovlivňuje stav ionosféry, používá se pro její popis několik skupin geomagnetických indexů. Mezi indexy používané pro popis geomagnetické aktivity středních šířek patří indexy K, Kp a Ap. Jedná se o bezrozměrné veličiny, které popisují odchylku aktuální hodnoty horizontální složky magnetického pole od dlouhodobé hodnoty.

K index, který indikuje magnetickou aktivitu na dané stanici v 3 hodinových intervalech, zaznamenává 13 stanic umístěných ve středních geomagnetických šířkách. Index může nabývat hodnot 0 (klidná situace) – 9 (velmi silná bouře) [23].

Kp index je střední planetární hodnota tříhodinového průměru a používá se proto, že se magnetické pole mění se zeměpisnou polohou [8]. K jeho výpočtu nám slouží data K indexů. Tento index nabývá též hodnot 0-9. Při klidném dni, bude Kp index nabývat hodnot 0-4. Při silnějších magnetických bouří, nabývá Kp index hodnot 5 a vyšších [23].

Jelikož K a Kp indexy nejsou lineární, byl pro lepší práci s daty zaveden linearizovaný parametr, tzv. Ap index, který je odvozen z Kp indexu. Index Ap představuje průměrnou denní planetární aktivitu. Udává se v hodnotách 0 až 400. Od hodnoty 40 je stav magnetické aktivity hodnocen jako magnetická bouře [8].

Dst index (disturbance storm time index) se používá pro určení intenzity magnetické bouře v rovníkovém pásu a to pomocí měření intenzity prstencových proudů. V polárních oblastech určuje geomagnetickou aktivitu index AE (Auroral Electrojet).

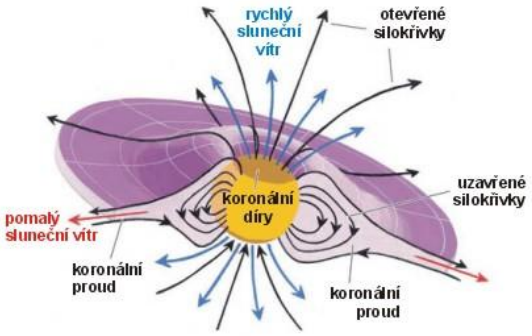
4.2. Sluneční aktivita

Během zvýšené sluneční aktivity roste pravděpodobnost častějšího výskytu erupcí a koronálního výtrysku hmoty. Vzniká deformace geomagnetického pole a následně dochází ke geomagnetickým a ionosférickým bouřím. Tyto sluneční události nejsou nebezpečné pouze pro okolní planety, ale i pro družice. Mohou zničit sluneční panely, často jediný zdroj elektrické energie družic, čímž je dokážou nadobro vyřadit z provozu. Naštěstí k tomu dochází výjimečně, neboť družice jsou na tyto situace připraveny. Nabité částice také jsou schopny změnit oběžné dráhy satelitů v magnetickém poli Země a narušit software v satelitních počítačích.

4.2.1. Sluneční vítr

Jedná se o proud elektricky nabitých částic vycházejících ze Slunce. Zdrojem slunečního větru je sluneční koróna, jejíž teplota je tak vysoká, že zdejší částice mají vysokou energii a sluneční gravitace je zde nedokáže udržet. Při interakci s magnetosférami planet a komet dochází k deformaci jejich magnetických polí. K průniku částic slunečního větru dochází na hranici mezi uzavřenými silokřivkami (přivrácená strana ke Slunci) a otevřenými silokřivkami (odvrácená strana), které se nachází v polárních oblastech.

Parametry slunečního větru závisejí na sluneční aktivitě. Rychlost slunečního větru se dělí na dvě složky. Na rychlý (až 900 km/s) a pomalý sluneční vítr (400 km/s). Rychlý sluneční vítr pochází z koronálních děr, které najdeme v polárních oblastech Slunce [15]. Pomalejší, ale naopak hustší vítr proudí z oblastí kolem slunečního rovníku a je to ta část slunečního větru, která zasahuje planety a družice.



Obrázek 8: Složky rychlosti slunečního větru [14]

V určitých vzdálenostech od Slunce se obě složky rychlosti střetávají a vznikají tak oblasti s vyšší hustotou a silnějším magnetickým polem. Ty mohou způsobit magnetické bouře, poruchu příjmu na krátkých rádiových vlnách či výpadky v elektrické síti [15].

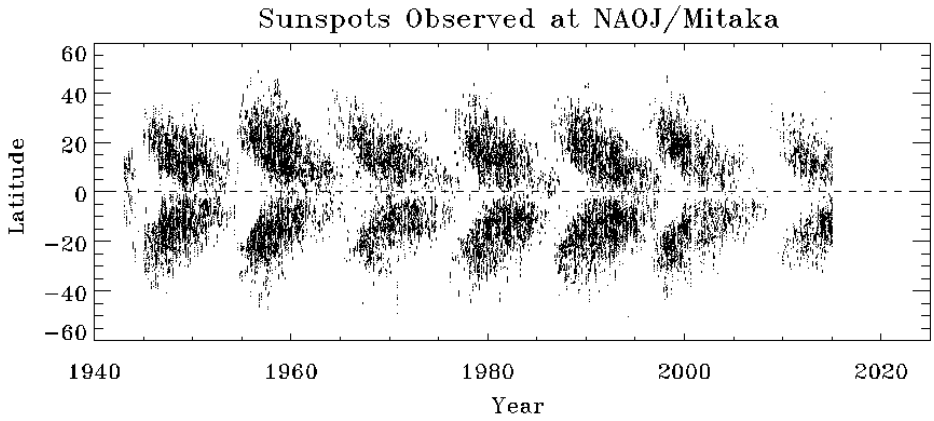
4.2.2. Sluneční skvrny

Jedná se o tmavé oblasti plazmatu na povrchu Slunce, které mají o něco nižší povrchovou teplotu než okolí. Její snížení je způsobeno přítomností silného lokálního magnetického pole, které potlačuje konvekci (přenos energie) slunečního plazmatu. Sluneční skvrny v kontrastu s mnohem svítivější okolní fotosférou se nám jeví jako tmavé, přesto jde o oblasti vysokého jasu [17]. Sluneční skvrny se většinou vyskytují ve skupinách. Počet a velikost slunečních skvrn se mění v průběhu jedenáctiletého cyklu sluneční aktivity [18]. Počet slunečních skvrn je součet viditelných tmavých oblastí na povrchu Slunce.

4.2.3. Sluneční cyklus

Cyklus slunečních skvrn je přibližně jedenáctileté období sluneční aktivity. Tento cyklus vychází z průběhu slunečních skvrn (Motýlkový diagram) a souvisí také s obrácením magnetické polarity Slunce. Jednotlivé cykly netrvají vždy jedenáct let, ve skutečnosti se jeho délka pohybuje mezi 9 až 14 lety [19]. Slunce se dostane z nejnižší aktivity, kdy se nevyskytují žádné sluneční skvrny a magnetické pole Slunce je téměř dipólového charakteru, do nejvyšší aktivity, kdy je erupčně i radiově nejaktivnější, dochází častěji ke koronálním výronům hmoty a objevuje se velké množství slunečních skvrn. Po maximu své aktivity se Slunce vrací do minima a začíná další cyklus.

Jako začátek současného cyklu 24 se uvádí 4. leden 2008. Nyní však Slunce přešlo do fáze útlumu, jeho aktivita během 23. až 24. slunečního cyklu klesla na nejnižší úroveň za uplynulých 200 let [19]. A to především díky jeho extrémní délce a nízkému počtu slunečních skvrn. Čím delší sluneční cyklus je, tím nižší je sluneční aktivita.



Obrázek 9: Motýlkový diagram [16]

V grafu jsou zakresleny skvrny v závislosti na čase a poloze (v heliografických šířkách). Na svislé ose je heliografická šířka sluneční skvrny a na vodorovné ose čas. Každá sluneční skvrna je zakreslena malou tečkou.

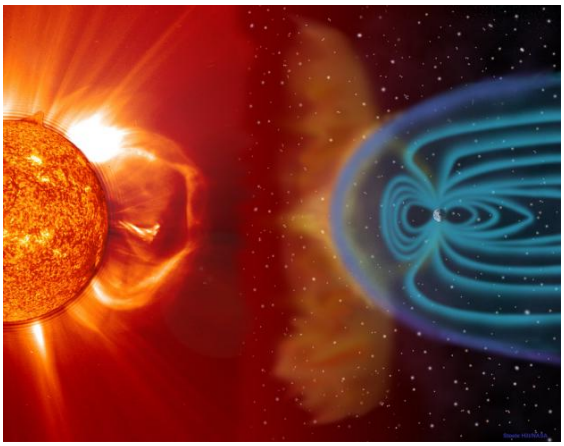
4.2.4. Sluneční erupce

Sluneční erupce jsou obrovské exploze na povrchu Slunce, které jsou projevem slunečního magnetismu. Erupce vznikají v blízkosti slunečních skvrn, obvykle na rozhraní oblastí s opačnou magnetickou polaritou. Jsou charakteristické vyzařováním velkého množství vysoce energetických částic.

Sluneční erupce silně ovlivňují vesmírné počasí v blízkosti Země. Do sluneční soustavy a tím i do geomagnetického pole Země se uvolňuje velké množství vysokoenergetických částic, které vnímáme jako radiaci. Díky magnetickému poli nehrozí lidem na Zemi velké nebezpečí. Naopak mohou představovat značné nebezpečí pro kosmické sondy a jejich lidskou posádku [20]. Sluneční erupce může také přispět k větší intenzitě polární záře a omezit nízkofrekvenční navigace (přerušit rádiové spojení). Silnější erupce mohou proniknout přes stínění družic a poškodit jejich elektroniku. Nevytvářejí žádné viditelné škody, ale počítačové čipy na družici mohou být radiací dočasně či trvale poškozeny. Avšak obyčejné erupce nezpůsobují žádné problémy, jelikož družice mají stíněnou a radiačně odolnou elektroniku.

4.2.5. Koronální výtrysky hmoty

Koronální výtrysky hmoty neboli CME (Coron Mass Ejection) jsou razantní sluneční erupce plazmy, které po zasažení Země mají za následek geomagnetické bouře. Jsou to v podstatě obrovské bubliny skládající se z miliardy tun plazmatu. Po odmrštění bubliny CME již plazma není stlačována magnetickým polem a vytváří oblak velikosti milionů kilometrů. Postupující CME strhává pomalejší sluneční vítr a tím vytváří rázovou vlnu. Frekvence CME souvisí s fázemi slunečního cyklu. Ve slunečním maximu lze pozorovat CME až 3x denně [22].



Obrázek 10: Koronální výtrysk hmoty [21]

Obdobně jako u slunečních erupcí je pro člověka důležité sledování a předpověď CME, zvláště proto, že škody způsobené CME jsou mnohonásobně větší [22]. CME dokážou překonfigurovat magnetické pole naší planety. To má za následek magnetické bouře, které mají dalekosáhlé účinky v podobě výpadku pozemských energetických sítí a radiační bouře, které způsobují oslepení družic, GPS systémů nebo změní oběžné dráhy družic [21]. Pro zachování oběžné dráhy musí družice použít extra palivo, aby se posunula na vyšší dráhu, ačkoli to bývá na úkor zkrácení její životnosti. Částice CME se také mohou srazit se stěžejní elektroniku na palubě družice a narušit její systémy. V současné době jsme schopni s 80 % pravděpodobností určit, zda nově vzniklé CME zasáhne Zemi.

5. GNSS (Global Navigation Satellite Systém)

Pojem GNSS zahrnuje všechny technologie a systémy, které využívají družicový systém k prostorovému určení polohy a rychlosti na kterémkoli místě na Zemi a to v reálném čase. Na základě odeslaných signálů z družic lze zjistit polohu s přesností na desítky až jednotky metrů. Pro účely civilního letectví definuje ICAO Globální navigační satelitní systém v leteckém předpisu L10 následovně:

„GNSS je celosvětový systém sloužící pro určování polohy a času, který zahrnuje konstelaci jedné nebo více družic, letadlových přijímačů a monitorování integrity systému, rozšířený, pokud je to nezbytné, k podpoře požadované navigační výkonnosti pro určitý provoz.“ [27]

V současnosti se využívají GNSS jako jsou americký polohový systém Navstar GPS nebo ruský Glonass. Evropský kontinent buduje svůj vlastní navigační systém Galileo, který by měl být obdobou těchto systémů. Spuštění tohoto systému je plánováno na rok 2018.

Současné GNSS systémy (zahrnuty i systémy ve stadiu budování či modernizace)

- Americký GPS NAVSTAR (Global Positioning System)
- Ruský GLONASS (Global Navigation Satelite System)
- Evropský Galileo (Globální navigační družicový systém EU)
- Čínský Beidou - Compass (autonomní družicový polohový systém)
- Indický IRNSS (autonomní družicový polohový systém)
- Japonský QZSS (autonomní družicový polohový systém)

Mezi základní výkonnostní požadavky GNSS patří přesnost, integrita, doba do výstrahy, kontinuita a dostupnost. Ve všech těchto parametrech již překonává všechny stávající technologie pro navigaci.

5.1. Vliv ionosféry na GNSS

Na zařízení GPS působí různé chyby, jejichž důsledkem je snížení přesnosti určení polohy uživatele. Jedním z hlavních zdrojů chyb globálního družicového navigačního systému je právě ionosféra. Ionosférické účinky na družicové signály musí být v procesu určování polohy GNSS patřičně zohledněny, aby bylo možné získat přesnou polohu. Přestože ionosférické zpoždění signálu GNSS je vždy přítomné a mění se pouze jeho velikost, lze tento zdroj chyb snížit na minimální hodnotu a v ideálním případě eliminovat. Avšak během

období se zvýšenou ionosférickou aktivitou nebo během geomagnetických bouří mohou uživatelská zařízení zaznamenat zbytkové ionosférické účinky, které nelze efektivně modelovat a napravovat, což může způsobit snížení navigačního výkonu uživatele [45].

