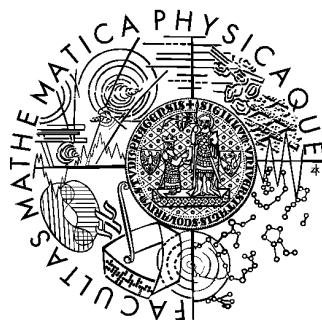


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE



Bc. David Píša

Palubní zpracování měření družice TARANIS

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí diplomové práce: Doc. RNDr. Ondřej Santolík, Dr.
Studijní program: Fyzika

2009

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu Doc. Ondřeji Santolíkovi, Dr. za velmi trpělivé a podnětné vedení mé diplomové práce a za cenné rady, které mi během jejího vypracování poskytoval. Dále děkuji Ing. Jaroslavu Chumovi, Ph.D., který mi poskytl potřebná data a cenné rady při simulacích detekčního algoritmu. V neposlední řadě děkuji všem členům skupiny kosmické fyziky za vytvoření výborného kolektivu a za pomoc při řešení problémů, jmenovitě Zuzce, Karlovi a všem Krůtám. Nakonec bych rád za všechno poděkoval svým rodičům a své přítelkyni, kteří mně byli vždy velkou oporou.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne

David Píša

Obsah

1	Úvod	6
2	Šíření vysokofrekvenčních elektromagnetických vln ionosférickým plazmatem	7
2.1	Vlny ve studeném plazmatu	7
2.2	Model ionosféry IRI 2007	9
2.3	Model geomagnetického pole IGRF10	10
2.4	Efekt šíření vln ionosférou	11
3	Bouřky a blesky	13
3.1	Vznik bouřky	13
3.2	Blesky	14
3.2.1	Výboj mezi mrakem za zemí (\pm CG - Cloud-to-Ground)	14
3.2.2	Výboj uvnitř mraků (IC - Intra-Cloud)	16
3.3	Geografická a sezonní variace blesků	16
3.4	Radio frekvenční emise od blesků	16
4	Jevy spojené s bouřkami	19
4.1	Sprites, Elves a Blue Jets	19
4.2	Trans-ionosférické párové pulzy	21
4.2.1	Modely	21
4.2.2	Pozorování TIPPů	22
5	Cíle práce	24
6	Družice TARANIS	25
6.1	Přístrojové vybavení	25
6.1.1	MEXIC (On-board Management)	26
6.1.2	IDEE (Energetic Electrons)	26
6.1.3	IME-BF (Low frequency Electric Field)	27
6.1.4	IME-HF (HF/VHF Electric Field)	27
6.1.5	IMM (Low frequency magnetic field)	27
6.1.6	MCP (Micro Cameras and Photometers)	27
6.1.7	XGRE (X-ray, Gamma-ray and Relativistic Electron Experiment)	28
6.2	Vlnový přístroj IME-HF	28

6.2.1	Blokové schéma	29
6.2.2	Výběrový algoritmus	31
7	Družice DEMETER	34
7.1	Přístrojové vybavení	35
7.2	Přístroj ICE na družice DEMETER	35
7.3	Úrovně zpracování dat	36
8	Studium HF stop z měření družice DEMETER	37
8.1	Použitá data z družice DEMETER	37
8.2	Zpracování dat	39
8.3	Výsledky	40
8.4	Případové studie	40
8.4.1	2005-08-02 19:50:52.951	40
8.4.2	2007-05-29 21:01:09.844	41
8.5	Diskuze	41
9	Simulace detekčního algoritmu pro IME-HF	52
9.1	Vstupní vlnová forma	52
9.2	Analogové filtry	52
9.3	Simulace detekčního algoritmu	53
9.4	Výsledky simulací	54
9.5	Diskuze	55
10	Závěr	61

Název práce: Palubní zpracování měření družice TARANIS
Autor: Bc. David Píša
Katedra (ústav): Katedra fyziky povrchů a plazmatu
Vedoucí diplomové práce: Doc. RNDr. Ondřej Santolík, Dr.
e-mail vedoucího: ondrej.santolik@mff.cuni.cz

Abstrakt: Úkolem diplomové práce bylo studium elektromagnetických jevů souvisejících s bouřkovou aktivitou (především trans-ionosférických párových pulzů). Podařilo se nám provést analýzu vysokofrekvenčních pulzů z měření družice DEMETER. Tato získaná data budou sloužit při návrhu měření připravovaného projektu TARANIS. Dále jsme provedli simulace detekčního algoritmu pro připravovaný vlnový přístroj IME-HF.

Klíčová slova: blesky, ionosféra, trans-ionosférické párové pulzy, družice TARANIS, vlnový přístroj IME-HF

Title: Onboard analysis of measurements of the Taranis spacecraft
Author: Bc. David Píša
Supervisor: Doc. RNDr. Ondřej Santolík, Dr.
Supervisor's e-mail address: ondrej.santolik@mff.cuni.cz

Abstract: The main task of this diploma thesis was to study electromagnetic waves connected with the lightning activity (transionospheric pulse pairs). We were successfull in analysis of high frequency pulses from DEMETER satellite. These results will be used to prepare the measurement of TARANIS satellite. We have also performed simulation of the detection algorithm for the IME-HF instrument.

Keywords: lightnings, ionosphere, transionospheric pulse pairs, TARANIS satellite

Kapitola 1

Úvod

Bouřky a s nimi související blesky jsou jedním z běžných jevů pozorovatelných v přírodě, avšak jejich fyzikální mechanismus je dosti složitý a není v dnešní době ještě zcela znám. Počátky vědeckého zkoumání těchto jevů se datují do poloviny 18. století a mezi průkopníky tohoto oboru můžeme jmenovat B. Franklina a P. Diviše s jejich bleskosvody. V dnešní době se blesky studují s pomocí použití široké kombinace měřících přístrojů a metod, počínaje pozemními anténami, přes speciální letadla a balóny, konče u vesmírných družic. Velký rozmach družicového pozorování blesků a jevů s nimi spojených nastal na počátku 90-tých let po objevu Spritů (kap. 4.1) a následném vyslání například družic ALEXIS (1993) a FORTE (1997), které studovaly vlnové projevy bouřek a objevily fenomén trans-ionosférických párových pulzů (kap. 4.2).

V předkládané práci se snažíme představit toto poměrně složité a ne zcela probádané odvětví vědy ukázkou již proběhlých a připravovaných měření. Spektrum jevů, ať už přímo nebo nepřímo spojených s bouřkami a blesky, je značně pestré, proto se v této práci omezíme na studium vysokofrekvenčních elektromagnetických emisí.

V následné části (kap. 6) představíme plánovaný francouzský projekt TARANIS (2013), který bude navazovat na úspěšné projekty ALEXIS a FORTE ve studiu rychlých vlnových jevů ve spojení s bouřkami.

Poté se budeme věnovat studiu vysokofrekvenčních pulzů zaznamenaných družicí DEMETER. Nejprve seznámíme čtenáře s projektem DEMETER a jeho přístroji (kap. 7). Následně provedeme zpracování vysokofrekvenčních pulzů pozorovaných v datech družice (kap. 8). Studium těchto pulzů bude dále pomáhat při návrhu měření na připravovaných projektech.

Nakonec uvedeme připravovaný vysokofrekvenční vlnový přístroj IME-HF, který bude umístěn na družici TARANIS. Tento přístroj je vyvíjen ve spolupráci s francouzskou stranou na Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd. Pro analogovou část tohoto přístroje popíšeme výsledky simulace palubního výběrového algoritmu (kap. 9).

Kapitola 2

Šíření vysokofrekvenčních elektromagnetických vln ionosférickým plazmatem

2.1 Vlny ve studeném plazmatu

V této kapitole stručně představíme teorii šíření elektromagnetických vln v plazmatu, širší popis této tematiky je k nalezení například v T. Stix [1992], D. G. Swanson [2002].

Uvažujeme rovinné elektromagnetické vlny 2.1, které se šíří lineárním homogenním prostředím. Tímto prostředím je plazma, které bereme v přiblížení jako studené. Ve studeném plazmatu zanedbáváme jeho tepelný pohyb a srážky mezi jednotlivými částicemi. Neuvažujeme proto ani tlak samotného plazmatu, který je malý v porovnání s tlakem magnetického pole.

Rovnice pro rovinnou elektromagnetickou vlnu

$$\epsilon(\vec{r}, t) = \Re\{\vec{E} \cdot \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)]\} \quad . \quad (2.1)$$

Rovinnou elektromagnetickou vlnu 2.1 lze zepsat do dvou složek

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= |E_1| \cos(\omega t - \delta_x) \\ \epsilon_y &= |E_2| \cos(\omega t - \delta_y) \quad . \end{aligned} \quad (2.2)$$

Vlna může mít lineární, kruhovou nebo eliptickou polarizaci. Polarizace závisí na amplitudách $|E_1|$ a $|E_2|$ a na fázovém rozdílu mezi oběma komponentami $\delta_x - \delta_y$. Možné případy polarizace:

- $\delta_x - \delta_y = \frac{\pi}{2}$ a zároveň $\frac{|E_1|}{|E_2|} = 1$ vlna je kruhově polarizovaná
- $\delta_x - \delta_y = 0, \pi$ vlna je lineárně polarizovaná
- v třetím, obecném případě, je vlna elipticky polarizovaná

Polarizace může být dále orientovaná levotočivě nebo pravotočivě, podle směru rotace vektoru elektrického pole.

Z Maxwellových rovnic pro uvažované prostředí lze odvodit vlnovou rovnici

$$\nabla \times \nabla \times \vec{\epsilon} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{\epsilon}}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = 0 \quad . \quad (2.3)$$

Důležitými parametry prostředí, kterým se vlna šíří jsou plazmová frekvence a cyklotronová frekvence, které charakterizují lokální vlastnosti tohoto prostředí. Plazmová frekvence pro j -tý druh částí je dána rovnicí

$$\omega_{pj} = \sqrt{\frac{n_j q_j^2}{\epsilon_0 m_j}} \quad , \quad (2.4)$$

kde n_j je koncentrace j -tého druhu částic, q_j je náboj j -tého druhu částic, ϵ_0 je permitivita vakua a m_j je hmotnost j -tého druhu částic.

Cyklotronová frekvence je dána vztahem

$$\omega_{cj} = \frac{B_0 q_j}{m_j} \quad , \quad (2.5)$$

B_0 je vnější magnetické pole, q_j náboj a m_j hmotnost j -tého druhu částic. Cyklotronová frekvence může nabývat kladných i záporných hodnot, a to v závislosti na znaménku náboje j -tého druhu částic.

Pro řešení vlnové rovnice 2.3 ve studeném plazmatu a s použitím zavedené konvence Stixových parametrů [T. Stix, 1992] daných rovnicemi

$$\begin{aligned} R &= 1 - \sum_j \frac{\omega_{pj}^2}{\omega(\omega + \omega_{cj})} \\ L &= 1 - \sum_j \frac{\omega_{pj}^2}{\omega(\omega - \omega_{cj})} \\ P &= 1 - \sum_j \frac{\omega_{pj}^2}{\omega} \\ S &= \frac{1}{2}(R + L) \\ D &= \frac{1}{2}(R - L) \quad , \end{aligned} \quad (2.6)$$

dostaneme soustavu rovnic

$$\begin{pmatrix} S - n^2 \cos^2 \theta & iD & n^2 \sin \theta \cos \theta \\ -iD & S - n^2 & 0 \\ n^2 \sin \theta \cos \theta & 0 & P - n^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = 0 \quad . \quad (2.7)$$

Řešení této soustavy rovnic vede na bikvadratickou rovnici pro index lomu,

$$An^4 + Bn^2 + C = 0 \quad , \quad (2.8)$$

jejíž jednotlivé koeficienty jsou popsány vztahy

$$\begin{aligned} A &= S \sin^2 \theta + P \cos^2 \theta \\ B &= -RL \sin^2 \theta - PS(1 + \cos^2 \theta) \\ C &= PRL \quad . \end{aligned} \quad (2.9)$$

Z těchto rovnic vyplývá, že pro danou frekvenci vlny, odklon vlnového vektoru od vnějšího magnetického pole a parametrů plazmatu, existují nejvýše dvě řešení (tzn. dva vlnové módy).