Signály ze satelitů se šíří různými vrstvami atmosféry. Rychlost šíření se mění se změnami indexu lomu atmosféry *n*. Ionosféra *n*<1, troposféra *n*>1. To má zásadní vliv na přesnost systémů [30].

5.1.1. TEC

Rychlost šíření elektromagnetických signálů GNSS v ionosféře závisí na hustotě elektronů. Proto je klíčovým parametrem TEC (Total Electron Content), což je celkový obsah elektronů ve sloupci o ploše 1 m^2 z místa pozorování k satelitu [30]. Zpoždění způsobené ionosférou popisujeme právě pomocí tohoto parametru, který je zpoždění přímo úměrný. Čím větší TEC je, tím větší bude zpoždění GNSS signálu. Vyjadřuje se vzorcem:

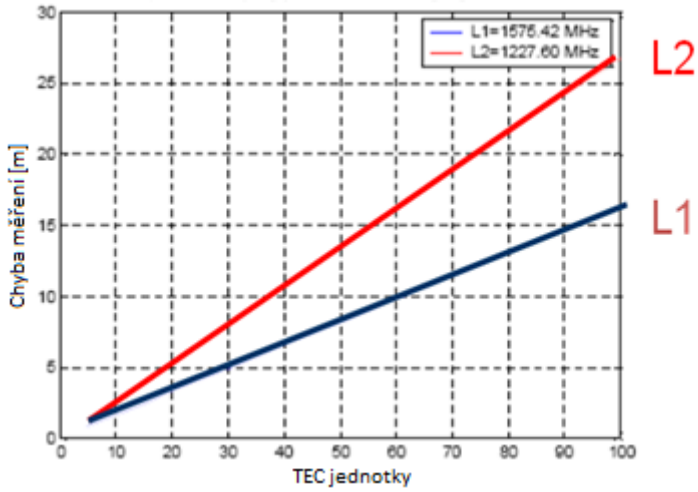
$$TEC = \int N_e \cdot ds \qquad [počet\ elktronů \cdot m^{-2}] \tag{4.1}$$

kde N_e je elektronová hustota podél dráhy signálu *s.*

TEC se měří podél trasy signálu danou jeho frekvencí. Platí zde závislost, že čím nižší je frekvence signálu, tím delší je zpoždění. Je měřen v konkrétní TEC jednotce – TECU (TEC Unit), která je stanovena na 1 TECU = $1x10^{16}$ elektronů/m^2 [29]. Hodnota jednoho TECU odpovídá chybě v měření vzdálenosti ve velikosti 16,2 m na frekvenci GPS L1.

Tabulka 1: Závislost ionosférického zpoždění na TEC a frekvenci signálu [30]

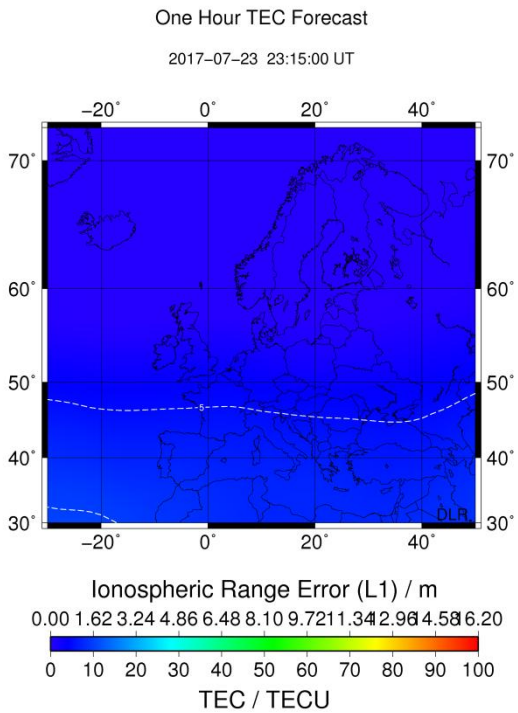
Frekvence	$TEC = 10^{16} el/m^2$	$TEC = 10^{18} el/m^2$
100 MHz	40,00 m	4030,0 m
400 MHz	2,50 m	250,0 m
1200 MHz	0,28 m	28,0 m
1600 MHz	0,16 m	16,0 m
5000 MHz	0,016 m	1,6 m



Obrázek 11: Závislost ionosférického zpoždění na TEC a frekvenci signálu [30]

TEC závisí na denní, roční době, zeměpisné šířce, sluneční aktivitě, geomagnetické aktivitě a dalších fluktuací hustoty. Se vzrůstající sluneční aktivitou roste elektronová hustota. V průběhu období stabilních podmínek v ionosféře je možné předpovídat TEC a ionosférický index lomu na několik dnů dopředu.

Pomocí monitorování TEC map, které permanentně sledují ionosféru, můžeme detekovat i blížící se magnetickou bouři. Monitoring mapy je obnoven každých 5 minut. Malý TEC gradient značí klidnou situaci [30].



Obrázek 12: TEC za klidných podmínek - jednohodinová předpověď [31]

5.1.2. Ionosférická refrakce

Při průchodu signálu ionosférou dochází k tzv. ionosférické refrakci. Ionosférická refrakce je závislá na množství volných elektronů v jednotce objemu atmosféry. Je různá pro kódová a fázová měření a je závislá na frekvenci procházejících vln. Dochází ke změně rychlosti šíření elektromagnetické vlny (rychlost se mění v závislosti na počtu volných elektronů v ionosféře). Dochází i ke změně směru šíření a ke zpoždění signálu. Příčinou je měnící se index lomu, který ovlivňuje ohyb dráhy a v důsledku toho dochází k prodloužení doby šíření. Signál, který se dostává k uživateli, jde tedy po delší cestě, než skutečně měl jít. Největší vliv ionosféry je při měření ve dne, naopak v noci je vliv podstatně menší. Chyba určování vzdálenosti způsobená ionosférou dosahuje hodnot 1-50 m.

Chyba měření vzdálenosti mezi družicí a přijímačem je počítána podle následujícího vztahu, kde TEC je celkový obsah elektronů a *f* je nosný kmitočet signálu.

$$d_I \approx \frac{K}{f^2} \int n_e ds = \frac{K}{f^2}\, TEC \;\; [m], \tag{4.2}$$

kde K = 40,3 m^3s^{-2} a integrál elektronové hustoty n_e podél dráhy paprsku je TEC.

Ionosférická chyba je vysoce variabilní a závisí na elevaci satelitu, geomagnetické šířce uživatele, sluneční aktivitě, výskytu dalších jevů ovlivňujících ionosféru (magnetická bouře), denní době a ročním období.

Tuto chybu lze eliminovat pomocí ionosférických korekcí, kterým se budu věnovat v samostatné části.

5.1.3. Troposférická refrakce

Obdobný vliv na šíření signálů má troposféra, která se nachází ve výškách cca 0–15 km nad zemským povrchem. Troposféra tlumí elektromagnetické vlny s kmitočty od 20 GHz pro bezoblačný stav atmosféry a přibližně od 5 GHz při dešti. Proto jediným jejím efektem je troposférické zpoždění [34].

Troposférická refrakce je závislá na hustotě prostředí. Její stav ovlivňují především lokální meteorologické vlivy jako je teplota, tlak nebo vlhkost, ale také umístění antény vysílače a přijímače. Protože není závislá na frekvenci nosné vlny, nemůže být eliminována pomocí

dvoufrekvenční metody, které se využívá při odstranění ionosférické refrakce. Možnost predikce troposférické refrakce je pro globální systém minimální a eliminuje se pomocí diferenciálních korekcí (jednoduché, dvojité, trojité). Další možností redukce vlivu troposférické refrakce je použití standardního modelu atmosféry nebo výpočet parametrů troposféry z GPS měření na známých bodech. Troposférický model, který vypočítává opravu měření, je uložen v přijímači [35].

Troposférické zpoždění může být způsobeno buď suchými plyny, nebo vodními párami přítomnými v troposféře. Vliv suchých plynů lze předvídat, liší se podle místních teplot a atmosférického tlaku. Naopak chyba způsobená vodní párou a kondenzovanou vodou, která závisí na povětrnostních podmínkách, lze těžce předpovídat. Chyba způsobená touto složkou je malá, pouze několik desítek centimetrů [35].

Troposférické korekce

Pro eliminaci troposférické chyby existuje několik troposférických modelů. Vzhledem k rozdílům mezi atmosférickými profily suchých plynů a vodních par je lepší použít různé druhy mapování, zvlášť pro hydrostatickou složku a zvlášť pro vlhkou složku. Nicméně existují i jednodušší modely, které mapují obě složky zároveň.

Troposférické modely se dělí do dvou skupin:

a) Geodetické – Saastamoinen, Hopfield – jsou přesnější než ostatní modely, ale zato složitější. Vyžadují povrchové meteorologické údaje, jejichž přesnost ovlivňuje kvalitu těchto dat [35].
b) Navigační – méně přesnější, ale nejsou potřeba meteorologická data.

Pomocí Saastamoinen modelu se troposférická chyba odstraňuje následovně:

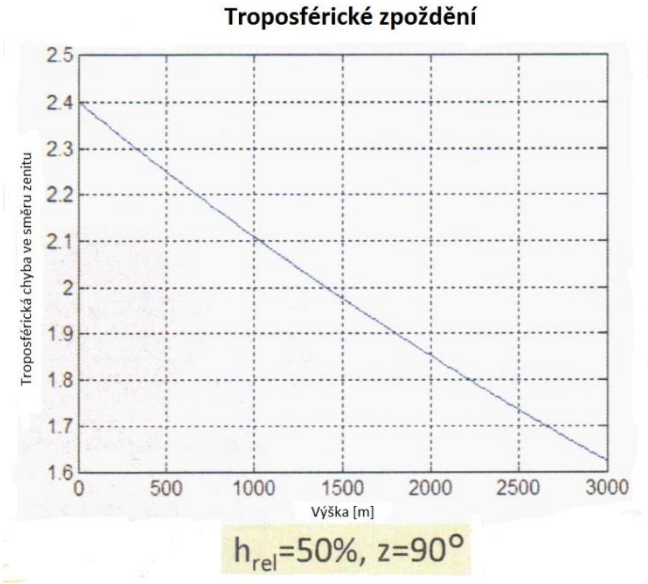
$$\Delta\rho^{trop} = \frac{0{,}002277}{\cos z}\left\{p + \left(\frac{1255}{T} + 0{,}05\right)e - tan^2\, z\right\}, \tag{4.3}$$

kde

$\Delta\rho^{trop}$	troposférická chyba v metrech
z	zenit
$p = 1013{,}25 \times (1 - 2{,}2557 \times 10^{-5}H)^{5{,}2568}$	atmosférický tlak
$T = 15{,}0 - 6{,}5 \times 10^{-3}H + 273{,}15$	teplota
H	geopotencionální výška

$e = 6{,}108 \times \exp\left\{\frac{17{,}15T-4684{,}0}{T-38{,}45}\right\} \times \frac{h_{rel}}{100}$ tlak vodní páry

h_{rel} relativní vlhkost vzduchu



Obrázek 13: Závislost troposférického zpoždění na výšce [35]

6. Ionosférické korekce GNSS

Neustálá snaha o zvýšení přesnosti systémů GNSS vede zřizovatele k zavádění tzv. ionosférických korekcí. Aby bylo možno využít technologii GNSS pro navigaci v pokud možno reálném čase, je nutné tyto korekce přenášet do aparatury uživatele. Bylo vyvinuto několik modelů a metod, které tyto korekce počítají.

V přijímačích signálů je implementován základní model, který korekce zohledňuje a v navigační zprávě jsou obsaženy vstupní parametry pro výpočet korekce.

Ionosférická chyba lze eliminovat těmito způsoby:

a) Dvoufrekvenční modely
    - Kódová měření
    - Fázová měření
    - MIDAS
b) Jednofrekvenční modely
    - Klobucharův model
    - BeDiou
    - IRI
    - NeQuick model
    - NTCM

6.1. Dvoufrekvenční ionosférické modely

Družice vysílá dva signály na dvou frekvencích. Pomocí dvoufrekvenčního přijímače se měří signály na obou frekvencích a počítá se korekce z rozdílu času mezi signály obou kmitočtů pomocí vhodné lineární kombinace. Vytvoření lineárních rovnic s různými frekvencemi umožňuje eliminovat účinek ionosféry ve velkém rozsahu [36].

6.1.1. Kódová měření

Základním principem kódových měření je určování vzdálenosti mezi přijímačem a družicemi. Běžně se k tomuto účelu využívají tzv. dálkoměrné kódy PRN vysílané jednotlivými družicemi. Dálkoměrné kódy jsou, zjednodušeně řečeno, přesné časové značky, umožňující

přijímači určit čas (na základě časového posunu), kdy byla odvysílána kterákoliv část signálu vysílaného družicí.

<u>Výpočet korekce:</u>

1. Pro každou frekvenci platí rovnice:

$$P_1 = \rho + c(\delta t_R - \delta t^S) + \Delta\rho^{trop} + \Delta\rho_1^{ion} + c(b_R + b^S)_1 + \varepsilon_1, \tag{5.1}$$

$$P_2 = \rho + c(\delta t_R - \delta t^S) + \Delta\rho^{trop} + \Delta\rho_2^{ion} + c(b_R + b^S)_2 + \varepsilon_2, \tag{5.2}$$

kde

P_i	šikmá vzdálenost mezi družicemi a přijímačem na frekvenci *i*
ρ	geometrická vzdálenost mezi družicemi a přijímačem
$\delta t_R, \delta t^S$	koordinace času přijímače a satelitních hodin s GPS časem
$\Delta\rho^{trop}$	chyba měření vzdálenosti signálu v důsledku troposféry
$\Delta\rho_i^{ion} = \frac{40{,}31}{f^2} TEC$	chyba měření vzdálenosti signálu způsobené ionosférou
b_R, b^S	frekvenčně závislé hardwarové zpoždění družice a přijímače
ε_i	náhodná chyba na frekvenci *i*

2. Lineární kombinace vypadá teď takto:

$$P_{1,2} = n_1 P_1 + n_2 P_2, \tag{5.3}$$

kde n_1 a n_2 jsou členy, které mají být určeny tak, aby se ionosférická refrakce vyrušila.

3. Substitucí rovnice 5.1/5.2 do 5.3 dostáváme vztah

$$n_1 \Delta\rho_1^{ion} + n_2 \Delta\rho_2^{ion} = 0 \tag{5.4}$$

4. Za předpokladu, že platí

$$n_1 = +\frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2}, \qquad n_2 = -\frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2}\ , \tag{5.5}$$

kde f je frekvence signálu.

5. Substitucí n_1 a n_2 do vztahu 5.4 dostáváme lineární kombinaci se započtenou ionosférickou refrakcí pro kódová měření:

$$P_{1,2} = \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} P_1 - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} P_2 = P_3 \tag{5.6}$$

P_3 vyjadřuje vzdálenost se započtenou ionosférickou korekcí mezi satelitem a přijímačem při kódovém měření.

6. Můžeme ji také napsat jako:

$$P_3 = \frac{1}{1-\gamma}(P_1 - \gamma P_2), \tag{5.7}$$

kde

$$\gamma = \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2}\,. \tag{5.8}$$

6.1.2. Fázová měření

Fázová měření jsou založena na odlišném principu. Vůbec nepracují s dálkoměrnými kódy PRN, nýbrž zpracovávají vlastní nosné vlny L1 a L2. Zjednodušeně lze říci, že při fázových měřeních přijímač spočítá počet vlnových délek nosné vlny, nacházejících se mezi přijímačem a družicí. Protože ale u klasické sinusové vlny nelze určit čas jejího odeslání (jako je tomu u dálkoměrných kódů), obsahují fázová měření nejednoznačnosti (ambiguity) rovnající se počtu celých vlnových délek nosné vlny, nacházejících se mezi přijímačem a družicí. Ambiguity se počítají vyrovnáním stejně jako ostatní neznámé v systému rovnic fázových pozorování. V této fázi získáme přibližné hodnoty, které však nejsou celočíselné. Tyto hodnoty se zaokrouhlí na celá čísla a provede se nové vyrovnání [34].

<u>Výpočet korekce:</u>

1. Pro každou frekvenci platí rovnice:

$$L_1 = \rho + c(\delta t_R - \delta t^S) + \Delta\rho^{trop} - \Delta\rho_1^{ion} + \lambda_1 B_1 + \varepsilon_1, \tag{5.9}$$

$$L_2 = \rho + c(\delta t_R - \delta t^S) + \Delta\rho^{trop} - \Delta\rho_2^{ion} + \lambda_2 B_2 + \varepsilon_2, \tag{5.10}$$

kde

λ_i vlnové délky v kmitočtovém pásmu *i*

$\lambda_i B_i$ konstantní odchylka obsahující ambiguity

2. Nyní se provede lineární kombinace analogicky jako v rovnici 5.3

$$L_{1,2} = n_1 L_1 + n_2 L_2\ , \tag{5.11}$$

3. Se stejnými koeficienty jako v rovnici 5.5 dostáváme lineární kombinaci se započtenou ionosférickou refrakcí pro fázová měření:

$$L_{1,2} = \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} L_1 - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} L_2 = L_3 \ , \tag{5.12}$$

kde f je frekvence signálu.

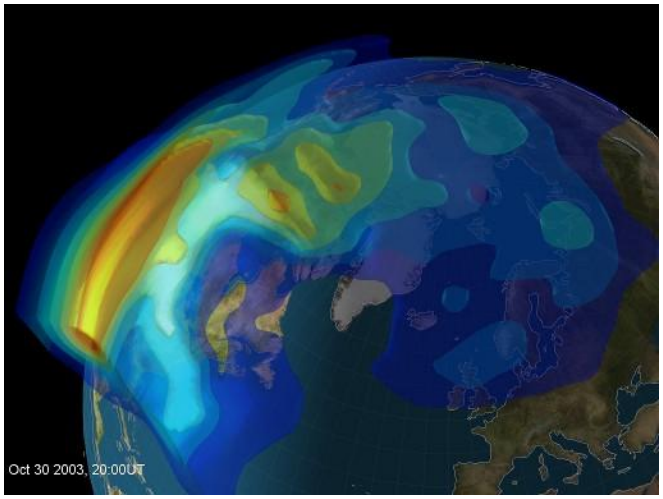
L_3 vyjadřuje vzdálenost se započtenou ionosférickou korekcí mezi satelitem a přijímačem při fázovém měření.

4. Rovnici můžeme napsat také jako:

$$L_3 = \frac{1}{1-\gamma}(L_1 - \gamma L_2) \ . \tag{5.13}$$

6.1.3. MIDAS

The Multi-Instrument Data Analysis System využívá dvoufrekvenčního GPS měření k vytvoření 4D map elektronové koncentrace nad velkými zeměpisnými regiony nebo dokonce po celém světě. Tyto mapy mohou být použity ke korekci fázových odchylek a změn polarizace, které se mění v závislosti na Faradayově rotaci. MIDAS může také sledovat paprsky, čímž umožňuje přesné určení směru při jeho lomu [36].



Obrázek 14: 4D MIDAS mapa [39]

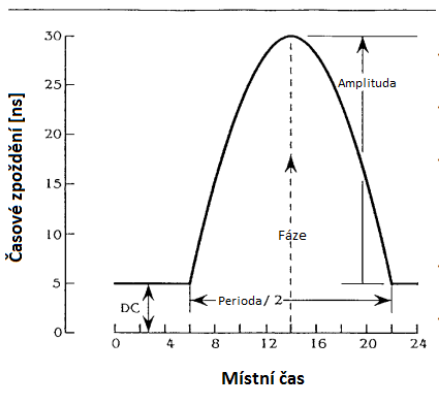
6.2. Jednofrekvenční modely

Tyto modely počítají ionosférické zpoždění pomocí jednofrekvenčních přijímačů. Data pro výpočet získávají tak, že mapují ionosféru v reálném čase a informace pak přenáší k uživateli navigace.

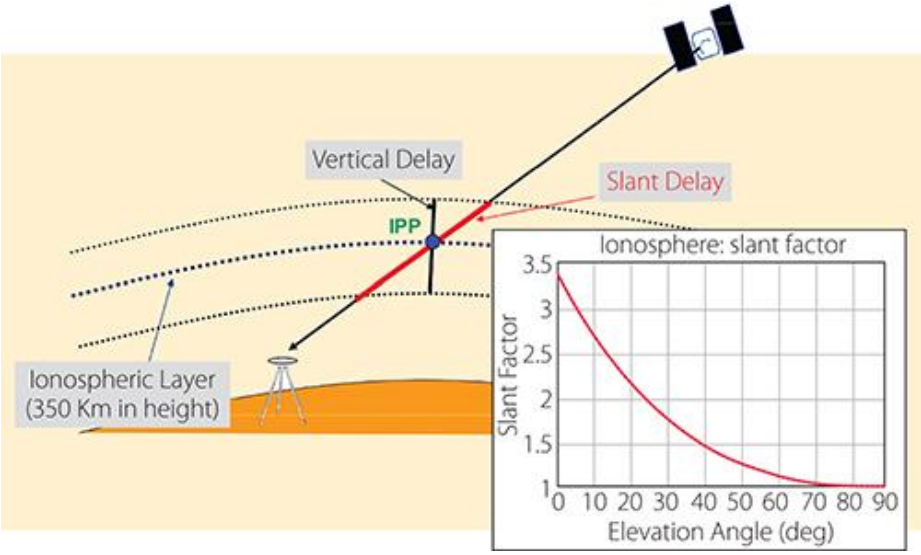
6.2.1. Klobucharův model

Jednofrekvenční přijímače bez dostupného signálu podsystémů SBAS, GBAS a GRAS s odpovídající implementací v uživatelském zařízení, využívají pro výpočet opravy ionosférické chyby Klobucharův model. Uvádí se, že model je schopen kompenzovat přibližně 50 % chyby určování vzdálenosti k danému satelitu. Klobucharův model nepočítá přímo TEC, ale vypočítává časové zpoždění v důsledku ionosférické aktivity. Časové zpoždění a chyba určování vzdálenosti k satelitu jsou spočteny pomocí osmi koeficientů. Vstupní parametry výpočtu jsou určeny řídícím segmentem GPS a jsou distribuovány GPS navigační zprávou do přijímače GPS, kde jsou koeficienty vloženy do modelové rovnice a používány přijímači pro odhadnutí zpoždění signálu způsobeného ionosférou. Model je dostatečně jednoduchý pro praktické uplatnění v procesu určování polohy v reálném čase, s nízkým požadavkem na kapacitu přenosu [36].

Zpoždění L1 signálů šířících se skrz ionosféru ve vertikálním směru je popsáno pomocí jednoduché kosinové funkce. Amplituda a perioda kosinové funkce závisí na poloze bodu průniku ionosféry IPP (Ionospheric Pierce Points). Poloha bodu průniku ionosféry je definována jako průsečík rovné úsečky mezi přijímačem a družicí s vrstvou nacházející se v konstantní výšce 350 km. Maximální zpoždění signálu bývá nejčastěji po poledni místního času. V noci má zpoždění konstantní hodnotu 5 ns [32].



Obrázek 15: Kosinová funkce popisující Klobucharův model [32]



Obrázek 16: Výpočet šikmého zpoždění [38]

<u>Klobucharův algoritmus:</u>

Algoritmus, který se používá v jednofrekvenčním přijímači vypadá následovně:

1. Vypočteme sklon zemské osy

$$\psi = \frac{0{,}0137}{E+0{,}11} - 0{,}022, \tag{5.14}$$

kde *E* je elevační úhel (úhel sklonu družic vůči GPS přijímačím).

2. Vypočteme zeměpisnou šířku bodu průniku ionosféry IPP

$$\phi_i = \phi + \psi \cos A, \tag{5.15}$$

kde ϕ je geodetická zeměpisná šířka, ψ je sklon zemské osy a A je azimut satelitu vztaženého k poloze přijímače.

3. Vypočteme zeměpisnou délku IPP

$$\lambda_i = \lambda + \frac{\psi \sin A}{cos\phi_i}, \tag{5.16}$$

kde λ je geodetická zeměpisná délka a ϕ_i je zeměpisná šířka IPP.

4. Najdeme geomagnetickou šířku IPP

$$\phi_m = \phi_i + 0{,}064 \cos(\lambda_i - 1{,}617), \tag{5.17}$$

kde λ_i je zeměpisná délka IPP.

5. Zjistíme místní čas v IPP

$$t = 4{,}32 \times 10^4 \lambda_i + t_{GPS}, \tag{5.18}$$

kde t_{GPS} je čas GPS v sekundách.

6. Spočteme amplitudu ionosférického zpoždění

$$A_i = \sum_{n=0}^{3} \alpha_n \phi_m^n, \tag{5.19}$$

kde α_n je Klobucharův parametr a ϕ_m je geomagnetická šířka IPP.

7. Spočteme periodu ionosférického zpoždění

$$P_i = \sum_{n=0}^{3} \beta_n \, \phi_m^n, \tag{5.20}$$

kde β_n je Klobucharův parametr.

8. Vypočítáme fázi ionosférického zpoždění

$$X_i = \frac{2\pi(t-50\,400)}{P_i} \qquad [rad], \tag{5.21}$$

kde *t* je místní čas a P_i je perioda ionosférického zpoždění.

9. Vypočítáme faktor šikmé složky

$$F = 1{,}0 + 16{,}0 \times (0{,}53 - E)^3, \tag{5.22}$$

kde *E* je elevační úhel.

10. Spočteme ionosférické časové zpoždění

$$T_{iono} = \begin{cases} F \times 5 \times 10^{-9} & (|X_i| > 1{,}57) \\ F \times \left(5 \times 10^{-9} + \sum_{n=0}^{3} \alpha_n \phi_m^n \times \left(1 - \frac{X_i^2}{2} + \frac{X_i^4}{24}\right)\right) & (|X_i| \leq 1{,}57) \end{cases}, \tag{5.23}$$

kde *F* je faktor šikmé složky a X_i je fáze ionosférického zpoždění.
Zpoždění je dáno v sekundách a je odkazováno na frekvenci L1.

11. Spočteme chybu měření vzdálenosti

$$D_{iono} = T_{iono} \cdot C \qquad [m], \tag{5.24}$$

kde T_{iono} je ionosférické časové zpoždění a C je rychlost světla ($3 \cdot 10^8 \; m/sec$).

6.2.2. BeDiou model

Tento model funguje na stejném principu jako Klobucharův model, ale je určen pro systém BeDiou. Jediné rozdíly jsou v tom, že poloha průniku bodu se nachází ve výšce 375 km (o 25 km výš) a že používá vlastní modelové parametry, které jsou generovány z monitorovacích stanic v Číně a jsou aktualizovány každé dvě hodiny. Tato data jsou vysílána prostřednictvím

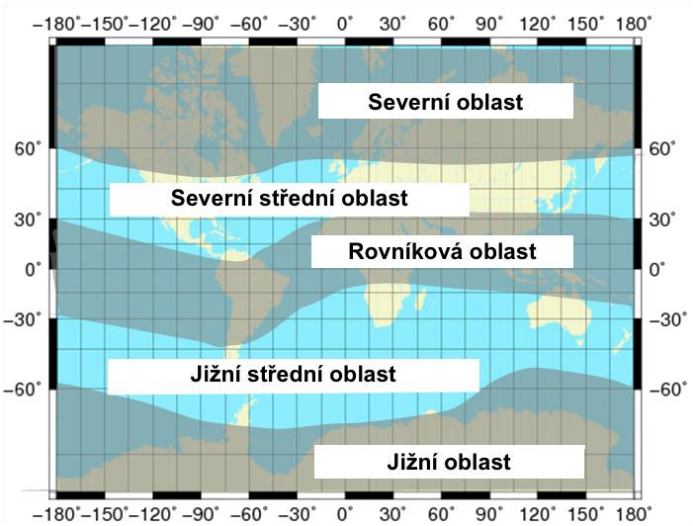
navigační zprávy s označením BDSA a BDSB. Uvádí se, že model BeDiou překonává Klobucharův model pro uživatele severní polokoule v oblasti Asie a Tichomoří, ale vykazuje zhoršený výkon mimo tuto oblast [48].