Jako příklad, který později využijeme, si ukážeme tzv. spodní ořezání levotočivých vln ($n^2 = L = 0$). To znamená, že budeme hledat takové řešení vlnové rovnice, pro které se index lomu rovná nule, tzn. vlna se v tomto prostředí přestává šířit. Ze vztahu $n^2 = L = 0$ dosazení z rovnice 2.6 dostaneme vztah

$$1 - \sum_j \frac{\omega_{pj}^2}{\omega(\omega - \omega_{cj})} = 0 \quad . \quad (2.10)$$

Po zanedbání příspěvku iontů, což je možné za předpokladu $\omega_{pe} \gg \omega_{pi}$ a $\omega \gg \omega_{ci}$, dostaneme kvadratickou rovnici

$$\omega^2 - \omega_{ce}\omega - \omega_{pe}^2 = 0 \quad . \quad (2.11)$$

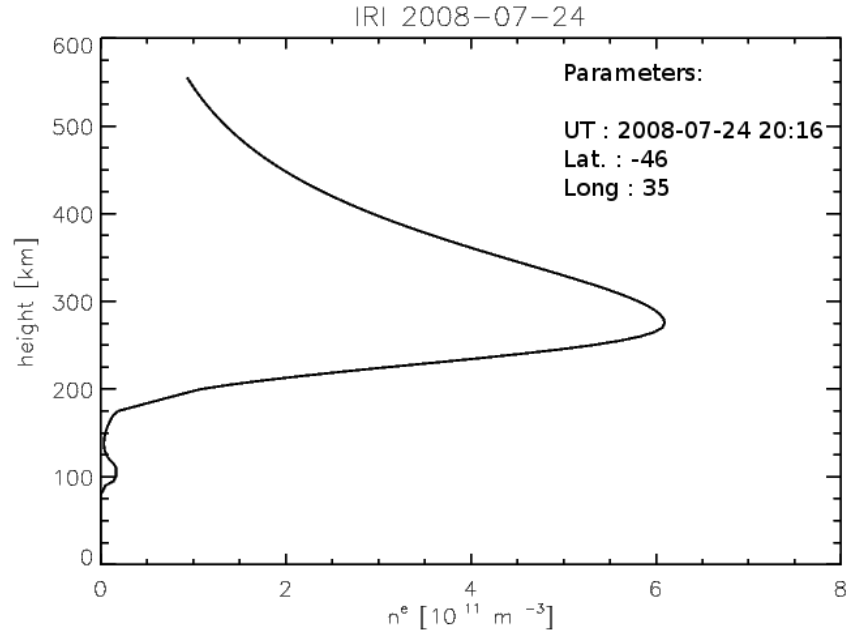
Vyloučením nefyzikálního záporného řešení obdržíme hodnotu frekvence, pro niž se vlna v daném módu přestává šířit

$$\omega = \frac{-\omega_{ce} + \sqrt{\omega_{ce}^2 + 4\omega_{pe}^2}}{2} \quad . \quad (2.12)$$

Klíčovými parametry pro stanovení této frekvence ořezání jsou lokální parametry prostředí. Těmito parametry jsou plazmová frekvence a cyklotronová frekvence (rovnice 2.4 resp. 2.5). Tyto hodnoty jsou pro experimentální účely získávané z modelů popsaných níže.

2.2 Model ionosféry IRI 2007

Mezinárodní referenční model ionosféry IRI 2007 [D. Bilitza, 2007] je společným projektem URSI (International Union of Radio Science) a COSPAR (Committee On SPACe Research). Jedná se o standard pro klimatologickou specifikaci ionosférických parametrů. V současné době se jedná o zaregistrování modelu jako technické specifikace pro ISO (International Standardization Organization). IRI je vytvořen jako empirický model založený na velkém počtu dat naměřených na Zemi i z vesmíru. Popisuje měsíční průměr ionosférických hustot a teplot ve výškách 50 – 1500 km v mimoaurorálních oblastech ionosféry. Od svého vzniku v roce 1969 je model postupně vylepšován o nová data a o přesnější matematické popisy globálních a časových variací jednotlivých parametrů. Velké množství nezávislých studií potvrdilo platnost IRI modelu v porovnání s přímým a nepřímým měřením. Porovnání s IRI modelem

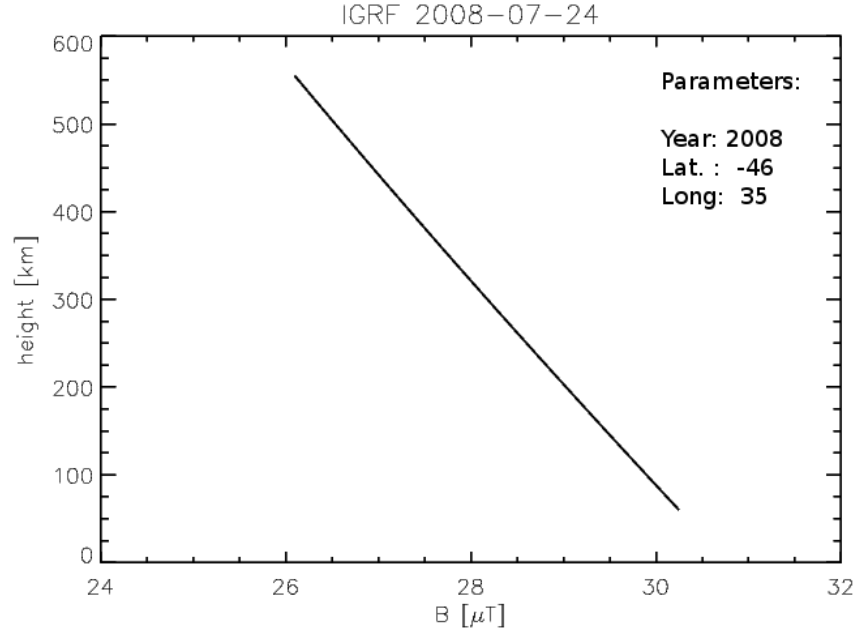


Obrázek 2.1: Příklad profilu elektronové koncentrace IRI modelu. Závislost elektronové hustoty na výšce od zemského povrchu pro vstupní parametry: UT = 2005-12-22 11:37, Lat. = 36°, Long. = 154°.

je často také jedním z prvních úkolů pro nově vyslaný satelit, který provádí měření v ionosféře. Na obrázku 2.1 je vidět typický profil závislosti elektronové koncentrace na výšce od zemského povrchu pro střední zeměpisné šířky v lokálních nočních hodinách. Hodnoty tohoto modelu lze pro experimentální účely získat z webových stránek projektu (<http://iri.gsfc.nasa.gov>).

2.3 Model geomagnetického pole IGRF10

Mezinárodní referenční model geomagnetického pole - IGRF10 [S. Maus et. al., 2005] je empirická reprezentace zemského magnetického pole. Model je doporučený pro vědecké účely. Je vyvíjen pracovní skupinou IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy). Model reprezentuje zemské magnetické pole bez vnějších zdrojů. IGRF používá obvyklou sférickou harmonickou expanzi skalárního potenciálu v geocentrickém souřadném systému. Koeficienty modelu jsou výsledkem všech dostupných dat zahrnujících geomagnetické měření z observatoří, lodí, letadel a družic. Desátá generace modelu IGRF umožňuje získávání hodnot v období od roku 1900 do 2015. K datům tohoto modelu lze také přistupovat přes webové rozhraní (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/igrf_vitmo.html) nebo lze používat zdrojový kód jako zásuvný modul pro různé programovací jazyky. Na obrázku 2.2 je zobrazen typický profil závislosti celkového geomagnetického pole na výšce od zemského povrchu pro střední zeměpisné šířky.



Obrázek 2.2: Příklad závislosti celkového geomagnetického pole na výšce podle IGRF modelu. Zadané vstupní parametry: Year = 2002, Lat. = 36°, Long. = 154°.

2.4 Efekt šíření vln ionosférou

Elektromagnetické vlny šířící se od zdrojů na zemském povrchu nebo v jeho blízkosti musí překonat neutrální atmosféru a ionosféru, aby mohly být detekovány ve výškách, kde pracují družice. Budeme tedy řešit efekty spojené s šířením elektromagnetických vln v tomto prostředí. Efekty neutrální atmosféry můžeme při uvažování dostatečně vysokých frekvencí vln v porovnání s efekty ionosféry zanedbat. Při absenci geomagnetického pole dostaneme pro index lomu vztah

$$n^2 \approx 1 - \frac{f_p^2}{f^2} \quad , \quad (2.13)$$

kde n je index lomu, f_p je plazmová frekvence a f je frekvence procházející vlny.

Dominantním efektem ionosféry pro impulsní signály je frekvenčně závislé grupové zpoždění t dané vztahem

$$t = \frac{R}{c} + \frac{\alpha N}{f^2} \quad , \quad (2.14)$$

R je přímá vzdálenost mezi zdrojem a přijímačem, c je rychlost světla ve vakuu, α je konstanta, N je integrál celkové elektronové hustoty podél dráhy šíření a f je frekvence. Tento vztah se dá přepsat do tvaru, kde frekvence f je funkcí času t

$$f = \sqrt{\frac{\alpha N}{t - \frac{R}{c}}} \quad . \quad (2.15)$$

Z rovnice 2.15 vyplývá, že se snižující se frekvencí vlny dochází k časovému zpoždění jejího příchodu k přijímači. Pokud dále uvažujeme efekty geomagnetické pole Země, dochází v místech s dostatečně velkou hustotou plazmatu k dvojlomu šířící se vlny. K tomuto efektu nejvíce dochází v oblasti F vrstvy ionosféry (~ 300 km), kde je koncentrace elektronů největší. Přidáním tohoto efektu se vztah 2.15 rozšíří na vztah

$$f = \sqrt{\frac{\alpha N}{t - \frac{R}{c}}} \pm f_{ce} \cos \beta \quad , \quad (2.16)$$

kde f_{ce} je elektronová cyklotronová frekvence a β je úhel mezi vlnovým vektorem \vec{k} a geomagnetickým polem \vec{B} v místě, kde vlna protíná F vrstvu ionosféry. Znaménko $+$, resp. $-$, odpovídá řádnému, resp. mimořádnému módu šířící se vlny. Tento vztah je platný pro tzv. přibližně podélnou aproximaci ($|\frac{\cos \beta}{\sin \beta^2}| \gg \frac{f_{ce}}{2f}$). Efekt dvojlomu lze dobře ukázat na současném příjmu energií na frekvencích $f \pm f_{ce} \cos \beta$ pro řádný (se znaménkem $-$) a mimořádný mód (se znaménkem $+$). Pokud je zdroj vln lineárně polarizovaný, je možné z časů příchodů jednotlivých módů získat $f_{ce} \cos \beta$ a tím vlastnosti prostředí (ionosféry), kterým se vlna šíří.

Kapitola 3

Bouřky a blesky

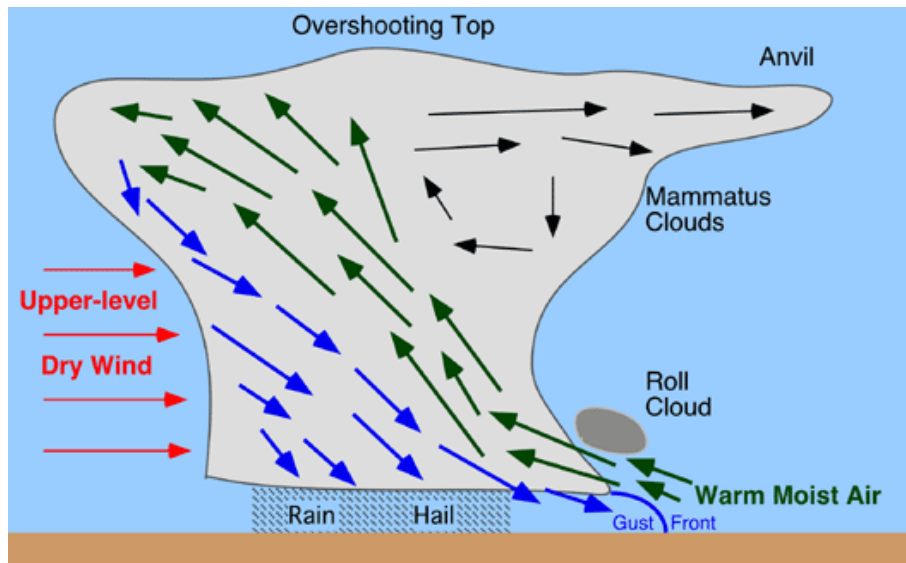
V této kapitole se budeme věnovat procesu tvorby bouřkových systémů a procesu bleskového výboje. Jednotlivé pasáže jsou širěji popsány například v H. Volland [1995].