6.2.3. IRI

International Reference Ionosphere (IRI) je mezinárodní projekt, který vznikl za účelem vytvořit standardní referenční model ionosféry. IRI poskytuje měsíčně průměrné hodnoty elektronové hustoty, teploty elektronů, teploty iontů, iontové složení v určité nadmořské výšce a to pro danou lokaci, čas a datum. Vertikální profil elektronové hustoty v rámci IRI je rozdělen na 6 oblastí. Data získávají z celosvětově pokryté sítě pomocí ionosond, které monitorují elektronovou hustotu na vrcholu vrstvy F a pod ní, dále pak z radarů a satelitů [36].

6.2.4. NeQuick model

NeQuick model je třírozměrný a časově závislý model elektronové hustoty, který je schopen kompenzovat přibližně 75 % chyb určování vzdálenosti k danému satelitu. Poskytuje TEC a profil elektronové hustoty pro libovolnou dráhu v daném čase [36]. Ke zjištění vertikálního profilu elektronové hustoty až k maximu vrstvy F2 má model předdefinovaných pět oblastí a využívá k tomu čtyři vstupní parametry, které jsou vysílány prostřednictvím navigační zprávy s označením GAL. Používá také 13 datových souborů s číselnými hodnotami, které musí přijímač obsahovat, aby se model mohl používat. Tato data se musí přibližně každých 5 let aktualizovat [48].



Obrázek 17: Pět oblastí definovaných v NeQuick modelu [48]

Vstupními parametry modelu jsou poloha (zeměpisná šířka, zeměpisná délka, nadmořská výška), období (měsíc a UT) a solární aktivita (určená číslem slunečních skvrn R_{12} nebo indexem F10,7, který vyjadřuje intenzitu slunečního rádiového záření o délce 10,7 cm). Výstupem je koncentrace elektronů v libovolném místě v prostoru a čase.

První verze tohoto modelu byla použita Evropskou kosmickou agenturou (ESA) pro systém Evropské podpůrné geostacionární navigační služby EGNOS, byl také přijat jako korekční model pro jednofrekvenční polohovací služby v rámci Evropského Galileo projektu [36].

<u>NeQuick algoritmus (pro Galileo jednofrekvenční přijímač):</u>

1. Určíme účinnou úroveň ionizace (effective ionisation level) A_z, která je vyhodnocena pomocí koeficientů $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$. Tyto modelové vstupní hodnoty jsou vypočítány pomocí parametrů z navigační zprávy.

$$A_z = \alpha_{0+}\alpha_1\mu + \alpha_2\mu^2, \tag{5.24}$$

kde $\tan\mu = \frac{I}{\sqrt{cos\phi}}$; I je magnetický sklon a ϕ je zeměpisná šířka přijímače.

2. Elektronová hustota je vypočtena pro bod nacházející se na dráze paprsku mezi družicí a přijímačem. Místo F10,7 se počítá s A_z.

3. Kroky 1 a 2 se opakují pro mnoho diskrétních bodů nacházejících se na dráze paprsku mezi satelitem a přijímačem. Počet a rozestup bodů závisí na výšce.

4. Všechny hodnoty elektronové hustoty podél paprsku jsou integrovány za účelem získání šikmého TEC (Slant TEC = STEC).

5. STEC v jednotce TECU je přepočten na metry. Šikmá chyba vzdálenosti na frekvenci L1 je vyjádřena vztahem:

$$I_f = \frac{40{,}3\times10^{16}}{f^2}\,TEC\ . \tag{5.25}$$

Stejně jako u Klobucharového modelu lze ionosférické korekce vypočítané pomocí NeQuick modelu použít pro všechny signály (GPS, GLONASS, Galileo apod.), jednoduše nastavením odpovídající frekvence v poslední vzorci [48].

6.2.5. NTCM

Neustrelitz TEC Model (NTCM) je empirický model, který určuje TEC na globálním i regionálním základě. NTCM je klimatologický model, který poskytuje hodnoty průměrného chování ionosféry za klidných geomagnetických podmínek. V závislosti na pokryté oblasti je model reprezentován dvěma způsoby [36].

Regionální model, který je rozvinutý ve třech oblastech:

- Evropský region (NTCM-EU)
- Severní polární oblast (NTCM-NP)
- Jižní polární oblast (NTCM-SP)

Pro každý z těchto modelů je vyvinut model TEC, který je doplněn naměřenými daty v rámci daného regionu. NTCM udává TEC jako funkci zeměpisné polohy (λ, ϕ), času (h, d) a sluneční aktivity (F10,7). Model popisuje následující rovnice:

$$TEC_{60}^{vert} = \sum_{i=1}^{5}\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{2}\sum_{l=1}^{2} c_{ijkl}\, H_i(h) Y_j(d) L_k(\varphi, \lambda, h, d) S_l(F10.7), \tag{5.26}$$

kde c_{ijkl} označuje modelové koeficienty, $H_i(h)$ označuje denní variace, $Y_j(d)$ roční a půlroční variace, $L_k(\varphi, \lambda, h, d)$ představuje závislost na zeměpisné šířce a úhlu slunečního zenitu a $S_l(F10{,}7)$ představuje závislost na sluneční aktivitě. Modelové koeficienty určíme pomocí metody nejmenších čtverců [36].

Globální model

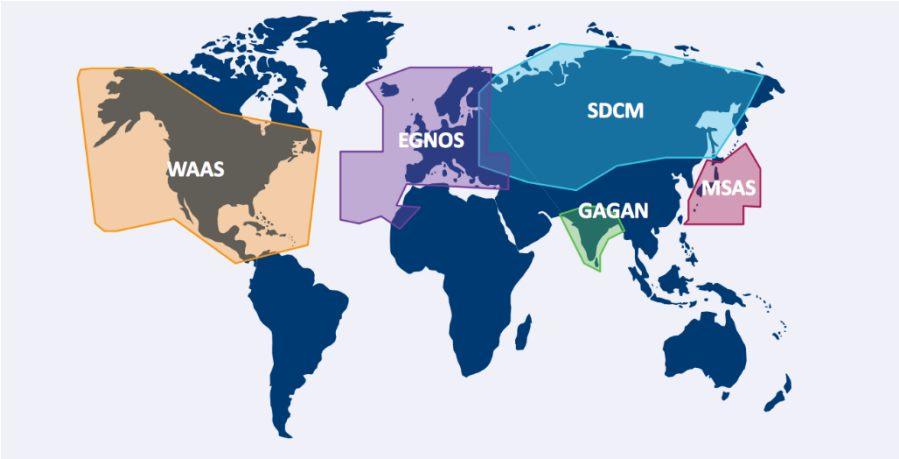
Pro globální TEC model (NTCM-GL) se vychází z regionálního modelu, a proto se závislosti na místním čase, roční době, geomagnetickém poli a slunečních aktivitách řeší podobně. Vycházíme ze stejné rovnice jako v regionálním modelu, ale koeficienty globálního modelu jsou určovány pomocí opakované nelineární metody nejmenších čtverců [36].

7. EGNOS

S cílem lepšího využití systému GPS byl vybudován systém Evropské podpůrné geostacionární navigační služby EGNOS, který je jedním z nově zaváděných prvků GNSS do civilního letectví, spadající do kategorie systémů označovaných jako SBAS. Jedná se o první celoevropský satelitní navigační systém, který je vyvíjen společně Evropskou kosmickou agenturou (ESA), Evropskou komisí (EC) a Evropskou organizací pro bezpečnost leteckého provozu (EUROCONTROL). Letecký předpis ICAO Annex 10/I jej definuje jako: „rozšířený systém s rozsáhlým pokrytím, ve kterém uživatel přijímá informace z družicového vysílače“ [27].

EGNOS poskytuje korekce k signálu GPS. Tyto korekce jsou poskytovány pro území Evropy a jsou důležité pro eliminaci chyb, jimiž jsou přijímané signály GPS nevyhnutelně zatíženy [44]. Těmito korekcemi dochází ke zpřesnění určení polohy, a také k zajištění informace o spolehlivosti GPS signálu (integrity dat). Data integrity jsou vhodná zejména pro aplikace vedení letu za přísných bezpečnostních omezení v kritických fázích navigace, jako je přistávání letadla. EGNOS poskytuje korekce na ionosférickou chybu, efemeridickou chybu a chybu hodin satelitů.

Mezi další existující systémy SBAS dnes patří americký systém WAAS, japonský systém MSAS a budované systémy, indický GAGAN a ruský SDCM. Výhradně systém WAAS dnes dosahuje úrovně výkonnosti požadované pro provoz systému EGNOS.



Obrázek 18: Rozšiřující SBAS systémy [45]

7.1. Architektura EGNOS

Pozemní část systému EGNOS zahrnuje síť monitorovacích stanic RIMS (Ranging and Integrity Monitoring Station), které jsou rozmístěny po celé Evropě a nepřetržitě monitorují data vysílaná satelity GPS. Výsledek monitorování je průběžně předáván zabezpečenou datovou sítí do jednoho ze čtyř řídicích center MCC (Master Control Center). Zde se data upravují a vyhodnocují se informace o stavu družic GPS a informace o chybách měření. Data jsou pak předána třem vysílacím stanicím NLES (Navigation Land Earth Station). Vysílací stanice jsou z bezpečnostních důvodů zdvojeny, takže funkčnost může být garantována téměř za všech podmínek. Dále ještě pozemní část zahrnuje síť EWAN (EGNOS Wide Area Network), která umožňuje komunikaci celé pozemní části systému. Další dvě zařízení, která slouží k podpoře systémových operací a poskytují služby, jsou PACF (Performance Assessment and Checkout Facility) a ASQF (Application Specific Qualification Facility) [43].

Obrázek 19: Umístění RIMS [45]

Hlavním úkolem systému EGNOS je zvýšení přesnosti, integrity a kontinuity signálu GPS. K tomu přispívají korekční data, která jsou získávána pozemními stanicemi a pomocí družic jsou vysílána k uživatelům. Hlavními přínosy EGNOS jsou data pro přesnější určení polohy a včasné varování pro případ poruchy některé družice GPS [44].

7.1.1. Geostacionární EGNOS družice

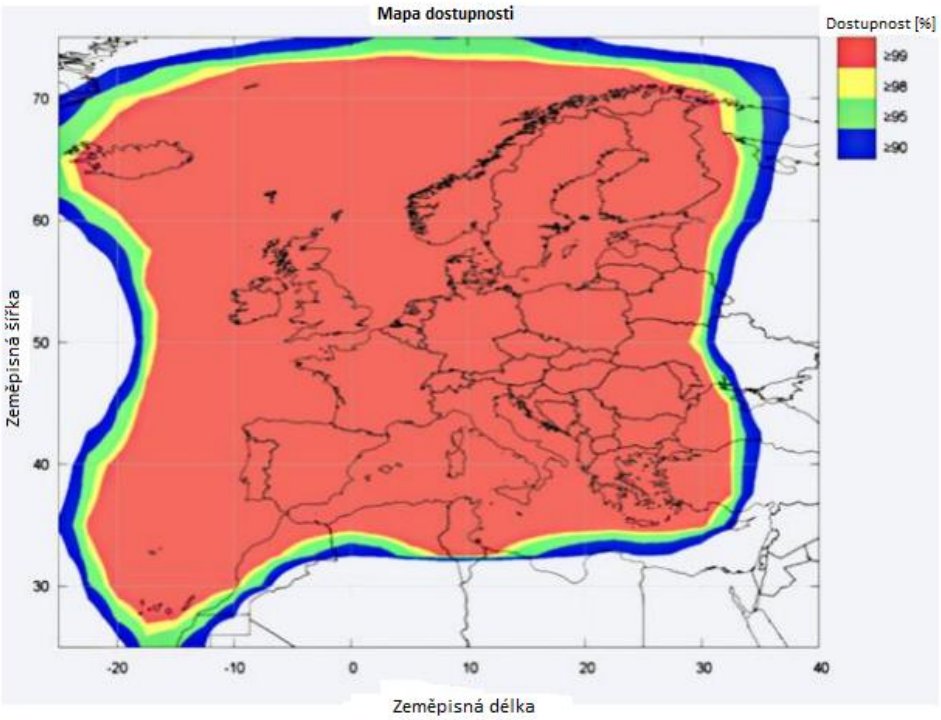
Každá vysílací stanice NLES předává data satelitu na geostacionární oběžnou dráhu, tedy nad rovník. Jedná se o tři satelity. První dva jsou satelity komunikačního systému INMARSAT (International Maritime Satellite Organization), jeden nad Atlantikem a druhý nad Indickým oceánem. Třetím satelitem je ESA Artemis, který je umístěn nad Afrikou mezi oba Inmarsaty. Tyto satelity vysílají opravy a informace o integritě pro GPS satelity na frekvenčním pásmu L1 (1575,42 MHz) zpět k Zemi, kde přijímač tato data načítá a koriguje podle nich údaje přijaté ze satelitů GPS [44]. Umožňují stanovit polohu uživatele do vzdálenosti 1,5 metru.