3.1 Vznik bouřky

Tvorba bouřkového systému je podmíněna splněním specifických meteorologických podmínek, které umožní vytvoření oblastí s velkými rozdíly elektrických potenciálů. Překvapivě mnoho meteorologických situací vede ke vzniku bouřek. Mezi hlavní procesy jmenujme konvekci studené a teplé fronty, sněhovou bouři, monzunovou konvekci, tajfuny a hurikány. Na obrázku 3.1 je vidět konvekce vzdušných proudů v bouřkovém systému. Bouřkové systémy jsou formované vertikálním prouděním vzduchu, které umožňují vznik teplotních nestabilit. Proudění vzduchu je způsobeno diferenciálním ohřevem atmosféry a zemského povrchu slunečním zářením a Archimédovým zákonem. Vzniklé teplotní nestability lze považovat za motor bouřky. Důležitým procesem v bouřce je vytváření rozdílů potenciálů - *elektrifikace*. Pro vznik těchto rozdílů je nutné separovat opačné náboje. Tyto náboje mohou být nesené na dešťových kapkách, sněhových vločkách nebo na prachových částicích. Jedním z modelů popisujících nabíjení je konvekční proces nabíjení. Tento proces funguje na principu zachycení pozitivního náboje, například na vodní kapce. Poté je tento náboj nesen do vrchních partií mraku, kde je dále držen negativními náboji z vnější strany mraku.

Druhý hlavní princip se nazývá induktivní a opírá se o existenci vertikálního elektrického pole ovlivňujícího polarizaci nábojů na částicích. Tato polarizace může následně zesilovat elektrické pole a pomáhat další separaci. Posledním z hlavních principů je neinduktivní proces, při kterém dochází k přenosu náboje kolizemi částic.

Takto vytvořené oblasti s rozdílným potenciálem mohou dosahovat kritických hodnot potřebných pro elektrický průraz. Následně dochází k elektrickému výboji - *blesku*.



Obrázek 3.1: Ilustrační obrázek konvekce vzduchu v bouřkovém mraku. (Získáno z www.physicalgeography.net)

3.2 Blesky

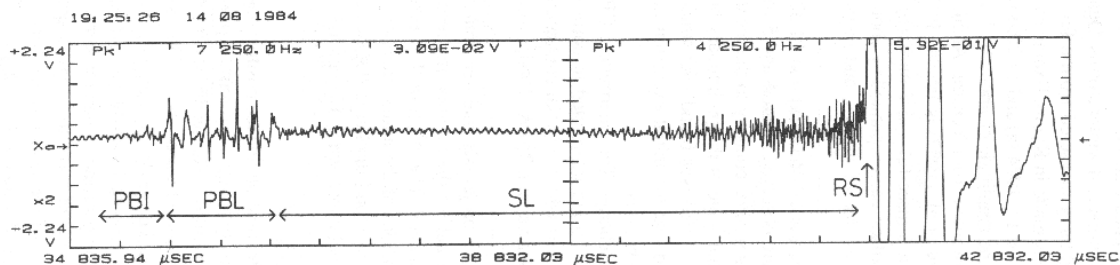
Blesk lze považovat za elektrický výboj, který v krátkých časových škálách přenáší velké proudy (stovky kA). Každý blesk je tvořen jedním nebo více vnitřními procesy (viz. níže), které jsou většinou kombinací vůdčího a zpětného úderu. Celkový proces blesku trvá okolo 300 ms a každý vnitřní proces, nazývaný úder, trvá $\sim 70 \mu\text{s}$. Průměrně dochází při výboji k třem odděleným úderům s časovým odstupem 40 ms. Celková kvantita přeneseného náboje se nejčastěji pohybuje okolo 20 C, ale pro různé případy se může pohybovat v širokém rozmezí 2–200 C. Blesky se mohou vyskytovat ve variantách jako výboje mezi mrakem a zemí (CG) nebo výboje uvnitř mraků (IC).

3.2.1 Výboj mezi mrakem za zemí ($\pm\text{CG}$ - Cloud-to-Ground)

Při tomto druhu bleskového úderu dochází k přenosu velkého množství záporného náboje mezi spodními částmi mraku a zemí (-CG) nebo kladného náboje mezi horními vrstvami mraků a zemí (+CG).

Procesy předcházející výboji

Bezprostředně před započítím samotného procesu bleskového výboje musí uvnitř mraku dojít k vytvoření příhodných podmínek. Náboj v mracích je totiž rozptýlen mezi obrovský počet nabitých částíček, proto musí dojít k přeskupení náboje do jednoho regionu. Jakmile dojde k požadované změně rozložení v dostatečně velké oblasti, dochází ke vzniku proudu vedoucího streameru. Procesy předcházející výboji lze



Obrázek 3.2: Vlnová forma změny elektrického pole při pozorování bleskového výboje. [H. Volland, 1995]

považovat za druh výboje v mracích s typickým větvením mezi oblastmi s opačnými náboji. Tento proces vyvolává změny elektrického pole, které lze pozorovat i na zemském povrchu.

Vůdčí stupňovitý výboj

Proces předcházející výboji svým streamerem neutralizuje regiony s kladným nábojem a následně tyto regiony plní záporným nábojem. Postupně se šíří dále směrem k zemi a vytváří negativně nabitě cesty. Nepohybuje se však přímo, ale jednotlivé kroky jsou stupňovité a mohou se i větvit. Délka jednotlivých stupňů se pohybuje od 3 do 200 metrů. Typické rychlosti šíření toho procesu jsou $\sim 10^5 \text{ ms}^{-1}$.

Kanál vytvořený stupňovitým výbojem je nabitý na vysoký záporný potenciál. Když se konec tohoto kanálu přiblíží na vzdálenost několika desítek metrů od zemského povrchu, dochází k vytvoření velmi silného elektrického pole mezi koncem kanálu a zemí. Následuje elektrický průraz. Vytvoří se pozitivní streamer, který se šíří od zemského povrchu ke konci negativního kanálu. V důsledku toho se spodní část negativního kanálu dostane na potenciál země a vzniká zpětný úder mezi spodním koncem negativního kanálu a jeho zbytkem.

Zpětný úder

Zpětný úder se šíří podél kanálu předcházejícího stupňovitého výboje. Rychlost šířící se vlny se pohybuje okolo jedné třetiny rychlosti světla a základny mraků dosáhne během $\sim 70 \mu\text{s}$. Zpětný výboj přenáší do země záporný náboj nahromaděný v předchozí fázi. Velikost maximálních hodnot tekoucího proudu se při tomto procesu pohybuje typicky okolo 30 kA. Vyskytovat se mohou i následné zpětné úder, pro které jsou hodnoty proudu o přibližně polovinu nižší než pro první zpětný úder.

V důsledku velkých přenášených proudu se tento proces stává velkým zdrojem širokého spektra elektromagnetických vln. Na obrázku 3.2 je vidět vlnová forma od bleskového výboje s popsanými jednotlivými fázemi. PBI a PBL (Premiary Breakdown Initail, Last) jsou procesy předcházející výboji, SL (Stepped Leader) je stupňovitý vůdčí výboj a RS (Retrun Stroke) je zpětný úder.

3.2.2 Výboj uvnitř mraků (IC - Intra-Cloud)

Tyto procesy probíhají uvnitř mraků a jsou to nejčtenější druhy blesků ($\sim 90\%$ všech blesků). Výboje obvykle začínají inicializačním streamerem, který se může šířit směrem dolů nebo horizontálně. Směr šíření závisí na rozložení nábojů podél trasy šíření. Inicializační streamer trvá ~ 250 ms a šíří se rychlostí řádově 10^4 ms $^{-1}$. Přenášený proud dosahuje hodnot až 100 A. Tento proces distribuuje podél své cesty pozitivní náboj. Celý výboj lze srovnat s procesem předcházejícím CG výboji.

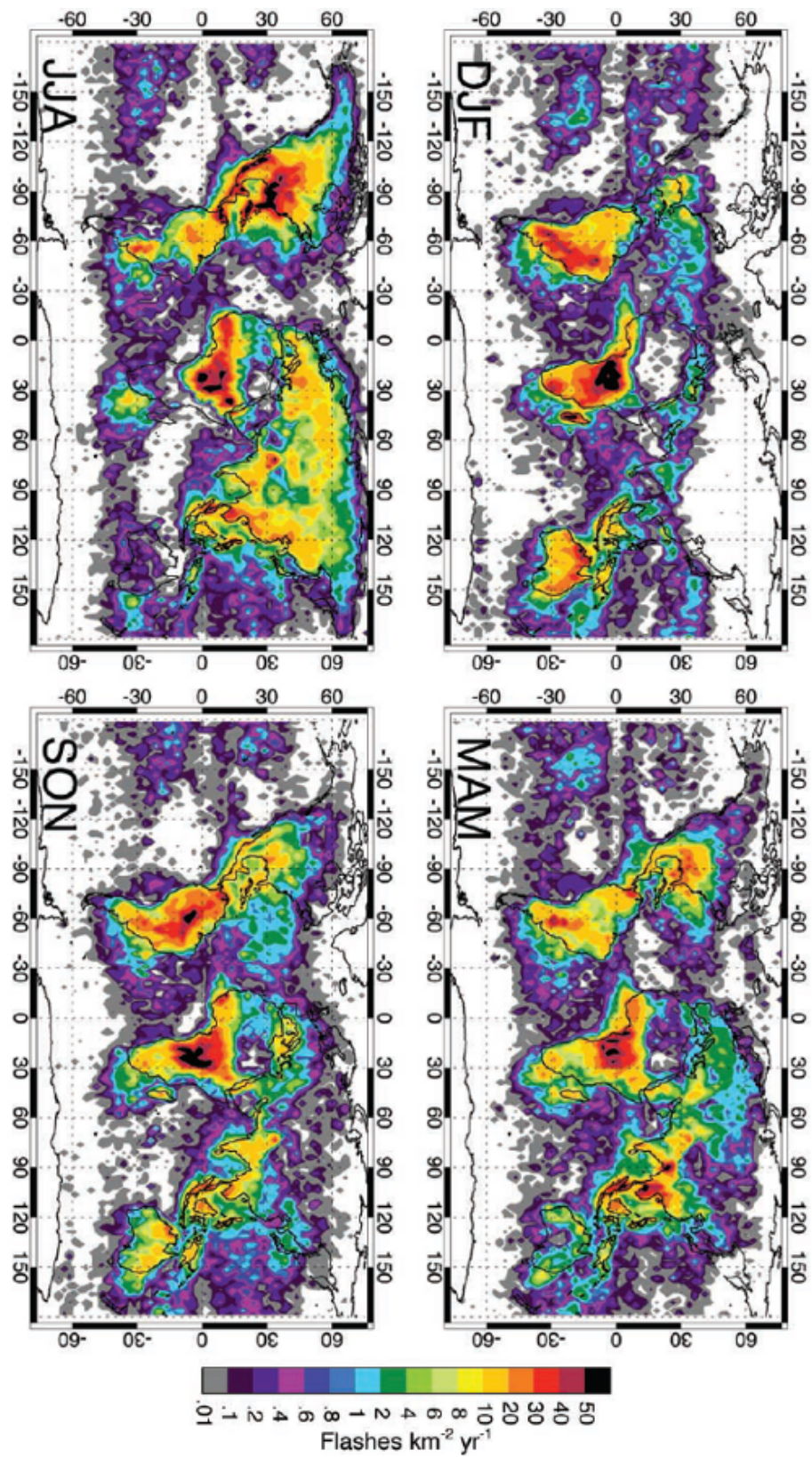
3.3 Geografická a sezonní variace blesků

Pro další studium jevů, které souvisí s bouřkami, ale i bouřek samotných je podstatné znát geografickou a sezonní variaci blesků. Tímto problémem se zabývalo již mnoho prací od konce 19. století. V dnešní době, při dostatečném rozvoji pozemních stanic a souběžném družicovém měření, dostáváme výsledky poskytující pokrytí celé Země. Několik let měření, uvedených například v nedávných článcích H. J. Christian [2003], O. Pinto Jr. [2006], umožnilo statisticky vyhodnotit a porovnat sezonní a lokální časovou variaci blesků a tím dostat ucelenou distribuci blesků v lokálním čase, roční době a geografické pozici. Tato měření ukazují kvalitativní shodu a shrnutí jejich výsledků ukazuje, že každou sekundu se na Zemi vyskytuje ~ 44 blesků. Místo s největší bleskovou aktivitou je ve Rwandě s hustotou 80 úderů na km 2 za rok. Podíl blesků vyskytujících se nad pevninou a oceánem je v poměru 10:1. Blesky jsou dominantní v oblastech severního Atlantiku a západního Pacifiku, oproti menším hustotám výskytu v oblasti východního Pacifiku a Indického oceánu. Více než 78 % blesků se vyskytuje mezi šířkami $-30^\circ - +30^\circ$ s tím, že se pík výskytu pohybuje okolo rovníku podle lokálního léta jednotlivé polokoule. Sezonní a geografické variace jsou shrnuty na obrázku 3.3, kde jednotlivé obrázky odpovídají třem měsícům v roce, a barevně je vyznačena velikost hustoty výskytu blesků.