Systém je navržen tak, aby v jakémkoli čase alespoň dva ze tří satelitů vysílaly provozní signál, přičemž nezbytný je pouze jeden. Tak je docíleno možnosti přepínání signálu, například v případě přerušení jednoho z nich.

Všechny satelity a jejich přesné orbitální pozice jsou uvedeny v tabulce.

Tabulka 2: Geostacionární EGNOS družice [45]

Název satelitu	**Lokace**	**Azimut**
Inmarsat - IOR-W	Východní Afrika, Indický oceán	25 °E
Artemis – ESA	Střední Afrika	21.5 °E
Inmarsat - AOR-E	Atlantský oceán	15.5 °W



Obrázek 20: Pokrytí EGNOS [45]

7.2. EGNOS signál a navigační zpráva

Systém EGNOS přenáší zprávy v pásmu L1 se středovou frekvencí 1 575,42 MHz. Výsledný signál, je kombinací navigační zprávy a měřícího kódu o délce 1 023 bitů. EGNOS signál má takové vlastnosti, že pro uživatelské zařízení, které není zastíněno jiným objektem a vidí satelit pod úhlem 5 stupňů a vyšším, platí, že signál musí mít při přijímání sílu v rozmezí 161-153 dBW, aby ho antény mohly přijmout. Frekvenční šíře signálu EGNOS na nosné frekvenci 1 575,42 MHz je 2,2 MHz [43].

Navigační zpráva satelitů EGNOS se skládá z 500 bitů – dvakrát 250 bitů. Přenos jednoho typu zprávy trvá 1 vteřinu. Ve zprávách jsou obsaženy informace o orbitách satelitů daných systémů včetně korekcí odchylek od jejich ideálních poloh, opravy ionosférických chyb a v neposlední řadě navigační data obsahující informace o poloze a času samotných EGNOS družic [45].

Všechny navigační zprávy se skládají z preambule (8 bitů), typového identifikátoru - Message Type MT (6 bitů), samotného datového pole (212 bitů) a z paritní části (24 bitů) [44].

Systémem je možno přenést několik typů zpráv, které se rozlišují šestibitovým typovým identifikátorem, který následuje za preambulí. Těchto 6 bitů umožňuje 64 kombinací (hodnoty 0-63), ale dosud bylo definováno pouze 20 zpráv. Standardizované typy zpráv jsou uvedeny v tabulce [43].

Tabulka 3: Typy EGNOS zpráv [45]

Typ zprávy	**Obsah zprávy**
0	Nepoužívat (SBAS testovací mód)
1	Maska PRN
2-5	Rychlé korekce
6	Informace o integritě
7	Degradační faktor rychlých oprav
9	GEO navigační zprávy
10	Degradační parametry
12	Síťový čas SBAS/kompenzace UTC parametrů
17	EGNOS almanach
18	**Rastr ionosférických bodů (Grid Point Masks)**
24	Smíšené rychlé korekce, dlouhodobé opravy satelitních chyb
25	Dlouhodobé opravy satelitních chyb
26	**Korekce ionosférického zpoždění**
27	SBAS zpráva
28	Kovarianční matice efemerid
62	Interní testová zpráva
63	Nulová zpráva

8. Ionosférické korekce EGNOS

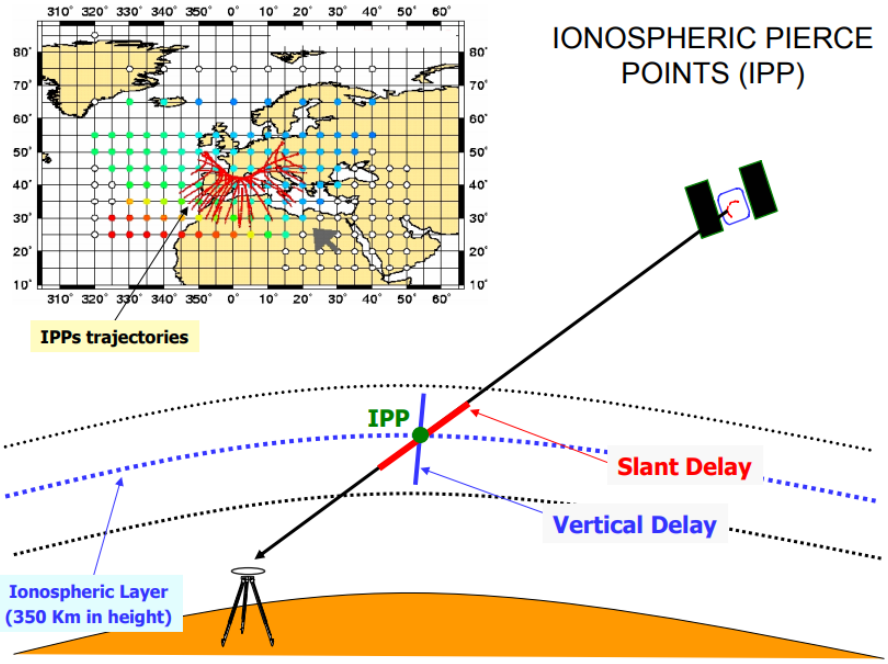
Co se týče systému EGNOS v Evropě, závislost ionosférických korekcí poskytovaných systémem byla obzvláště významná od počátku zvýšení sluneční aktivity související se slunečním cyklem. Tyto události ovlivňují nejen EGNOS, ale i další SBAS systémy za podmínek geomagnetické bouře. Důvodem je to, že SBAS systémy odhadují ionosférické zpoždění za předpokladu dvourozměrného chování ionosféry (bez výšky), která platí v nominální situaci, ale není přesná v případě vysoké geomagnetické aktivity nebo ionosférických bouří, když se ionosféra chová jako trojrozměrná soustava, jejíž vlastnosti se mění s výškou [45].

8.1. GIM (IONEX) model

Globální ionosférické mapy (GIM) jsou celosvětové mapy obsahující hodnoty ionosféry. Tyto hodnoty jsou odhadovány přímým měřením. Standardní formát dat používaný pro vysílání ionosférických map je známý jako IONosphere map EXchange format (IONEX), proto se modelu GIM občas přezdívá IONEX [48].

V případě EGNOS systému pracují přijímače s ionosférickými korekcemi, které jsou vypočteny z měření ionosférického zpoždění v reálném čase. EGNOS systém získává tato měření ze sítě monitorovacích stanic a používá je k odhadu vertikálního zpoždění [45]. Využívají k tomu mřížku tzv. rastr ionosférických bodů neboli Grid Point Mask, která se nachází v nadmořské výšce 350 km. Pro každý z ionosférických bodů vyskytujících se na mřížce (známých jako IGP – Ionospheric Grid Point), jsou v místě protnutí mřížky vysílány ionosférické korekce pro signál L1. Ionosférické zpoždění závisí na frekvenci vysílaného signálu.

K výpočtu ionosférické korekce potřebujeme znát polohu bodu průniku ionosféry IPP. Poloha IPP je definována jako průsečík úsečky mezi přijímačem a satelitem s ionosférickou vrstvou nacházející se v konstantní výšce 350 km jako mřížka. Tato poloha je definována zeměpisnou šířkou ΦPP a zeměpisnou délkou λPP [48].



Obrázek 21: Princip bodů průniku ionosférou IPP [47]

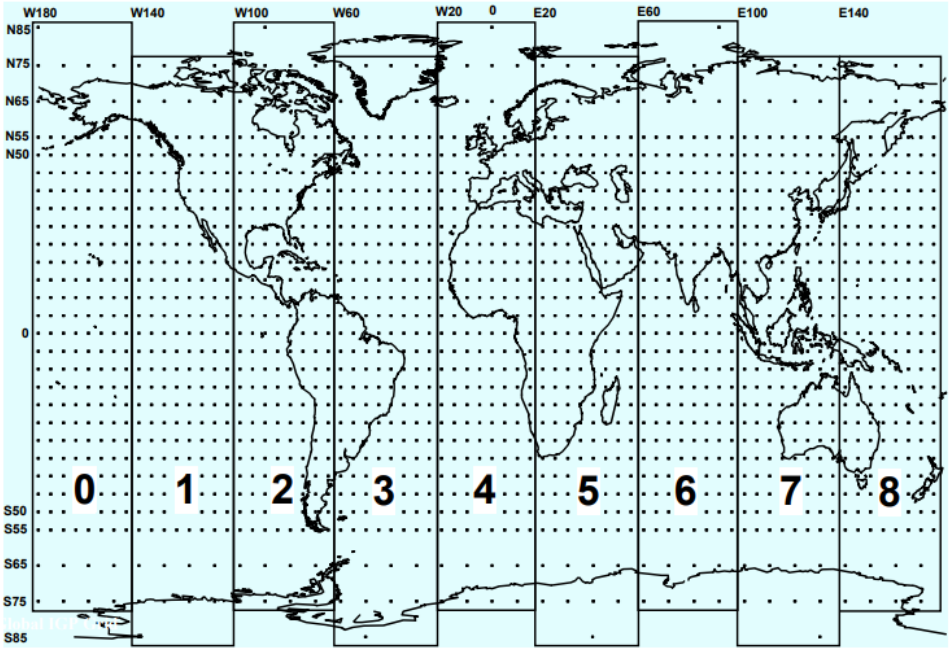
Korekce pro stav ionosféry mezi satelitem a IGP se označuje jako GIVD (Grid Ionospheric Vertical Delay) a je rozdílná od stavu ionosféry mezi satelitem a uživatelem. Korekce pro ionosféru mezi uživatelem a satelitem se označuje jako UIVD (User Ionospheric Vertical Delay). Výsledná korekce pro daný IPP se stanovuje interpolací jednotlivých IGP. Přijímač zná postavení těchto konkrétních bodů (IGP) s odhadovaným zpožděním pro každý z nich, a je tedy schopen odhadnout ionosférické zpoždění pro každý IPP. Je nutné, aby přijímač provedl interpolaci mezi hodnotami předpokladu pro IGP v blízkosti každého IPP. Buď pomocí čtyř bodů IGP, které se nachází kolem IPP nebo pomocí tří bodů. Přijímač také musí zohledňovat inklinační faktor (úhel, pod kterým prochází signál ionosférou) [45].

8.1.1. Rastr ionosférických bodů (Grid Point Mask)

IGP body, které tvoří interpolační mřížku, jsou předdefinované a rozdělené do 11 pásů číslovaných od 0 do 10 – Mercartorova projekce. Celkem se v mřížce nachází 2192 IGP bodů. Umístění bodů je více husté v nižších zeměpisných šířkách, protože vzdálenost mezi poledníky je delší. Zároveň dochází k větším odchylkám ionosférického vertikálního zpoždění signálu z důvodu sluneční aktivity [43].

Pásy 0-8 jsou svislé, skupiny 9 a 10 jsou definovány vodorovně kolem pólů. V pásech 0-8 se nachází 1808 bodů IGP. V rámci každého svislého pásma jsou IGP číslovány od 1 do 201 z

jihu na sever. Pro pásy 9 a 10 připadá 384 IGP. Mřížka má 5° rozteč u rovníku, 10° kolem N55° a S55° a nakonec 90° na N85° a S85° kolem pólů [43].

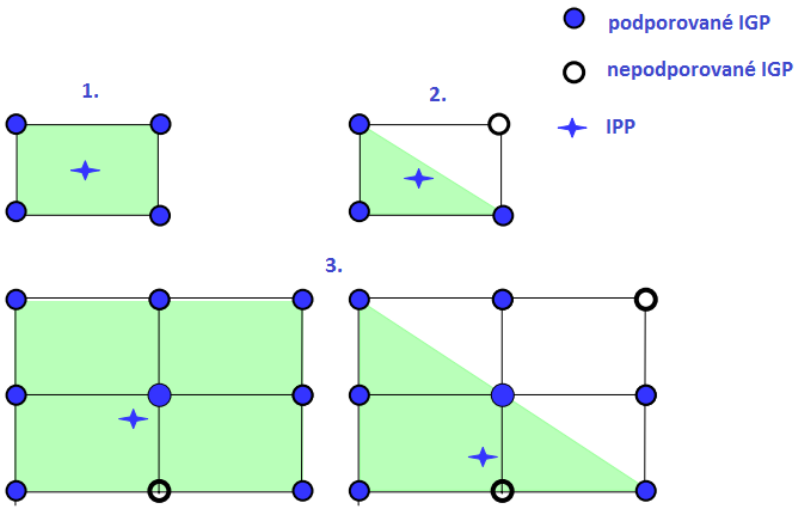


Obrázek 22: Rastr ionosférických bodů (IGP)[47]

8.1.2. Interpolace

Po zjištění polohy IPP vybereme body IGP, které lze použít k interpolaci. Pravidla výběru IGP jsou zobrazena na obrázku a jsou následující:

1. Nejdříve se snažíme najít čtyři okolní body IGP. Pokud takové najdeme, interpolace se provede v rámci čtverce.
2. Může se stát, že nějaký IGP nebude monitorován. V takové situaci se interpolace provede v rámci trojúhelníku, který obsahuje IPP.
3. Pokud nelze použít ani jedna ze zmiňovaných metod, interpolační oblast se rozšíří z 5° na 10°, tím ale ztrácí korekce přesnost.
4. Od 75 ° do 85 ° se interpolace uskutečňuje pomocí virtuálních IGP.
5. Není možná žádná korekce, pokud IPP není obklopeno žádným IGP [47]

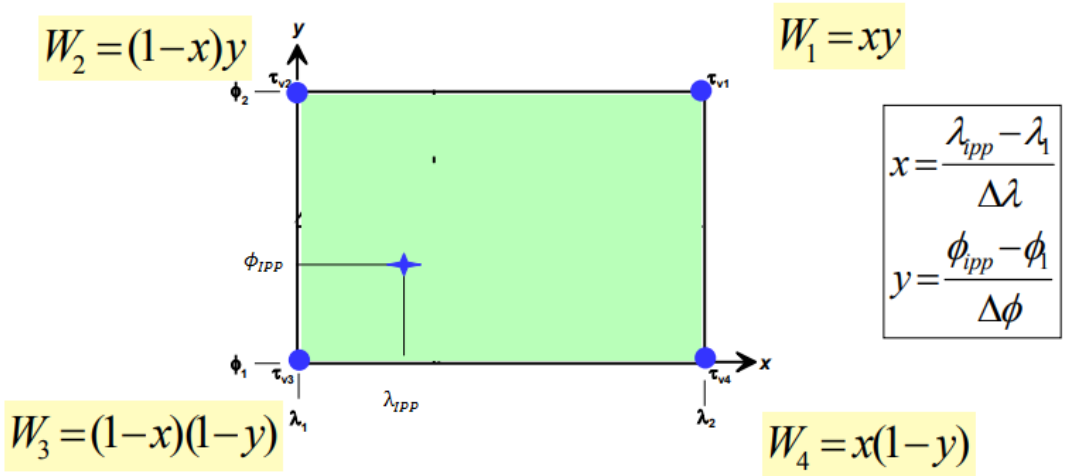


Obrázek 23: Pravidla výběru IGP [47]

8.1.2.1. Interpolace v rámci čtverce

Nalezneme čtyři IGP body, které obklopují bod IPP. Pomocí známých vertikálních ionosférických korekcí čtyř sousedících IGP, jsme schopni na základě interpolace v rámci čtverce spočítat ionosférickou korekci i pro IPP. Hodnotu τ_{vi} pro jednotlivé IGP získáme z navigační zprávy typu 26 (viz. níže).