3.4 Radio frekvenční emise od blesků

Rozvoj v této oblasti pozorování byl způsoben vysláním amerických satelitů ALEXIS (The Array of Low Energy X-ray Imaging Sensors) v roce 1993 a FORTE (Fast On-orbit Recording of Transient Events) v roce 1997. Oba satelity měřily elektromagnetické vlny v oboru vysokých a velmi vysokých frekvencí a pozorovaly blesky a jevy s nimi související.

Spektra vyzářených vln pro první a následný dílčí úder CG výboje jsou téměř identická. Spektra pro stupňovitý vůdčí a zpětný úder jsou také velmi podobná. Charaktery spekter vůdčího výboje a zpětného úderu jsou shodné nad 2–3 MHz, ačkoliv magnituda spektra vůdčího výboje je až o 5 řádů menší. Tento fakt ukazuje na podobné mechanismy procesů, které nejsou závislé na amplitudě. To odpovídá tomu, že procesy jsou ovlivněné spíše velikostí pole než jeho časovou změnou. Nejsilnějším zdroje zdrojem RF emise od konvenčních CG blesků je v oboru 0.2–20 MHz zpětný úder. Bleskové procesy probíhající uvnitř mraků (IC) silně vyzářují na frekvencích



Obrázek 3.3: Sezonní a geografická variace bleskové aktivity. Jednotlivé panely odpovídají vždy třem měsícům v roce. Převzato z H. J. Christian [2003]

0.6–8 MHz [J. C. Willett, 1990]. Za nejsilnější emise spojené s blesky se považují tzv. NBPs (Narrow bipolar pulses) [D. M. Le Vine, 1980]. Jedná se o jevy, které na krátkých časových škálách, řádově $\sim 10 - 20 \mu\text{s}$, produkují velmi intenzivní emise, s amplitudou až o 10 řádů větší než u emisí typických pro CG nebo IC bleskové výboje. Lze je rozdělit na pozitivní (NPBPs) a negativní (NNBPs) podle znaménka náboje jejich inicializačního pulzu. Tyto pulzy byly detekovány relativně izolovaně a není pozorováno, že se nejedná o projev stupňovitého výboje nebo zpětného úderu blesku. Procesy, které produkují tyto jevy, mají zcela jistě jiné spektrální vlastnosti, což dokazuje měření velmi silných emisí na vyšších frekvencích (řádově ~ 50 MHz), kde v těchto frekvenčních oborech u klasických blesků je pozorován značný pokles intenzity [D. A. Smith, 1999].

Kapitola 4

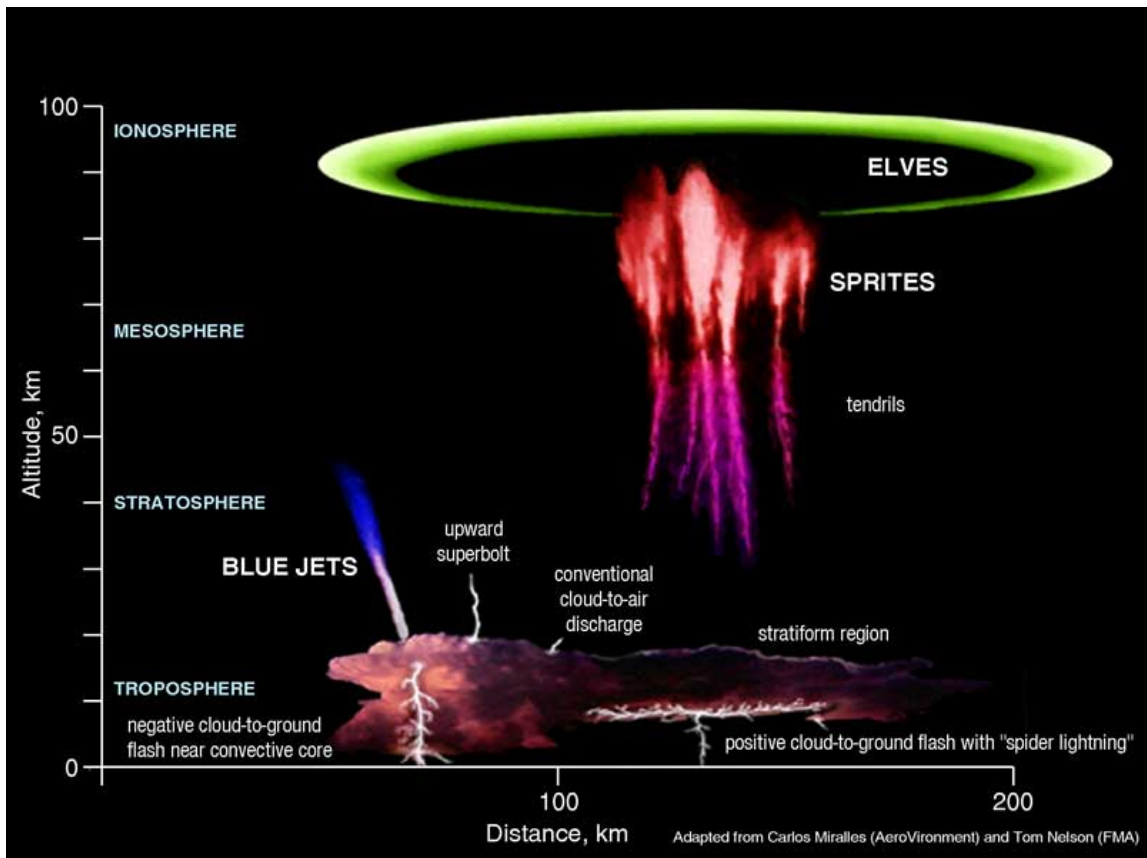
Jevy spojené s bouřkami

4.1 Sprites, Elves a Blue Jets

Tyto jevy byly objeveny na počátku 90-tých let 20. století při pozorování bouřkových systémů na středozápadu USA [T. Neubert, 2003]. Hned po svém objevení znamenaly nový směr pro výzkum atmosférické elektrodynamiky. Často bývají označovány jako krátké optické záblesky - *Transient Luminous Events* (TLEs).

Sprity jsou optické záblesky trvající na časových škálách od několika milisekund do několika desítek milisekund. Vyskytují se v mezoféře nad bouřkovými systémy. Obrovské sprity dosahují výšek 90 km. Často mají kuželovité tvary nebo jsou tvořeny shlukem úzkých vláken (průměry ~ 100 m), ale vždy mají formu vertikálních sloupců. Horizontálně mohou dosahovat rozměrů až 40 km.

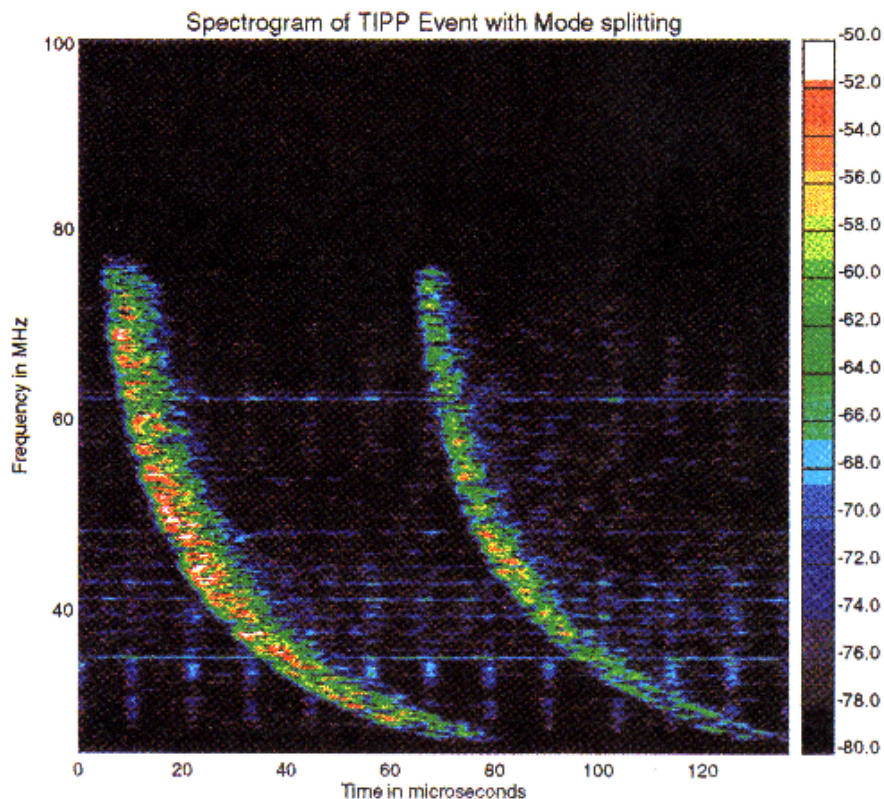
Sprity se často nazývají blesky vysokých výšek, což potvrzuje i model mechanismu vzniku těchto procesů [V. P. Pasko, 1996]. Pravděpodobně jsou tyto jevy generované elektrickým pulzem v důsledku silné bouřky. Převážně jsou spojovány s +CG bouřkovými výboji, při kterých dochází k přenosu obrovského množství náboje. Hodnoty tohoto přeneseného náboje se pohybují v intervalu 25 - 325 C [S. Cummer, 1997]. Není však jednoduché měřit přenos náboje při bleskovém výboji, proto se používá technika měření elektromagnetického pole ve větších vzdálenostech od bouřky. Z tohoto měření se získává hodnota vertikální změny nábojového momentu. Tato veličina se ukázala jako klíčový parametr pro určení blesků, které inicializují sprity. V následující práci S. Cummer [1997] bylo zjištěno, že k inicializaci měřitelného spritu dochází při změně nábojového momentu od 25 do 3250 C km při prvních 5 ms inicializačního úderu. W. Hu et. al. [2002] provedli statistiku podobných měření a zjistili, že více než 90% spritů je inicializováno změnami nábojového momentu většími než 1000 C km a méně než 10% spritů je inicializováno změnou momentu menší než 100 C km, nicméně nenulová pravděpodobnost vzniku spritu při nižších změnách nevylučuje, že na vznik mohou mít vliv i jiné faktory. Sprity se podobají bleskům i v tom, že dochází k přenosu proudu tělem spritu [S. A. Cummer, 1998]. Hodnoty protékajícího proudu jsou v řádu kA. Další podobnou vlastností je existence spritů obou polarit, tj. jevů, při kterých dochází k přenosu náboje z ionosféry do vrchních partií mraků a naopak [C. P. Barrington-Leigh, 1999]. Pro všechny tyto vlastnosti byly sprity označeny jako významná součást at-



Obrázek 4.1: Ukázka jednotlivých optických jevů spojených s bouřkami. Osa y odpovídá výšce pozorovaných jevů na Zemi v kilometrech a osa x odpovídá jejich horizontálním rozměrům. Barevné podání odpovídá skutečným pozorováním. Autoři: C.Miralles a T. Nelson

mosférického elektrického obvodu a hrají významnou roli v procesech probíhajících v tomto myšleném obvodu.

Mezi další optické jevy v středních vrstvách atmosféry můžeme zařadit Blue Jety. Tyto jevy mají typický kuželovitý tvar a charakteristickou modrou barvu. Šíří se z vrcholku bouřkových mraků směrem do ionosféry a dosahují výšek až 50 km. Elves jsou jevy spojené se sprity. Jedná se o typické záblesky ve tvaru prstence, šířících se horizontálním směrem se spritem v pomyslném středu tohoto prstence. Vyskytují se ve výškách ~ 100 km a dosahují rozměrů i několik stovek kilometrů. Nejspíše ale nejsou samostatným výbojem, nýbrž jen projevem prudkého ohřátí okolní atmosféry proudem, který teče spritem. Na obrázku 4.1 jsou zobrazeny všechny výše zmíněné jevy.