1. Spočteme váhu (Weights) W_i pro každý IGP, která je součinem jednotkové vzdálenosti ve směru každé osy mezi IPP a IGP [48].



Obrázek 24: Princip interpolace v rámci čtverce [47]

2. Vypočítáme vertikální ionosférickou chybu, což je suma hodnot τ_{vi} každého IGP vynásobených jejich váhou [48].

$$\tau_{vpp}(\lambda_{PP}, \phi_{PP}) = \sum_{i=1}^{4} W_i(x_{pp}, y_{pp})\tau_{vi} \tag{7.1}$$

3. Abychom získali ionosférickou korekci IC, musíme vertikální chybu daného IPP vynásobit tzv. inklinačním faktorem F_{pp} vypočítaným z nadmořské výšky odpovídajícího satelitu.

$$IC = -\tau_{spp}(\lambda_{PP}, \phi_{PP}) = -F_{pp} \cdot \tau_{vpp}(\lambda_{P\square}, \phi_{PP}) \tag{7.2}$$

F_{pp} definujeme jako:

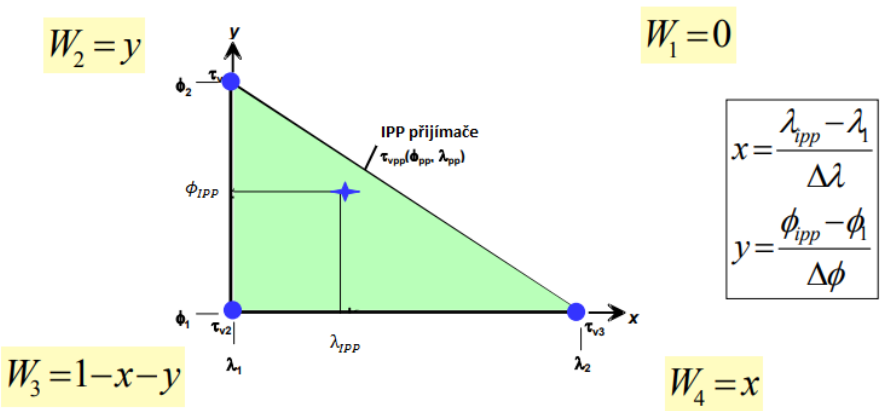
$$F_{pp} = \left[1 - \left(\frac{\mathrm{R_e} \cos \mathrm{E}}{\mathrm{R_e} + \mathrm{h_I}}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \tag{7.3}$$

kde, $\mathrm{R_e}$ je poloměr Země, $\mathrm{h_I}$ je nadmořská výška vrstvy a E je elevační úhel.

8.1.2.2. Interpolace v rámci trojúhelníku

Pokud dojde k situaci, kdy nějaký z IGP nebude monitorován, provedeme interpolaci v rámci trojúhelníku. Postupujeme podobně jako v předchozí interpolaci, až na to, že spočítáme ionosférickou korekci pro libovolný IPP pomocí známých vertikálních korekcí tří sousedících IGP. Hodnotu τ_{vi} pro jednotlivé IGP získáme z navigační zprávy typu 26 (viz. níže).

1. Spočteme váhu (Weights) W_i pro každý IGP, která je součinem jednotkové vzdálenosti ve směru každé osy mezi IPP a IGP [48].



Obrázek 25: Princip interpolace v rámci trojúhelníku [47]

2. Vypočítáme vertikální ionosférickou chybu, což je suma hodnot τ_{vi} každého IGP vynásobených jejich váhou [48].

$$\tau_{vpp}(\lambda_{PP}, \phi_{PP}) = \sum_{i=1}^{4} W_i(x_{pp}, y_{pp})\tau_{vi} \tag{7.4}$$

3. Abychom získali ionosférickou korekci IC, musíme vertikální chybu daného IPP vynásobit tzv. inklinačním faktorem F_{pp} vypočítaným z nadmořské výšky odpovídajícího satelitu.

$$IC = -\tau_{spp}(\lambda_{PP}, \phi_{PP}) = -F_{pp} \cdot \tau_{vpp}(\lambda_{PP}, \phi_{PP}) \tag{7.5}$$

F_{pp} definujeme jako:

$$F_{pp} = \left[1 - \left(\frac{\mathrm{R_e} \cos \mathrm{E}}{\mathrm{R_e} + \mathrm{h_I}}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}}. \tag{7.6}$$

kde, $\mathrm{R_e}$ je poloměr Země, $\mathrm{h_I}$ je nadmořská výška vrstvy a E je elevační úhel.

Na základě GIVD (korekce ionosférických zpoždění pro IGP) a σ_{GIVE}^2 (odhad přesnosti oprav pro IGP) údajů poskytnutých pro každou družici GPS v dohledu a uplatněním inklinačního faktoru, přijímač vypočítá opravu sklonu a standardní odchylku hodnoty residuální (zbytkové) ionosférické chyby σ_{UIRE}^2

$$\sigma_{UIRE}^2 = F_{pp}^2 \cdot \sigma_{UIVE}^2. \tag{7.7}$$

8.2. Ionosférické navigační zprávy

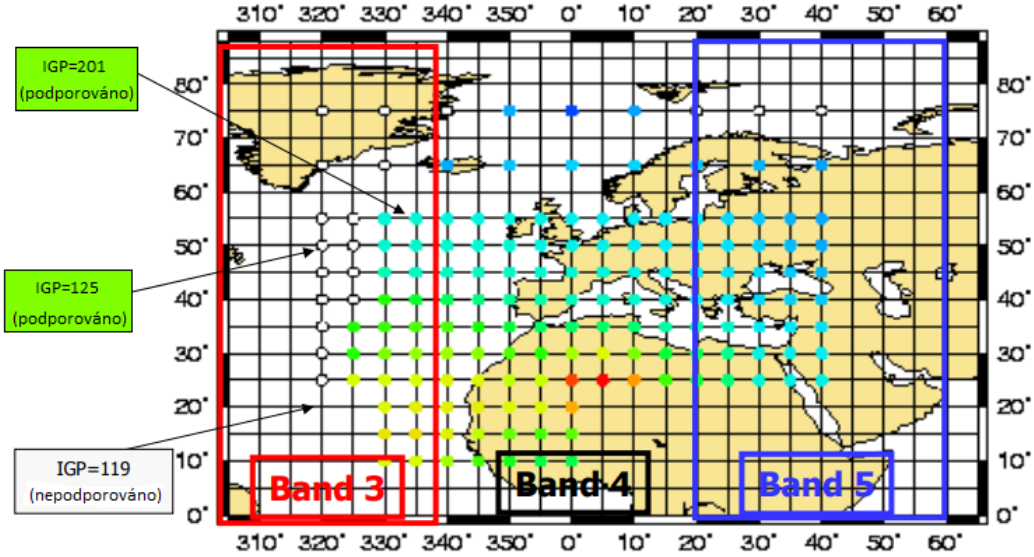
Korekce, a to i pro jednotlivé satelity, jsou rozděleny do několika jednotlivých zpráv. Navigační EGNOS zprávy, které se zabývají ionosférickou chybou, jsou zprávy typu 18 a 26.

8.2.1. Zpráva typu 18

Zprávy typu 18 obsahují informace o ionosférické mřížce. Každá zpráva přenáší data o pásmu v mřížce. Bit, který je nastavený na hodnotu 1 označuje, že pro tento IGP jsou poskytovány informace o ionosférické korekci. Do zprávy je také zahrnut IODI, díky čemuž jsou zprávy koordinovány s jiným typem zprávy. Rozsah IODI je 0-3 a mění se pokaždé, když je změněna IGP mřížka, což se stává jen vzácně [43].

Pásma, které SBAS nepoužívá (tj. pásmo 0 v EGNOS), nemusí být vysílány ve zprávě typu 18 s IGP body nastavenými na hodnotu 0. Pokud pásmo obsahuje méně než 201 IGP bodů, chybějící body jsou ve zprávě nastaveny na hodnotu 0.

Přijímač používá parametr „počet vysílaných pásem“, aby zjistil, zda existuje více pásem, které mají být získány, nebo zda dosud byly přijaty všechny dostupné údaje. Dříve než použijeme informace vysílané prostřednictvím zprávy typu 26, musíme získat všechny zprávy typu 18 [43].



Obrázek 26: Podporované IGP body v mřížce [47]

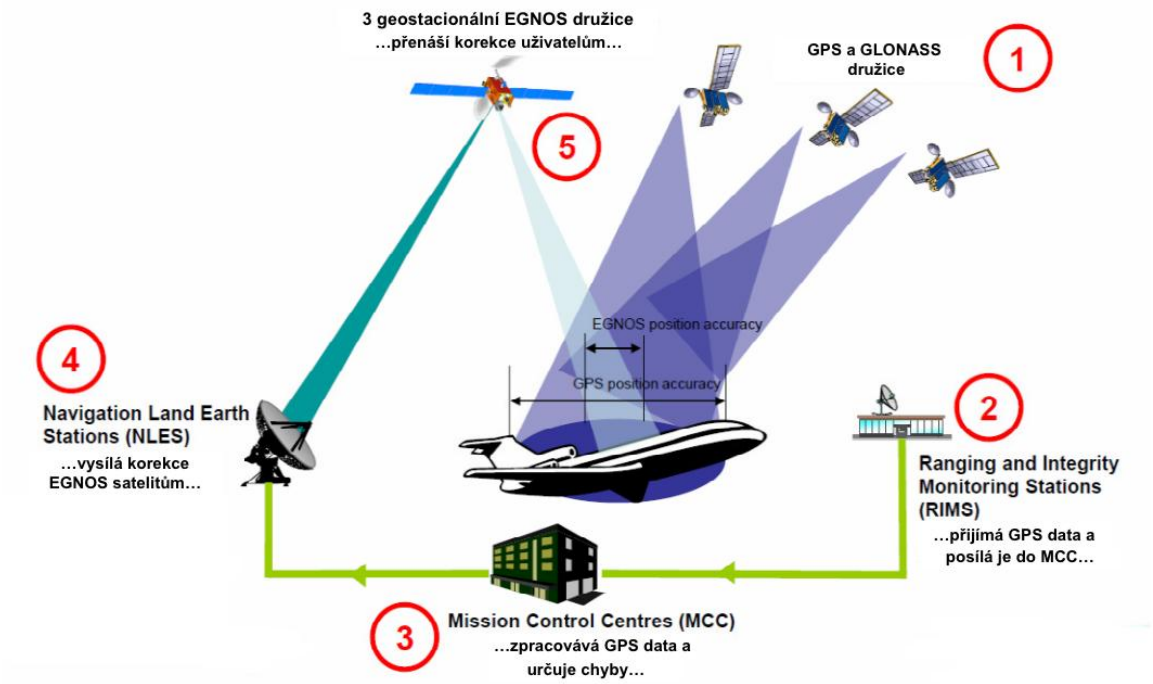
8.2.2. Zpráva typu 26

Zprávy typu 26 poskytují dva parametry. Korekce ionosférických zpoždění (GIVD) a odhad přesnosti oprav (σ^2_{GIVE}) pro IGP na základě GIVEI (GIVD Indicators), které jsou nakonfigurovány v mřížce. Aby se shodovaly ionosférické informace s příslušnou mřížkou IGP, je také zahrnut parametr IODI. Tabulka, kterou uživatel SBAS použije k překladu GIVEI do σ^2_{GIVE}, je také součástí této zprávy [43].

Jelikož lze poskytnout data pouze pro 15 IGP v jedné zprávě (každý ionosférický pás může obsahovat až 201 IGP), jsou příslušné IGP v mřížce seskupeny do bloků. Každý blok obsahuje 15 IGP. Blok 0 obsahuje opravy prvních 15 IGP aktivovaných v mřížce, blok 1 obsahuje korekci pro 16 až 30 aktivovaných IGP v mřížce a tak dále. Každá skupina je tedy rozdělena na maximálně 14 bloků (je možné rozdělení na méně bloků, jelikož SBAS není schopen sledovat celý pás) [43].

8.3. Princip přenosu korekce

Přenos vytvořených korekcí pomocí EGNOS družic až k příslušnému uživateli a způsob propojení samotných části systému EGNOS lze popsat v několika krocích. Na obrázku je demonstrována základní funkce systému.