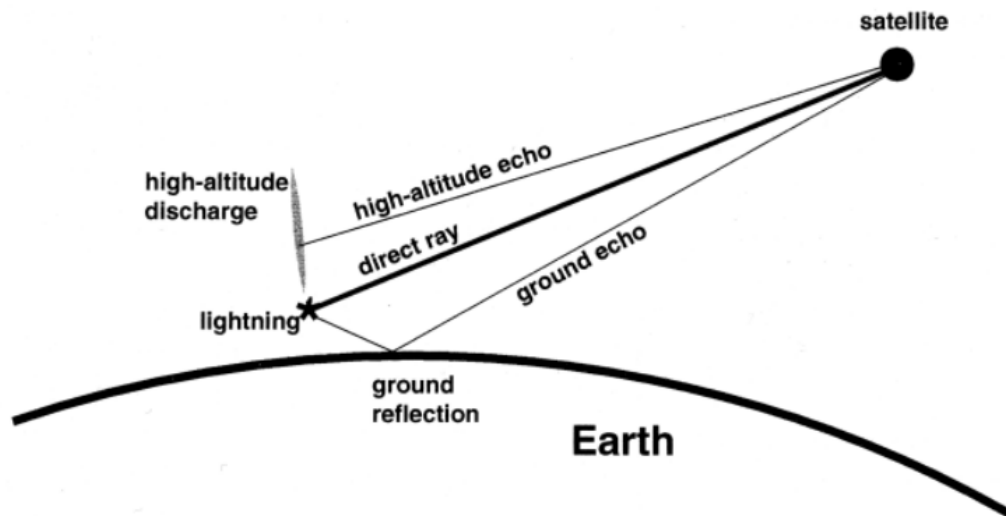
Obrázek 4.2: Typický časově-frekvenční spektrogram fluktuací výkonu elektrického pole odpovídající TIPPů, zaznamenaný družicí Alexis. Převzato z D. Holden [1995]

4.2 Trans-ionosférické párové pulzy

Tato dvojice pulzů byla poprvé pozorována na satelitu ALEXIS [R. Massey, 1995, D. Holden, 1995] a následně studována družicí FORTE [A. R. Jacobson, 1999]. Pulzy byly nazvány TIPPů (Trans-ionospheric Pulse Pairs). Charakteristické pro ně jsou délky trvání v řádech $\sim 10 \mu\text{s}$, rozestupy mezi pulzy řádově $\sim 50 \mu\text{s}$ a vyzářený výkon až o 20 dB větší, než je výkon pozadí. Další charakteristickou vlastností je disperze signálu, která odpovídá průchodu těchto pulzů přes ionosféru (viz. kap. 2.4). Zdroje těchto pulzů tedy leží v nižších částech atmosféry (troposféře). Na obrázku 4.2 je vidět spektrogram s typickým průběhem těchto pulzů, zaznamenaný družicí ALEXIS.

4.2.1 Modely

Následným úkolem bylo stanovit mechanismus vzniku těchto jevů. V první řadě byly vytvořeny modely, které měly popsat šíření těchto signálů od zdrojů ležících pod ionosférou až k družici, která je detekovala. V obou modelech šíření byl za zdroj prvního pulzu stanoven konvenční bleskový výboj bez bližšího určení. Dále



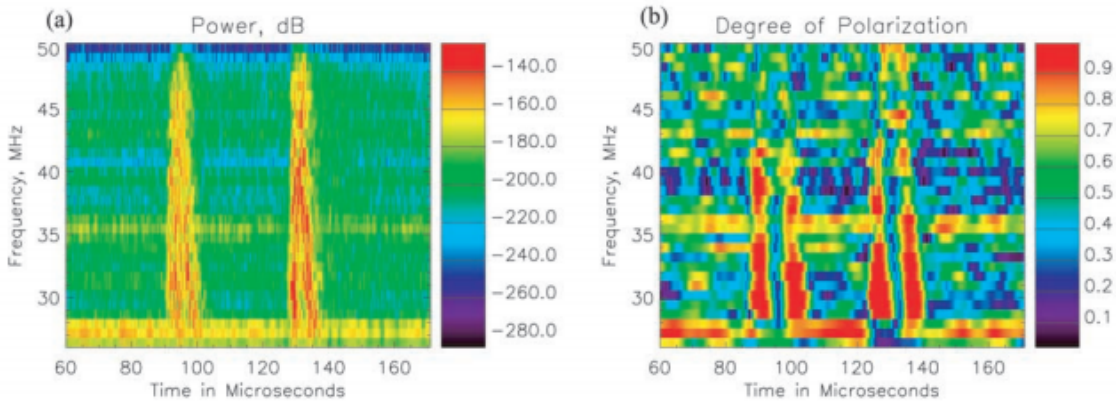
Obrázek 4.3: Navržené modely vzniku a šíření TIPPsů. Převzato z A. R. Jacobson [1999]

se oba modely rozcházejí v stanovení mechanismu druhého pulzu. V prvním modelu je druhý pulz interpretován jako odraz prvního pulzu od zemského povrchu. Tento model se opírá o pozorovanou koincidence s bleskovými výboji [R. S. Zuelsdorf, 1998, C. T. Russell, 1998], o souhlas v pozorování zpoždění druhého pulzu, které pulz potřebuje k odrazu od země, v neposlední řadě o měření odrazivosti zemského povrchu [R. Massey, 1998] a pozemní pozorování silných pulzů nazvaných SIPPs [D. A. Smith, 1996]. V druhém modelu byl za zdroj druhého pulzu stanoven výboj ve vyšších částech atmosféry, tzv. troposférické echo, ležící několik desítek kilometrů nad bouřkou. Tuto skutečnost vysvětlují měření, při kterých byl druhý pulz v páru intenzivnější než první pulz. H. E. Tierney [2002] se pokusil vysvětlit příčinu pozorování intenzivnějšího druhého pulzu tím, že při odrazu prvního pulzu může docházet ke změně polarizace a to může způsobit detekci druhého pulzu s vyšší intenzitou. Dalším vysvětlením může být to, že zdroj těchto pulzů není izotropický a v některých případech vyzařuje větší výkon směrem k zemi. Na obrázku 4.3 jsou vykresleny oba uvažované modely pro vznik TIPPsů.

4.2.2 Pozorování TIPPsů

Porovnáním globálních měření lze ukázat, že TIPPs se vyskytují v blízkosti detekovaných bleskových výbojů. Studium geografického rozložení a sezonní variace TIPPsů poukazuje na velmi podobné geografické a sezonní variace, jako pro distribuce konvenčních blesků (viz kapitola 3.3)[R. S. Zuelsdorf, 1997]. Avšak četnost výskytu je daleko menší.

Intenzita pulzů poukazuje na to, že zdroje těchto pulzů musí být daleko silnější než konvenční blesky, což vysvětluje možné spojení s úzkými bipolárními pulzy NBPs



Obrázek 4.4: Pozorovaná polarizace pro bleskový výboj produkující TIPPů, po odstranění efektu šíření ionosférou. Na panelech jsou časově-frekvenční spektrogramy: (a) celkového výkonu a (b) stupně polarizace, kde hodnota 1 znamená úplně polarizovanou vlnu. Převzato z X.-M. Shao [2001]

[R. S. Zuelsdorf, 2000]. Tomuto faktu odpovídá i lokace zdrojové oblasti odpovídající výšce uvnitř bouřkových systémů.

Zdroje pulzů produkujících TIPPů musí být také silně polarizované [X.-M. Shao, 2001, 2002]. Tato skutečnost indikuje spojení s výbojem, který je vysoce organizovaný, více než proces mnoha náhodně orientovaných výbojů. Za mechanismem vzniku tedy nejspíše nejsou procesy úvodního vůdčího výboje, temného vůdčího výboje, pro které není pozorovaná rozeznatelná polarizace. Úvodní procesy při CG blesku jsou polarizovány, ale ne tak silně jako pro TIPPů. Na obrázku 4.4 je zobrazeno výkonové spektrum a k němu příslušející polarizace pozorovaných TIPPů. Ze signálů bylo před jejich zobrazením odstraněn efekt šíření ionosférou.

Přesný mechanismus vzniku těchto jevů není ještě stále zcela znám. V této oblasti zkoumání mají pomoci nově připravované projekty na pozorování a analyzování jevů spojených s bouřkami. Tyto projekty budou spojovat pozemní, letecká a družicová pozorování. Řadí se mezi ně i připravovaný francouzský satelit TARANIS (kap. 6).

Kapitola 5

Cíle práce

Předkládaná práce se týká problematiky studia generace a šíření elektromagnetických vln související s bouřkovou aktivitou. Zaměřuje se na studium v oboru vysokých a velmi vysokých frekvencí, které byly realizovány družicovými projekty ALEXIS (1993) a FORTE (1997). Dále je v práci představeno studium vysokofrekvenčních pulzů, zaznamenaných na měření družice DEMETER. To bude následně sloužit pro připravovaný projekt TARANIS (2013), který je představen v poslední části. Tento projekt bude navazovat na studium vysokofrekvenčních emisí jevů spojených s bouřkami. Pro analogovou část je v této sekci provedena simulace výběrového algoritmu. Odtud vyplývají následující cíle práce.

Studium vysokofrekvenčních pulzů z měření družice DEMETER pro určení parametrů palubních algoritmů družice TARANIS:

- vyhledání vysokofrekvenčních pulzů
- stanovení kritérií výběrů těchto pulzů
- analýza získaných dat

Vlastní příprava palubních algoritmů družice TARANIS:

- popis výběrového algoritmu
- simulace analogových filtrů
- simulace funkčnosti algoritmu
- detekce trans-ionosférických párových pulzů
- testování detekce pulzů

Kapitola 6

Družice TARANIS

Družice TARANIS (Tool for the Analysis of RAdiations from lightNings and Sprites) je projektem Francouzské vesmírné agentury CNES [E. Blanc et. al., 2007, F. Lefevre et.al., 2008]. Tento projekt je zaměřen na studium impulzních přenosů energie mezi nižšími vyššími partiemi zemské atmosféry. Právě impulzní přenosy energie, pozorované ze Země i z Vesmíru, se pravděpodobně vyskytují v blízkém okolí Země. Přípravovaný projekt TARANIS by mohl odpovědět na nezodpověděné otázky ohledně jevů popsanych v kap. 4.1. Plánovaný start družice by měl být v roce 2013.

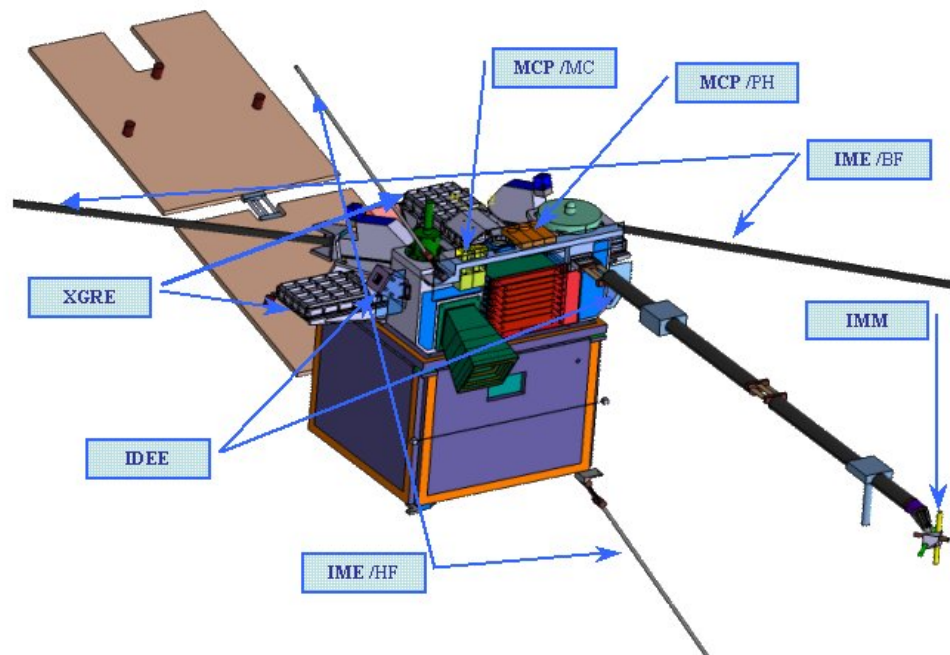
6.1 Přístrojové vybavení

Přístrojové vybavení bude provádět měření s nízkým časovým rozlišením v pozorovacím módu družice. Předně bude provádět optická, vlnová a částicová měření jevů na středních a nízkých výškách. Paralelně bude také provádět dobře synchronizované měření vybraných událostí ve velkém časovém rozlišení.