Obrázek 27: Přenos dat v systému EGNOS [49]

8.3.1. Sběr dat

Stanice RIMS přijímají signály od různě viditelných satelitů GPS a GLONASS. Naměřená, nijak nezpracovaná data ze satelitů posílají do výpočetních center CPF (každé MCC má své CPF). RIMS mohou přijímat signál až na třech kanálech. RIMS kanál A provádí měření polohy pomocí GPS/EGNOS satelitů, jež jsou právě nad horizontem a tato data přeposílá rovnou do CPF pro výpočet korekcí a odhad prahové hodnoty spolehlivosti. RIMS kanál B provádí stejná měření nezávisle na kanálu A a data posílá do paralelní zpracovávací platformy CPF pro ověření vysílacích zpráv a zaručení integrity EGNOS. RIMS kanál C monitoruje a detekuje konkrétní poruchy satelitů GPS. Výstup je také předáván do výpočetní platformy. EGNOS se skládá ze 40 stanic RIMS. Každý satelit musí být monitorován minimálně třemi RIMS, aby systém mohl poskytovat korekční data a informace o integritě [43].

8.3.2. Výpočet

RIMS poté posílá data pomocí samostatné komunikační sítě do CPF neboli centrálního výpočtového zařízení, které je modulem MCC. Centrální výpočtové zařízení následně určuje přesnost GPS a GLONASS signálů přijatých v každé RIMS stanici a vypočítává ionosférickou chybu. CPF také vytváří ionosférický model pro oblast pokrytí a vytváří EGNOS zprávy. Funkce opravy ionosférických chyb vyžaduje hustou síť monitorovacích stanic, z toho důvodu není tato oprava dostupná pro celou oblast krytí geostacionárních satelitů a je dostupná pouze pro oblast pokrytí službou EGNOS. CPF také určuje efemeridické korekce a korekce atomových hodin na palubách satelitů GPS, jejichž signál je v daný moment přijímán stanicemi RIMS.

Kromě těchto parametrů, stanice CPF ještě odhaduje tzv. zbytkové chyby, které lze očekávat při aplikaci obdržené korekce do výpočtu. Tyto zbytkové odchylky jsou charakterizovány dvěma parametry.

a) User Differential Range Error (UDRE) představuje očekávanou zbytkovou chybu (horizontální i vertikální) určení polohy uživatelského zařízení po aplikaci korekce odchylek satelitních hodin a efemerid daného GPS satelitu [43].
b) Grid Ionospheric Vertical Error (GIVE) odhaduje očekávanou zbytkovou vertikální chybu určení polohy uživatelského zařízení po aplikaci ionosférických oprav v dané geografické lokalitě [43].

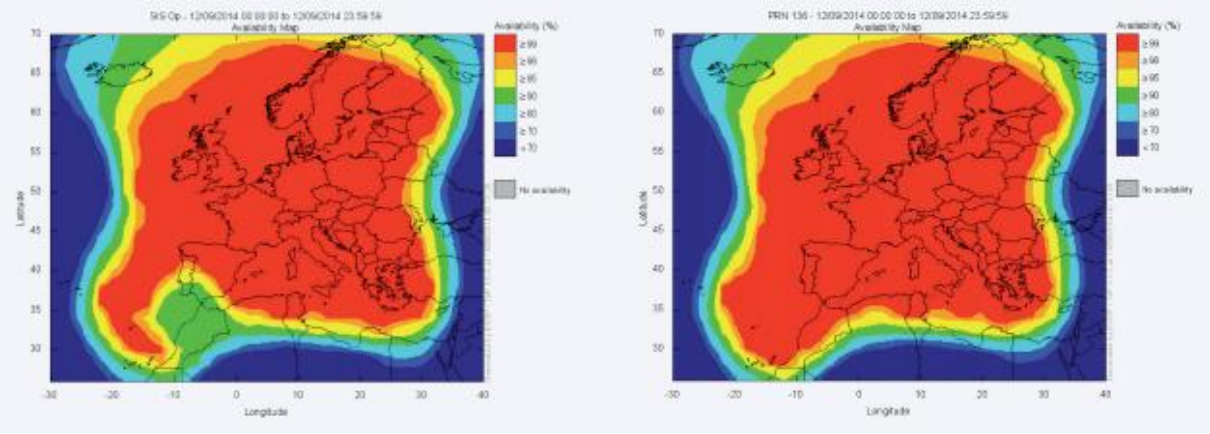
Tyto dva parametry mohou být využity ke stanovení souhrnu chyb určení polohy uživatele v horizontální i vertikální rovině.

8.3.3. Přenos dat k uživateli

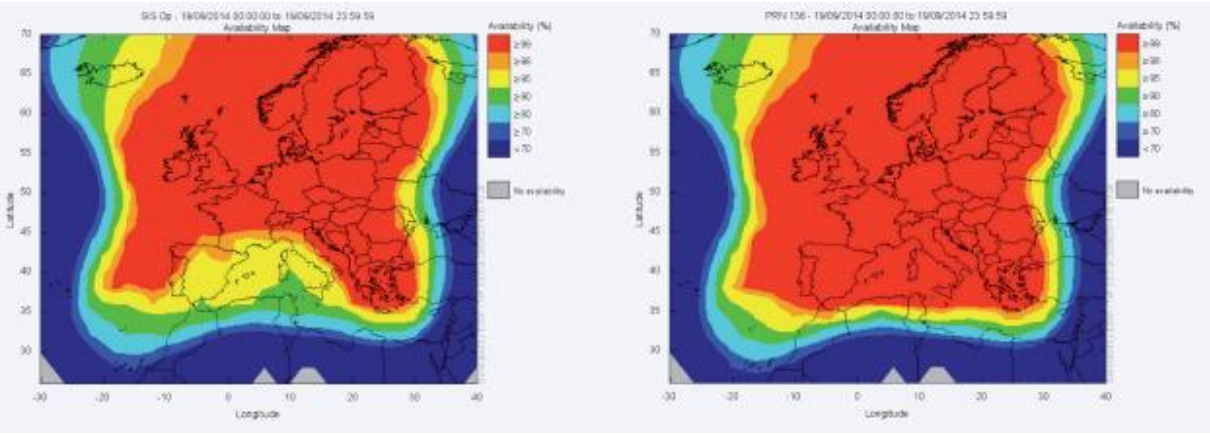
Všechny tyto informace o odchylkách (chybách) jsou zahrnuty do signálu, který je posílán pomocí zabezpečeného komunikačního kanálu do vysílacích stanic NLES. Vytvořené ionosférické korekce jsou následně vkládány do navigační zprávy (typ 26) satelitů EGNOS a prostřednictvím stanic NLES jsou data přeposílána uživatelům GPS a GLONASS s EGNOS přijímačem. Tím se dosahuje vyšší přesnosti určení polohy uživatelského zařízení. Každá stanice NLES je schopná automaticky určovat, které data z CPF jsou nejkvalitnější, a tato data jsou pak předávána k satelitům. Pro každý ze tří EGNOS satelitů jsou provozuschopné dvě NLES, jedna aktivní a jedna zajišťující redundanci [43].

8.4. Přínos dosažený systémem EGNOS

GSA, ESA a ESSP SAS více berou v úvahu účinky ionosféry ohledně zlepšení odolnosti systému EGNOS vůči ionosférickým poruchám a poskytování kvalitnějších služeb jeho uživatelům. V srpnu 2012 došlo díky zavedení EGNOS 2.3.1 ke zlepšení odhadu vlivu ionosféry. Dalším pokrokem bylo zavedení systému EGNOS 2.3.2 v říjnu 2013, což ještě zvýšilo odolnost systému proti tomuto vlivu. Nicméně i když ESR 2.3.2 poskytuje vysokou stabilitu při ionosférických událostech, dá se očekávat určitá degradace v období s velmi vysokou ionosférickou aktivitou nebo při geomagnetické bouři. Jak lze vidět na obrázcích, ESR 2.4.1M je ještě odolnější vůči těmto ionosférickým událostem [45].



Obrázek 28: EGNOS APV-I dostupnost (12. 9. 2014) při použití ESR 2.3.2 (vlevo) a ESR 2.4.1M (vpravo) [45]



Obrázek 29: EGNOS APV-I dostupnost (19. 9. 2014) při použití ESR 2.3.2 (vlevo) a ESR 2.4.1M (vpravo) [45]

8.5. Porovnání přesnosti GPS a EGNOS

Hlavním přínosem stále se rozšiřujícího systému EGNOS je zvyšování dosažitelné přesnosti určení polohy pomocí korekce chyb hodin satelitu, odchylek satelitu od ideální polohy na orbitě a vlivu ionosféry v reálném čase. V následující tabulce jsou znázorněny přesnosti, jakých je dosahováno při určování vzdálenosti. Sloupec GPS ukazuje, jakých chyb dosahuje samotný GPS a ve sloupci EGNOS jsou uvedeny hodnoty při užití obou systémů současně.

Tabulka 4: Porovnání přesnosti GPS a EGNOS [45]

Druhy chyb	**GPS**	**EGNOS**
GPS SCREW	4,0	2,3
Vliv troposféry	2,0 – 5,0	0,5
Vliv ionosféry	0,1	0,1
Vliv přijímače	0,5	0,5
Vícecestný příjem signálu	0,2	0,2
GPS elevace 5°	7,4 – 15,6	4,2
GPS elevace 90°	4,5 – 6,4	2,4

9. Závěr

Hlavní náplní bakalářské práce je zpracování přehledu současných ionosférických modelů GNSS, přiblížení modelu rozšiřujícího systému EGNOS a seznámení se způsoby určení ionosférické korekce pomocí těchto modelů. V první části práce seznamuji čtenáře s hlavním zdrojem chyb – ionosférou, která má za následek snížení přesnosti určení polohy uživatele. Obsahem této části je stručný popis charakteristiky ionosféry a přiblížení způsobu, jakým ovlivňuje a omezuje šíření GNSS signálů. Je zde také popsána spojitost mezi ionosférou a magnetickými i slunečními vlivy.

V další části práce se věnuji samotné ionosférické refrakci a způsobům, jak lze tuto chybu eliminovat pomocí ionosférických korekcí. Zmiňuji zde konkrétní metody a modely GNSS, pomocí kterých se tyto korekce počítají. Modely se rozdělují do dvou základních skupin, a to na jednofrekvenční a dvoufrekvenční. U dvoufrekvenčních modelů udávám detailní postup k vypočtení ionosférické korekce pomocí fázového a kódového měření. Také zde zmiňuji MIDAS, což je systém, který nám pomocí 4D mapy elektronové koncentrace umožňuje korekce fázových odchylek. U jednofrekvenčních modelů zmiňuji nejzákladnější typy, mezi které patří Klobucharův model, který slouží k eliminaci ionosférické chyby u GPS přijímačů, dále BeDiou model, který funguje na stejném principu jako Klobucharův model, ale je určen pro systém BeDiou. Další z modelů je IRI, který vytváří standardní referenční model ionosféry za účelem poskytnutí vertikálního profilu elektronové hustoty a NeQUick, který je schopný zjistit koncentraci elektronů v libovolném místě v prostoru a čase. Posledním modelem je klimatologický model NTCM, který poskytuje hodnoty průměrného chování ionosféry za klidných geomagnetických podmínek.

V poslední části se věnuji navigačnímu systému EGNOS, který poskytuje korekce k signálu GPS. Tyto korekce jsou poskytovány pouze pro území Evropy. Stručně zde popisuji řídící a kosmický segment systému a složky navigační EGNOS zprávy, pomocí které spolu tyto dva segmenty komunikují. Dále se zabývám samotnými ionosférickými korekcemi systému EGNOS a způsobem eliminace těchto korekcí. EGNOS používá k odstranění ionosférické chyby GIM model, který vytváří celosvětové mapy obsahující mřížku s hodnotami ionosféry, podle kterých se určuje ionosférická korekce. Pro každý z ionosférických bodů (IGP) vyskytujících se na mřížce jsou vysílány tyto korekce. Pro body (IPP), které se nevyskytují přímo na mřížce, ale leží uprostřed ní, se korekce stanovuje interpolací jednotlivých IGP. Buď interpolací v rámci čtverce, nebo interpolací v rámci trojúhelníku. Záleží na tom, kolik bodů IGP je monitorováno. Postup výpočtu pomocí interpolace jsem v práci detailně popsala.

Kromě určení samotných EGNOS korekcí se v práci také zabývám navigačními EGNOS zprávami, které tyto korekce přenáší přímo do satelitů. Seznamuji zde čtenáře s principem přenosu korekce a způsobem propojení samotných části systému EGNOS. V posední kapitole píši o hlavním přínosu systému EGNOS, jímž je přesnost. V tabulce porovnávám přesnosti, jakých je dosahováno při určování vzdálenosti při použití pouze samotného GPS a při použití obou systémů současně.

Globální navigační systémy mají značný potenciál pro následující roky. Již nyní předčí svou přesností konvenční systémy a je pravděpodobně pouze otázkou času, než budou konvenční systémy úplně vytlačeny globálními navigačními systémy. Satelitní navigace přináší nové možnosti i v tom, že bude možné snížit počet navigačních pozemních majáků, případně dalších druhů zařízení, která se využívají pro radionavigaci. Toto vše by vedlo k lepšímu využití vzdušného prostoru.

10. Literatura

[1] Vrstvy atmosféry. Ostravská univerzita: Přírodovědecká fakulta, Katedra fyziky [online]. Dostupné z: http://artemis.osu.cz/Gemet/meteo2/vrstvy.htm

[2] Atmosféra. Fyzikální pojmy. [online]. Dostupné z: http://geneze.info/pojmy/images/atmosfera.jpg

[3] Fyzika ionosféry. *Ústav fyziky atmosféry: Oddělení aeronomie* [online]. 2012. Dostupné z: http://www.ufa.cas.cz/html/climaero/topics/cionosphere.html

[4] Ionosphere. *Space Weather Prediction Center: National Ooceanic and Atmospheric Administration* [online]. Dostupné z: http://www.swpc.noaa.gov/phenomena/ionosphere

[5] HAARP and earthquakes. Heaven awaits [online]. Dostupné z: https://heavenawaits.wordpress.com/haarp-and-earthquakes/

[6] The Earth's Ionosphere. Tracking Solar Flares [online]. Dostupné z: http://solar-center.stanford.edu/SID/activities/ionosphere.html

[7] Ionospheric Layers: D, E, F, F1, F2, Regions. Electronics notes [online]. [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/ionospheric/ionospheric-layers-regions-d-e-f1-f2.php

[8] Šíření rádiových signálů. *Český Radioklub* [online]. ©2006. [cit. 2017-07-02]. Dostupné z: http://www.crk.cz/SIRENIC

[9] Šíření elektromagnetického vlnění [online]. Dostupné z: http://elnika.sweb.cz/radia/el_vlny.html

[10] Vertical Incidence Soundings (Ionograms). *Space Weather Prediction Center: National Ooceanic and Atmospheric Administration* [online]. Dostupné z: https://www.ngdc.noaa.gov/stp/iono/ionogram.html

[11] DAVIDOVÁ - KRACÍKOVÁ, Jana. Ionosféra: matka polární záře i příčina selhání telefonů a GPS. *Český rozhlas* [online]. 7. června 2014. [cit. 2017-07-02]. Dostupné z:

http://www.rozhlas.cz/pardubice/doporucujeme/_zprava/ionosfera-matka-polarni-zare-i-pricina-selhani-telefonu-a-gps--1363319

[12] Earth's Magnetosphere. *Space Weather Prediction Center: National Ooceanic and Atmospheric Administration* [online]. [cit. 2017-07-05]. Dostupné z: http://www.swpc.noaa.gov/phenomena/earths-magnetosphere

[13] Magnetosféra. *Astronomia: astronomie pro každého* [online]. 15. Leden 2010. [cit. 2017-07-05]. Dostupné z: http://planety.astro.cz/zeme/1944-magnetosfera

[14] ŘEZÁČ, Karel. Sluneční vítr. *Aldebaran Buletin: Týdeník věnovaný aktualitám a novinkám z fyziky a astronomie* [online]. 28. červen 2004. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_26_sow.php

[15] Jak fouká sluneční vítr? *21. Století* [online]. 21. 9. 2005. [cit. 2017-07-08]. Dostupné z: http://21stoleti.cz/2005/09/21/jak-fouka-slunecni-vitr/

[16] Sluneční skvrna. Pozorování Slunce, informace a aktuality o Slunci, sluneční aktivitě a pozorování [online]. [cit. 2017-07-08]. Dostupné z: http://pozorovanislunce.eu/vykladovy-slovnicek/slunecni-skvrna.html

[17] BRANDOS, Otakar. Sluneční skvrny. Treking.cz [online]. 18. 11. 2004. [cit. 2017-07-08]. Dostupné z: http://www.treking.cz/astronomie/slunecni-skvrny.htm

[18] Sluneční skvrny. Sluneční soustava [online]. [cit. 2017-07-08]. Dostupné z: http://slunecni.soustava.sweb.cz/clanky/slunecni-skvrny/

[19] GORKOVÁ, Sylvie. Nynější sluneční aktivita je podobná té v 18. Století. *Česká astronomická společnost* [online]. 13. 02. 2015. [cit. 2017-07-08]. Dostupné z: http://www.astro.cz/clanky/slunecni-soustava/nynejsi-slunecni-aktivita-je-podobna-te-v-18-stoleti.html

[20] HEINZEL, Petr. Sluneční erupce. Pozorování Slunce, informace a aktuality o Slunci, sluneční aktivitě a pozorování [online]. 30. 12. 2013. [cit. 2017-07-08]. Dostupné z: http://pozorovanislunce.eu/odborne-clanky/slunecni-erupce.html

[21] POLEDNIKOVÁ, Jana. Zabijácké výtrysky hmoty ze slunce aneb ani takto svět v roce 2012 neskončí. *National Geographic Česko* [online]. 29. 03. 2012. [cit. 2017-07-08]. Dostupné z: http://www.national-geographic.cz/clanky/zabijacke-vytrysky-hmoty-ze-slunce-aneb-ani-takto-svet-v-roce-2012-neskonci.html

[22] Koronální výtrysk hmoty (CME). *Astronomia: astronomie pro každého* [online]. 15. Leden 2010. [cit. 2017-07-08]. Dostupné z: http://hvezdy.astro.cz/slunce/750-koronalni-vytrysk-hmoty-cme

[23] Geomagnetic kp and ap Indices. *National Centers for Enviromental Information: National Ooceanic and Atmospheric Administration* [online]. [cit. 2017-07-05]. Dostupné z: https://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/kp_ap.html

[24] GNSS - Global Navigation Satellite System. *Czech Space Portal: Informative pages of Coordination Council of the Minister of Transport for Space Activities* [online]. Dostupné z: http://www.czechspaceportal.cz/en/section-3/gnss-systems/

[25] What si GNSS? EGNOS [online]. Dostupné z: https://www.egnos-portal.eu/discover-egnos/about-egnos/what-gnss

[26] BITTNER, Jan. *Přesnost evropského GNSS pro civilní letectví.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 74 s. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Pavel Ptáček. [cit. 2017-08-13]

[27] ICAO. *Annex 10: Aeronautical Telecommunications. Volume I – Radio navigation Aids* [online]. ICAO, 2006. [cit. 2017-07-11]. Dostupné z: https://www.theairlinepilots.com/forumarchive/quickref/icao/annex10.1.pdf

[28] PTÁČEK, Pavel, Ing. *Výkonnost služby GNSS pro aplikace prostorové navigace civilního letectví v ČR.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 160 s. Disertační práce. Vedoucí práce prof. Ing. Dušan Kevický, CSc.

[29] Total Electron Content. *Space Weather Prediction Center: National Ooceanic and Atmospheric Administration* [online]. [cit. 2017-07-11]. Dostupné z: http://www.swpc.noaa.gov/phenomena/total-electron-content

[30] BOŠKA, J., J. LAŠTOVIČKA a D. KOUBA. *Monitorování ionosféry využitím dat GPS systémů*. Ústav fyziky atmosféry AVČR. [cit. 2017-07-11].

[31] TEC Europe. Space Weather Application Center – Ionosphere (SWACI) [online]. 23. 07. 2017. Dostupné z: http://swaciweb.dlr.de/data-and-products/public/tec/tec-eu/?L=1

[32] JAKOWSKI, N. a M.M. HOQUE. *Ionospheric Range Error Correction Models*. Institute of Communications and Navigation [online]. 27. 06. 2012. [cit. 2017-07-18]. Dostupné z: http://www.icl-gnss.org/2012/Jakowski12.pdf

[33] SANSO, F. a J. Gil ANTONIO. *Geodetic deformation monitoring: from geophysical to engineering roles*. International Association of Geodesy. New York, 2006.

[34] LÁSKA, Zdeněk, Ing. et al. *Globální navigační systémy a jejich využití v praxi.* Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií [online]. 9. září 2010. [cit. 2017-07-23]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_08_1009.pdf

[35] NAVIPEDIA CONTRIBUTORS. EUROPEAN SPACE AGENCY. Tropospheric Delay. *Navipedia* [online]. 13. leden 2013. [cit. 2017-07-23]. Dostupné z: http://www.navipedia.net/index.php/Tropospheric_Delay

[36] ELIZEI, Mohamad Mahdi Alizadeh. *Multi-Dimensional modeling of the ionospheric parameters, using space geodetic techniques.* Vienna University of Technology: Veröffentlichung des Departments für Geodäsie und Geoinformation [online]. Vienna, 2013, 183 p. ISSN 1811-8380. [cit. 2017-07-18]. Dostupné z: https://www.geo.tuwien.ac.at/fileadmin/editors/GM/GM93_alizadeh.pdf

[37] NAVIPEDIA CONTRIBUTORS. EUROPEAN SPACE AGENCY. Klobuchar Ionospheric Model. *Navipedia* [online]. 23. únor 2012. Dostupné z: http://navipedia.net/index.php/Klobuchar_Ionospheric_Model

[38] Estimating Ionospheric Delay Using GPS/Galileo Signals in the E5 Band. *Inside GNSS* [online]. Duben 2015. Dostupné z: http://www.insidegnss.com/node/4435

[39] International Reference Ionosphere [online]. Dostupné z: http://irimodel.org/

[40] Tomography of the ionosphere. *Space weather and the ionosphere* [online]. Dostupné z: http://www.bath.ac.uk/elec-eng/invert/asw.html

[41] Ne Quick model. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics [online]. 2012. Dostupné z: https://t-ict4d.ictp.it/nequick2

[42] NAVIPEDIA CONTRIBUTORS. EUROPEAN SPACE AGENCY. NeQuick Ionospheric Model. *Navipedia* [online]. 1. červen 2015. Dostupné z: http://www.navipedia.net/index.php/NeQuick_Ionospheric_Model

[43] NAVIPEDIA CONTRIBUTORS. EUROPEAN SPACE AGENCY. *Navipedia* [online]. [cit. 2017-07-30]. Dostupné z: http://navipedia.net/index.php?title=Main_Page&oldid=13417

[44] EGNOS - Evropská „podpůrná“ geostacionární navigační služba. *Český Kosmický portál* [online]. [cit. 2017-07-25]. Dostupné z: http://www.czechspaceportal.cz/3-sekce/gnss-systemy/egnos/

[45] EUROPEAN GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS AGENCY. EGNOS *Safety of Life (SoL): Service Definition Document* [online]. 2. 2. 2015, 64 p. [cit. 2017-07-23]. Dostupné z: https://www.egnos-portal.eu/sites/default/files/Brochure-SoL_web.pdf

[46] EUROPEAN GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS AGENCY. *EGNOS Open Service (OS): Service Definition Document* [online]. 2. 2. 2015, 44 p. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63824/F6-DP-2015-Krastenics-Petr-diplomova%20prace.pdf?sequence=-1

[47] HERMÁNDEZ – PAJARES, Manuel et al. *Egnos tutorial*. Universitat Politècnica de Catalunya: Research group of Astronomy and GEomatics (gAGE/UPC) [online]. 2002. [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: http://gage.upc.edu/sites/default/files/TEACHING_MATERIAL/SLIDES/EGNOS_tutorial_gAGE.pdf

[48] SEGURA, Deimos Ibáñez. *Implementation of GNSS ionospheric models in gLAB*. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC): Department of Applied Mathematics IV [online]. 2014. [cit. 2017-08-10]. Dostupné z: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24770/Implementation%20of%20GNSS%20ionospheric%20models%20in%20gLAB.pdf

[49] ŠVÁB, Ondřej, Ing. *Galileo a EGNOS pro dopravu*. Ministerstvo dopravy: Odbor kosmických technologií a družicových systémů [online]. Praha, 18. září 2012. Dostupné z: http://fsdays.cz/picture/upload/file/Evropsk%C3%A9%20dru%C5%BEicov%C3%A9%20navi ga%C4%8Dn%C3%AD%20syst%C3%A9my%20-%2020120918.pdf

[50] Gowsuddin S. a S. I. Dutt. *Ionospheric delay estimation using Klobuchar algorithm for single frequency GPS receivers.* International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE) [online]. Únor 2013. ISSN: 2278 – 909X. Dostupné z: http://ijarece.org/wp-content/uploads/2013/08/IJARECE-VOL-2-ISSUE-2-202-207.pdf

11. Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozdělení atmosféry [2]
Obrázek 2: Struktura atmosféry a ionosféry [5]
Obrázek 3: Závislost koncentrace elektronů na výšce [8]
Obrázek 4: Vrstvy ionosféry [9]
Obrázek 5: Odraz a průchod signálu ionosférou [8]
Obrázek 6: Ionogram měřený na stanici v Průhonicích [11]
Obrázek 7: Magnetosféra Země [13]
Obrázek 8: Složky rychlosti slunečního větru [14]
Obrázek 9: Motýlkový diagram [16]
Obrázek 10: Koronální výtrysk hmoty [21]
Obrázek 11: Závislost ionosférického zpoždění na TEC a frekvenci signálu [30]
Obrázek 12: TEC za klidných podmínek - jednohodinová předpověď [31]
Obrázek 13: Závislost troposférického zpoždění na výšce [35]
Obrázek 14: 4D MIDAS mapa [39]
Obrázek 15: Kosinová funkce popisující Klobucharův model [32]
Obrázek 16: Výpočet vertikálního zpoždění [38]
Obrázek 17: Pět oblastí definovaných v NeQuick modelu [48]
Obrázek 18: Rozšiřující SBAS systémy [45]
Obrázek 19: Umístění RIMS [45]
Obrázek 20: Pokrytí EGNOS [45]
Obrázek 21: Princip bodů průniku ionosférou IPP [47]
Obrázek 22: Rastr ionosférických bodů (IGP) [47]
Obrázek 23: Pravidla výběru IGP [47]
Obrázek 24: Princip interpolace v rámci čtverce [47]
Obrázek 25: Princip interpolace v rámci trojúhelníku [47]
Obrázek 26: Podporované IGP body v mřížce [47]
Obrázek 27: Přenos dat v systému EGNOS [49]
Obrázek 28: EGNOS APV-I dostupnost (12. 9. 2014) při použití ESR 2.3.2 (vlevo) a ESR 2.4.1M (vpravo) [45]
Obrázek 29: EGNOS APV-I dostupnost (19. 9. 2014) při použití ESR 2.3.2 (vlevo) a ESR 2.4.1M (vpravo) [45]

12. Seznam tabulek

Tabulka 1: Závislost ionosférického zpoždění na TEC a frekvenci signálu [30]

Tabulka 2: Geostacionární EGNOS družice [45]

Tabulka 3: Typy EGNOS zpráv [45]

Tabulka 4: Porovnání přesnosti GPS a EGNOS [45]