Pro příklad, pro TLE (Transient Luminous Events, kap. 4.1), bude muset být měření nízkofrekvenčního elektrického pole zaznamenáno v časovém intervalu začínajícím několik desítek milisekund před tzv. alertem, aby bylo možné detekovat záznam od předcházející bouřky. Tento fakt podmiňuje nainstalování kruhových pamětí v každém přístroji.

Alert může být spouštěn detekcí primárních událostí (TLEs, TGFs, elektronovou sprškou, silnou emisí elektromagnetických nebo elektrostatických vln) na jednotlivých přístrojích. Spouštění těchto alertů je řízeno jednotkou MEXIC. Délky intervalů záznamu budou závislé na jednotlivých přístrojích a na pořadí příchozího alertu.

Pro práci přístrojů jsou definované dva měřicí módy, SURVEY MODE a EVENT MODE. Oba tyto módy pracují paralelně. SURVEY mód je aktivní v každé půlorbite nad geografickými šířkami ($-60^\circ - +60^\circ$). Některé přístroje musí být ve specifických regionech a časech vypnuté, kupříkladu v oblastech s vysokou radiací jako jsou oblasti SAA (South Atlantic Anomaly). Data s nízkým časovým rozlišením jsou kontinuálně přenášena do jednotky, která data dále ukládá do hromadné paměti. Přechod do rychlého měřicího módu, bude řízen speciálním signálem (signal alert). Data



Obrázek 6.1: Družice TARANIS, nákres rozložení jednotlivých přístrojů. Převzato z www.smsc.cnes.fr.

s vysokým časovým rozlišením budou ukládána v kruhových pamětech jednotlivých přístrojů. Některé parametry přístrojů a řídicí jednotky bude později možné měnit za letu. Na obrázku 6.1 je zobrazen nákres družice Taranis s rozložením níže popsaných přístrojů.

6.1.1 MEXIC (On-board Management)

MEXIC zajišťuje spojení mezi všemi vědeckými přístroji a satelitem a jejich napájení. Hlavní funkcí zařízení jsou: poskytovat sekundární napětí, přijímat a dekodovat řídicí zprávy, řídit spouštění jednotlivých měřících přístrojů, řídit signály přechodu mezi měřícími módy, provádět časovou kalibraci datových paketů a řídit datový tok do paměti.

6.1.2 IDEE (Energetic Electrons)

Hlavním úkolem tohoto experimentu je poskytovat elektronová spektra ve vysokém rozlišení, distribuce "pitch" úhlu, detekovat toky elektronů spojených s TGFs, identifikovat elektrony indukované blesky. Další úlohou bude vyslání alertu do centrální řídicí jednotky při identifikaci výše zmíněných událostí. Přístroj bude schopen měřit energetické elektrony ve velkých dynamických rozsazích. Bude obsahovat dva spektrometry a každý spektrometr bude schopen měřit spektra elektronů v rozsahu od 70 keV do 4 MeV. IDEE bude schopen detekovat krátkodobé jevy na časových

škálách menších než 10 ms.

6.1.3 IME-BF (Low frequency Electric Field)

Přístroj je určený k měření elektrického pole od stejnosměrného do frekvence 1 MHz. Hlavními úkoly experimentu IME-BF bude identifikovat blesky, které odpovídají vlnám v hvizdovém módu při prvním průchodu ionosférou. Dále bude přístroj monitorovat elektromagnetické pozadí a poskytovat odhad lokálních parametrů plazmatu. Experiment IME-BF bude rozšířen o iontovou sondu, která bude na velkých škálách detekovat perturbace termálního plazmatu. Použité měřicí antény budou shodné s anténami z družice DEMETER. Bude se jednat o sférické antény umístěné na koncích čtyřmetrových ramen. Iontová sonda bude umístěna v blízkosti satelitu (0.5 m), což bude dovolovat měření parametrů plazmatu vně tzv. sheath satelitu.

6.1.4 IME-HF (HF/VHF Electric Field)

Přístroj IME-HF bude měřit elektrické vlny ve frekvenčním rozsahu od 100 kHz do 35 MHz. Hlavním úkolem přístroje bude měřit radiofrekvenční záznamy spojené s TLEs, TGFs a jevy spojené s bleskovými výboji, zvláště pulzy spojené s IC blesky. Překrytí měřeného frekvenčního pásma s přístrojem IME-BF bude dovolovat stanovení polarizace a rozlišení jednotlivých módů. V celém frekvenčním pásmu bude experiment monitorovat transionosférické párové pulzy a emise způsobené lidskou činností. Přístroj bude měřit dvěma monopólovými anténami vzdálenými 3 metry. Experiment bude vybaven detekčním algoritmem pro vyhledávání výše zmíněných událostí s možností vyslání alertu pro řídicí jednotku družice.

6.1.5 IMM (Low frequency magnetic field)

Tento přístroj měří magnetické pole od několika Hz do 1 MHz. Bude sloužit k dvěma hlavním účelům, v první řadě bude na frekvencím nižších než 20 kHz poskytovat přesná měření charakteru šíření elektromagnetických emisí. Druhým hlavním úkolem tohoto experimentu bude zkompletovat na všech frekvencích data s přístrojem IME-BF. Měření bude provádět tříosý "search coil" magnetometr, který bude na konci ramena o délce dva metry. Je složen ze tří ortogonálních magnetických antén. První dvě antény jsou určeny pro měření magnetické komponenty od několika Hz do 20 kHz, třetí anténa je duální a měří zbývající magnetickou komponentu až do 1 MHz. Kompletní měření z přístrojů IMM a IME-BF bude sloužit k statistickým měřením výskytu IC blesků.

6.1.6 MCP (Micro Cameras and Photometers)

Úkolem experimentu MCP je identifikovat a charakterizovat TLEs (např. Sprity kap. 4.1), určovat pozice zdrojů těchto událostí a spouštět ostatní přístroje pro měření. První úkolem přístroje bude měřit vlnovou délku světla, která se liší pro různé typy TLEs a blesky. Druhým úkolem přístroje bude provádět měření pouze ve směru

přímém od družice k Zemi. Posledním úkolem bude provádění obou předchozích měření ve směru spojeném s možnou detekcí pozorovaných jevů.

Fotometr bude měřit ve čtyřech spektrálních pásmech. V prvních třech pásmech se bude měřit oblast o poloměru 274 km, ve čtvrtém pásmu bude poloměr 700 km. Přístroj bude měřit se vzorkovací frekvencí 20 kHz, což dovolí oddělit v čase záblesky konvenčních blesků od Spritů. Alert od přístroje MCP bude získáván z amplitudy výstupního signálů 1–3 fotometrů. Práh generování řídicího signálu se bude moci během letu měnit.

6.1.7 XGRE (X-ray, Gamma-ray and Relativistic Electron Experiment)

Přístroj XGRE bude poskytovat měření, které může jednoznačně vysvětlit mechanismy generující TGFs. Poskytne kvantitativní měření celkové energie a výšky v atmosféře. Dále pro pozorovaný jev umožní stanovit šířku, výšku a časově lokální faktory řídicí vývoj. Přístroj bude detekovat tvrdé rentgenové a gamma záření v rozsahu od 20 keV do 10 MeV s časem náběhu kratším než μs a celkovým trváním delším než několik stovek milisekund. Výška bude získána z času náběhu měřeného signálu a nízko energetické části změřeného spektra. XGRE detektor bude složen ze tří obdélníkových scintilátorů. Přístroj bude měřit změnu energie a celkovou velikost energie. Součástí bude opět detekční algoritmus, který při překročení stanoveného prahu vyvolá alert.

6.2 Vlnový přístroj IME-HF

V tomto oddíle si podrobněji popíšeme funkci vysokofrekvenčního vlnového přístroje IME-HF, který bude umístěn na palubě francouzského satelitu TARANIS. Samotná funkce přístroje bude digitalizovat a provádět zpracování signálu přicházejícího z měřících antén, následně uchovávat data ve formátu vlnových forem nebo spektrogramů a přenášet je do centrální jednotky (MEXIC). Přístroj bude pracovat ve dvou pracovních režimech, kde hlavním rozdílem bude časové rozlišení a délky časů ukládaných dat.

Shrnutí hlavních úkolů experimentu:

- identifikace vln spojených s TLEs
- charakterizace bleskových výbojů a jejich HF záznamů
- detekce akcelerovaných částic
- identifikace charakteristických frekvencí prostředí
- globální mapování přírodních a umělých elektromagnetických vln v oboru HF

Běžný měřicí mód (Survey mode)

Data budou odesílána v rámcích složených z 36 bloků a každý blok bude mít 2048 bytů. Přenosový čas rámce bude 14,7456 s.

Typy ukládaných dat:

- SP zprůměrovaný signál z výstupu sady filtrů.
- SK vlnové formy o délce 12,8 μ s, ekvidistantně rozmístěny po dobu 14,7456 s.
- SD delší vlnová forma o délce 307,2 μ s, vybíraná detekčním algoritmem.

Rychlý mód (Event mode)

Ukládání těchto dat bude vyvoláno příchodem speciálního signálu tzv. Alertu. Využitím kruhových pamětí budou moci být data zpětně vyvolána s ohledem na čas pozorování vybrané události. Dostupná paměť v tomto módu bude 128 Mbitů. Paměť bude distribuována pro vlnovou formu a výstupy ze sady filtrů.

6.2.1 Blokové schéma

Na obrázku 6.2 je blokové schéma připravovaného přístroje. Zcela vlevo je nakreslena anténa, následuje předzesilovač a pásmová propust, která slouží jako antialiasingový filtr (Butterworth 10. řádu, 35 MHz). Dále dochází k rozvětvení obvodu na rychlou digitální část, značená fialově a analogovou část, vyznačená světle modře.

Analogová část

Za antialiasingovým filtrem následuje výkonové přizpůsobení a sada 12 analogových filtrů. Na obrázku 6.3 jsou zobrazeny přenosové charakteristiky jednotlivých filtrů. Jedná se o reálné měření prototypu filtrů na ÚFA AV ČR. Na ose y amplituda a na ose x je frekvence v MHz. Černá čára odpovídající antialiasingovému filtru není v měřítku. Jednotlivé filtry:

filtr 1 dolní propust, Butterworth 9. řádu 2,9 MHz

filtr 2 pásmová propust 3,1–5,9 MHz

- horní propust, Butterworth 9. řádu 3.1MHz
- dolní propust, Butterworth 9. řádu 5.9MHz

filtr 3 pásmová propust 6,1–8,4 MHz

- horní propust, Butterworth 9.řádu 6.1 MHz
- dolní propust, Chebyshev 9.řádu, 8.4 MHz, zvlnění -0.005 dB

filtr 4 pásmová propust 9,6–11,4 MHz

- horní propust, Chebyshev 9. řádu 9.6 MHz, zvlnění -0.01 dB
- dolní propust, Chebyshev 9. řádu 11.4 MHz, zvlnění -0.02 dB

filtr 5 pásmová propust 12,6–14,4 MHz

- horní propust, Chebyshev 9. řádu 12.6 MHz, zvlnění -0.01 dB
- dolní propust, Chebyshev 9. řádu 14.4 MHz, zvlnění -0.02 dB

filtr 6 pásmová propust 15,8–17,2 MHz

- horní propust, Chebyshev 9. řádu, 15.8 MHz, zvlnění -0.01 dB
- dolní propust, Chebyshev 9. řádu, 17.2 MHz, zvlnění -0.02 dB

filtr 7 pásmová propust 19–20 MHz

- horní propust, Chebyshev 9. řádu 19 MHz, zvlnění -0.02 dB
- dolní propust, Chebyshev 9. řádu 20 MHz, zvlnění -0.03 dB

filtr 8 pásmová propust, 22–23 MHz

- horní propust, Chebyshev 9. řádu 22 MHz, zvlnění -0.02 dB
- dolní propust, Chebyshev 9. řádu 23 MHz, zvlnění -0.03 dB

filtr 9 pásmová propust 25–26 MHz

- horní propust, Chebyshev 9. řádu 25 MHz, zvlnění -0.02 dB
- dolní propust, Chebyshev 9. řádu 26 MHz, zvlnění -0.03 dB

filtr 10 pásmová propust 28–29 MHz

- horní propust, Chebyshev 9. řádu 28 MHz, zvlnění -0.02 dB
- dolní propust, Chebyshev 9. řádu 29 MHz, zvlnění -0.03 dB

filtr 11 pásmová propust 31–32 MHz

- horní propust, Chebyshev 9. řádu 31 MHz, zvlnění -0.01 dB
- dolní propust, Chebyshev 9. řádu 32 MHz, zvlnění -0.02 dB

filtr 12 pásmová propust 34–35 MHz

- horní propust, Chebyshev 9. řádu 34 MHz, zvlnění -0.01 dB
- dolní propust, Chebyshev 9. řádu 35 MHz, zvlnění -0.02 dB

Za pásmovými propustmi dochází k rozvětvení signálu do 12 kanálů. Každý kanál odpovídá dané frekvenční propusti. Dále je v každém kanálu umístěn logaritmický zesilovač s amplitudovou detekcí a analogově digitální převodník s časovým krokem 12 μ s a rozlišením 12 bitů. Nakonec jsou všechny kanály přivedeny na vstup logického pole FPGA (Field-programmable gate array - Programovatelné hradlové pole).

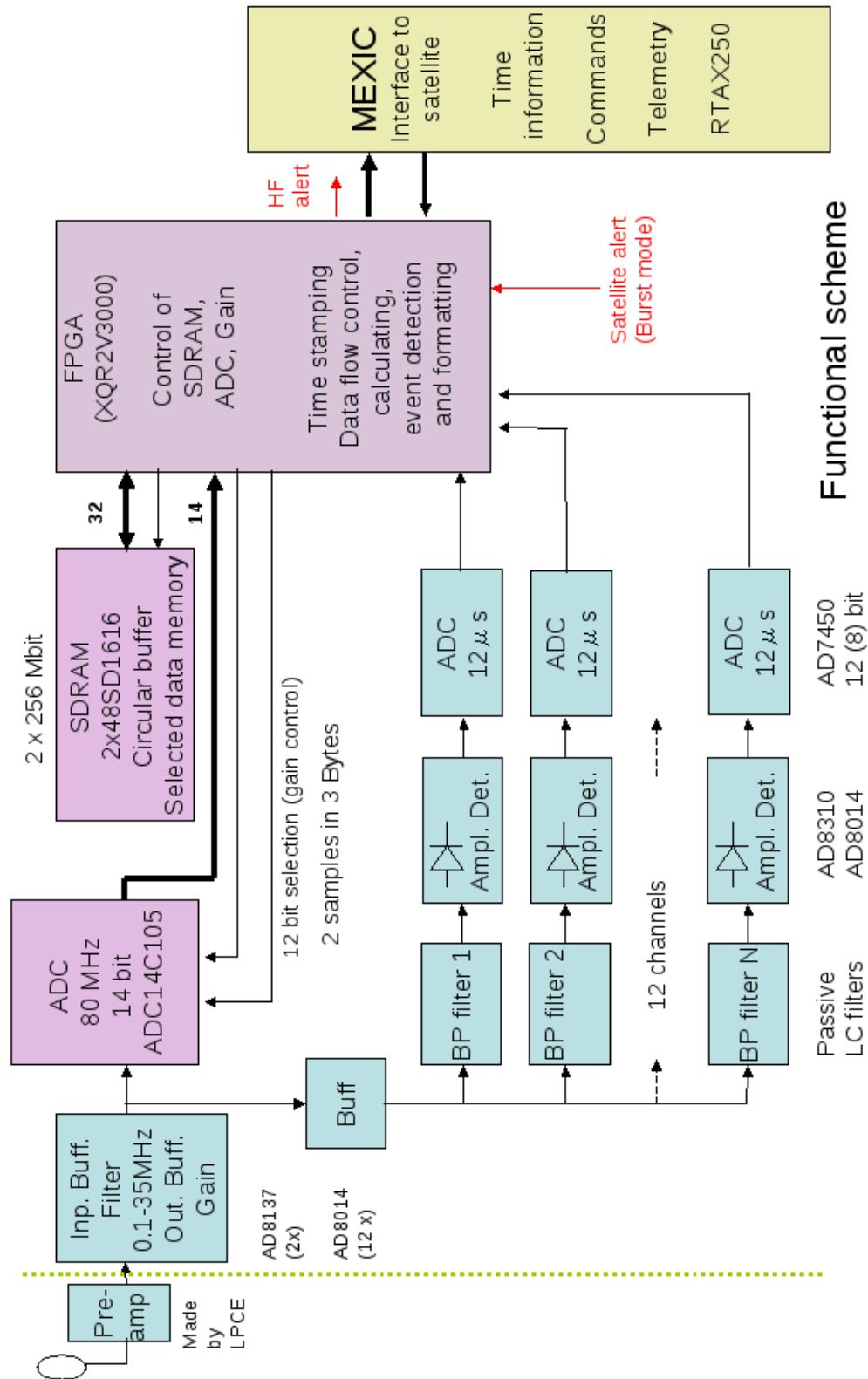
Digitální část

Na vstupu digitální části je signál převeden analogově-digitálním převodníkem s časovým krokem 12,5 ns a rozlišením 14 bitů. Následně je již zdigitalizovaný signál přiveden na vstup FPGA. FPGA bude řídit zapisování dat do kruhové a datové paměti, řídit vysílání alertů. Dále bude sloužit k časovému označování jednotlivých měřených dat. V tomto obvodu bude také zapsán vnitřní výběrový algoritmus pro vyhodnocování dat z analogové části. Další funkcí FPGA bude komunikovat s interfacem centrální jednotky MEXIC.

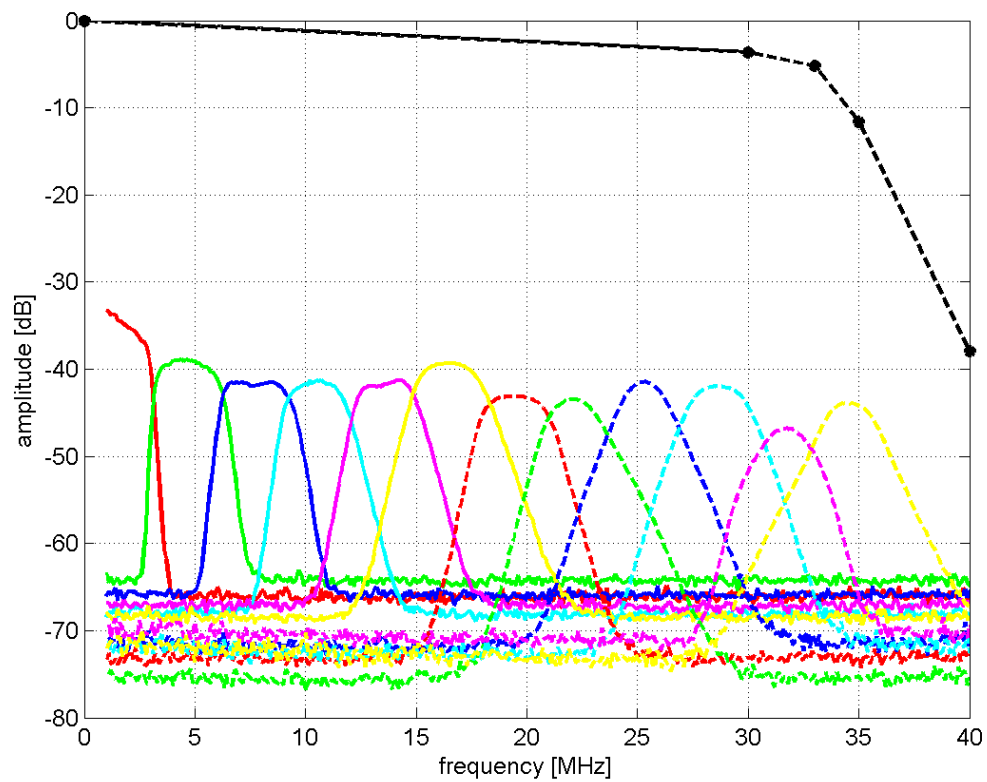
6.2.2 Výběrový algoritmus

Předpokládá se, že na vstupu algoritmu budou vstupní data vzorkována s frekvencí $1/12 \text{ MHz}$, což odpovídá základnímu pracovnímu kroku $T_{sa} = 12 \mu\text{s}$. Samotný algoritmus pracuje v následujících krocích:

- Pro každý kanál se na intervalu $T = Nalg \cdot T_{sa}$ hledá maximální amplituda. Tento časový rámec je v dalším kroku posunut o hodnotu $Nalg/2$. Hodnota $Nalg$ může být měněna během letu a předpokládaná hodnota $Nalg$ bude 16 nebo 32.
- Střední hodnoty se v každém kanálu počítají po dobu $T_M = M \cdot T_{sa}$, kde $M = 2^h$. Hodnota h je přirozené číslo, které se bude moci nastavovat během letu a bude mít typicky hodnotu $h = 20$ ($T_M = 12,58 \text{ s}$).
- Suma R je počítána pro každý interval o délce $Nalg$ podle vztahu $R = \sum_i w_i(m_i - a_i)$, kde m_i je maximum nalezené v daném kroku, a_i je průměrná hodnota kanálu v čase T_M a w_i je váha i -tého frekvenčního kanálu. Váhy kanálů bude možné nastavovat během letu. Jestliže bude $w_i = 0$, potom i -tý kanál nebude použit pro detekci.
- Maximální hodnota sumy R se hledá po celý čas přenosu předchozích dat (36 bloků, 14,7456 s). Jestliže je nalezeno nové maximum, vyšle se signál VCIL-S a zkopíruje se časový interval o délce $307,2 \mu\text{s}$ z kruhové paměti do datové paměti. Časový interval bude centrován okolo hodnoty $T_S - T_{SOFF}$, kde T_S je střed rámce, v kterém byl generován signál VCIL-S a T_{SOFF} je nastavovaný časový offset.
- Jestliže suma R dosáhne hodnoty P , generuje se signál VCIL-UD. Signál VCIL-UD bude sloužit pro spouštění rychlého měřicího módu a bude odeslán do jednotky MEXIC. Hodnota P může být nastavována během letu.



Obrázek 6.2: Blokové schéma připravovaného vlnového přístroje IME-HF pro družici TARANIS. Osobní sdělení J. Chum (ÚFA AV ČR)

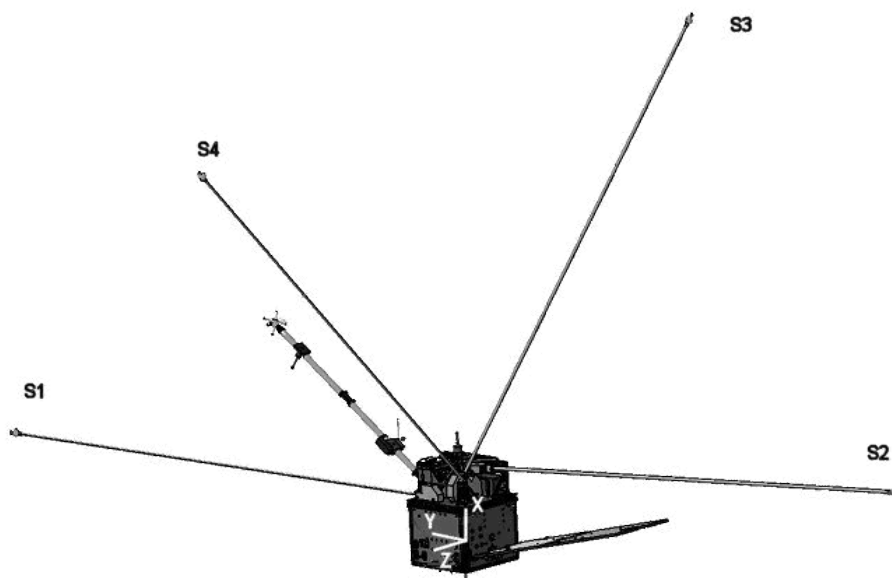


Obrázek 6.3: Časová odezva sady filtrů na signál lineárně rostoucí ve frekvenci. Osobní sdělení J. Chum (ÚFA AV ČR).

Kapitola 7

Družice DEMETER

Družice DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions) je řízena Francouzskou vesmírnou agenturou (CNES). Satelit byl vypuštěn v roce 2004. Hlavními cíli mise je zkoumat disturbance v ionosféře způsobené seismo-elektromagnetickými efekty a poruchy ionosféry produkované lidskou činností. Satelit se pohybuje na nízké oběžné dráze ve výšce ~ 700 km s přibližně polární orbitou. Za jeden den vykoná 14 obletů kolem Země. Plánovaná doba provozu byla dva roky, přesto je v současné době družice stále plně funkční.



Obrázek 7.1: Rozmístění jednotlivých antén přístroje ICE na družici Demeter

7.1 Přístrojové vybavení

Na palubě družice je nesen experimentální zařízení pro pět experimentů popsaných níže. Experimenty jsou navrženy tak, aby měřily šest komponent elektromagnetického pole v širokém oboru frekvencí, parametry plazmatu a tok elektronů. Všechny přístroje jsou napojeny a řízeny centrální jednotkou BANT.

- BANT (Processing module of the science payload) - přístrojové rozhraní mezi jednotlivými experimentálními zařízeními a palubní výpočetní jednotkou [M. Parrot et. al., 2006].
- IAP (Plasma Analyzer Instrument) - přístroj pro měření parametrů iontů v plazmatu. Hlavními úkoly je detekovat disturbance v ionosféře a poskytnout ionosférické parametry v dobrém časovém rozlišení (např. hustotu plazmatu, iontové složení plazmatu) [J. Bertheliera et. al., 2006].
- ICE (Electric field Instrument) - přístroj pro měření elektrostatických anebo elektromagnetických vln šířících se ionosférou (kap. 7.2).
- IDP (Particle spectrometr Instrument) - elektronový spektrometr s velkým geometrickým faktorem. Hlavním cílem přístroje je zkoumat energie elektronů z radiálních pásů [J. Sauvaud et. al., 2006].
- IMSC (Magnetometer Search-coil Instrument) - přístroj pro měření magnetického pole [M. Parrot et. al., 2006].
- ISL (Langmuir probe Instrument) - přístroj navržený na sondové měření objemových parametrů ionosférického termálního plazmatu [J. Lebreton et. al., 2006]

7.2 Přístroj ICE na družice DEMETER

Experiment ICE [J. Bertheliera et. al., 2006b] poskytuje přibližně kontinuální měření 3 komponent elektromagnetické anebo elektrostatické vlny. Měření provádí ve frekvenčním pásmu od stejnosměrného pole do 3.175 MHz.

V první řadě přístroj poskytuje pozorování elektromagnetických vln v širokém pásmu frekvencí, o kterých se předpokládá, že vznikají ve spojení se seismickou aktivitou. Dále přístroj studuje elektromagnetické emise způsobené lidskou činností a zkoumá možné efekty na energetické částice v magnetosféře. Experiment nabízí kompletní databázi přírodních emisí a vln v plazmatu, která budou sloužit k dalšímu zkoumání v oblasti kosmického počasí.

Měřené frekvenční pásmo je v jednotce pro zpracování signálu rozděleno do 4 kanálů - DC/ULF, ELF, VLF a HF. Samotný přístroj se skládá ze 4 sférických sond rozmístěných na ramenech o délce 4 metry (Obr.7.1). Geometrické uspořádání těchto senzorů dovoluje měřit 3 ortogonální složky pole. Dále jsou sondy zapojeny do předzesilovačů a jednotky pro zpracování signálu. Přístroj měří ve dvou základních

módech, v rychlém (tzv. BURST) a běžném (tzv. SURVEY).

Měřené frekvenční rozsahy:

- DC/ULF (Direct Current/Ultra Low Frequency) - frekvenční rozsah pásma 0 Hz–15 Hz
- ELF (Extreme Low Frequency) - frekvenční rozsah pásma 15 Hz–1 kHz
- VLF (Very Low Frequency) - frekvenční rozsah pásma 15 Hz–17.4 kHz
- HF (High Frequency) - frekvenční rozsah pásma 10 kHz–3.175 MHz

7.3 Úrovně zpracování dat

- Data Level 0 - změřená nekalibrovaná experimentální data, hodnoty jsou uloženy v měřených jednotkách (např. napětí).
- Data Level 1 - data jsou zkalibrována, převedena do fyzikálních jednotek a uložena do datových souborů.
- Data Level 2 - odpovídá obrázkům generovaným z dat úrovně 2.
- Quick Looks - obrázky generované v řídicím středisku s pevným výběrem přístrojů a malým časovým rozlišením.

Kapitola 8

Studium HF stop z měření družice DEMETER

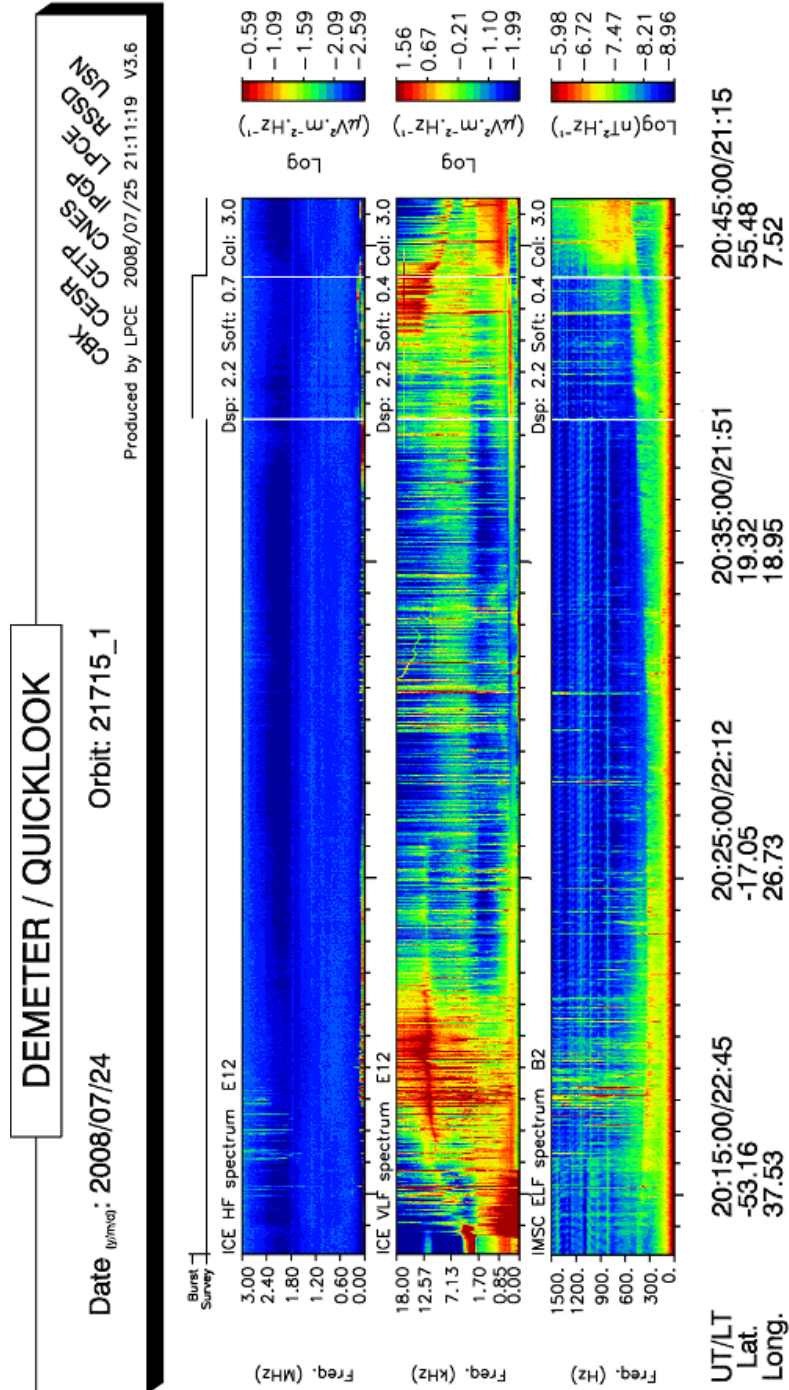
Analýza již naměřených dat z družice DEMETER nám poskytuje cenné informace o jevech, které se budou následně studovat pomocí připravované družice TARANIS. Horní rozsah vysokofrekvenčního vlnového přístroje ICE na satelitu DEMETER je sice ve spodní části rozsahu připravovaného vlnového přístroje IME-HF, to ale nebrání pozorování shodných jevů. Data získaná při analýze těchto pulzů budou použita při návrhu a nastavení přístroje IME-HF.

8.1 Použitá data z družice DEMETER

Pro tuto práci jsme používali data dostupná přes webové rozhraní družice DEMETER a data z FTP (<ftp://demeter.lpce-cnrs.fr>). Předně jsme pro první předběžné výběry využívali zpracovaných QuickLooků. Pro další analýzy jsme používali výkonová spektra přístroje ICE v pásmu HF. Spektra jsou počítána přímo na družici a průměrována přes 2,048 s. Tato data jsou dostupná v obou měřících módech přístroje. Dále jsme používali měření vlnové formy v pásmu HF. Vlnové formy byly dostupné pouze v BURST módu o délce 0,6 ms, každých 2,048 s se vzorkovací frekvencí 6,666 MHz.

Příklad výřezu používaného QuickLooku s popisem pro panel HF (obr. 8.1):

- indikátor použité komponenty je uveden v levém horním rohu panelu (E12 v příkladu)
- verze použitého palubního softwaru, verze software pro pozemní zpracování a verze kalibračního souboru pro ICE HF jsou uvedeny v horní části a v horní pravé části (DSP: 2.2, Soft: 0.6, Cal: 2.1 v uvedeném příkladu);
- interval frekvencí [3,5 kHz – 3007 kHz] pokrytý 77 frekvenčními komponentami
- frekvenční rozlišení: 39,06 kHz (průměrované přes 12 frekvenčních komponent)



- časové rozlišení: 2,048 s;
- jednotka výkonu: $\log(\mu\text{V}^2\text{m}^{-2}\text{Hz}^{-1})$;

8.2 Zpracování dat

Nejprve bylo nutné provést základní identifikaci hledaných vysokofrekvenčních pulzů (dále již HF pulzů). Tato prvotní selekce byla provedena na tzv. QuickLookách. Základním kritériem tohoto výběru bylo, aby intenzita elektrického výkonu pulzu v oboru HF byla okem rozlišitelná od intenzity pozadí. Nebyly také vybírány ty pulzy, které byly v měřeném frekvenčním rozsahu izolované, tzn. nešířily se typicky nad horní rozsah přístroje (3,175 MHz). Tímto prvotním výběrem bylo za období od ledna 2005 až do prosince 2008 vybráno 257 událostí. Příklady vybraných dat jsou uvedeny na obrázku 8.2, uvedeny jsou pouze panely s HF komponentou elektrického pole.

Pro všechny vybrané události byl vytvořen seznam, do kterého byly zapsány: přibližný světový čas události, číslo orbity družice, geografická poloha družice, lokální čas a poznámka, zda jsou data v běžném (survey) nebo rychlém (burst) měřícím módu.

Pro účely následného zpracování těchto získaných údajů byl vytvořen program na čtení dat Level 1. Před samotným načítáním bylo nutné nastudovat strukturu ukládání požadovaných dat [D. Lagoutte et. al., 2005]. Program následně procházel adresář se staženými L1 datovými soubory a podle seznamu nalezených časů vykresloval HF spektra elektrické komponenty. Vykreslen byl vždy interval ± 30 s okolo přibližného času události. Spektra jsou počítána na družici a průměrována přes 2,048 s.

Po vykreslení spekter pro všechny nalezené události bylo nutné stanovit kritéria na přesné určení HF pulzu.

Stanovená kritéria jsou:

- úroveň intenzity výkonu pulzu musí být nejméně o 1/2 řádu větší než intenzita pozadí.
- strmost růstu pulzů musí být $> 10 \text{ dB MHz}^{-1}$.
- samotný pulz nesmí být izolovaný v měřícím rozsahu přístroje.

Ukázku vykreslených spekter je možné vidět na obrázku 8.3. Na obrázku 8.4 jsou uvedeny příklady spekter, která požadovaná kritéria nesplňovala.

Podle kritérií bylo z celkového počtu 257 událostí vybráno 145 událostí v běžném a 22 událostí v rychlém měřícím módu. Pro všechny události byly nalezeny podrobné informace o poloze a výšce družice. Dále hodnoty profilu elektronové koncentrace z modelu IRI (kap. 2.2), hodnoty celkového geomagnetického pole z modelu IGRF (kap. 2.3) a nakonec byla určena experimentální hodnota ořezu pulzů z výkonových spekter. Experimentální hodnota frekvence ořezu byla stanovována prostým pohledem, a to je známka punktu! Frekvence ořezání byla stanovena na

počátku výkonového nárůstu pulzu. Z hodnot elektronové koncentrace a geomagnetického pole byla vypočítána teoretická hodnota pro ořezání vln v L-módu a plazmová frekvence. Tyto frekvence byly spočítány s přesností 10 kHz. Příklad takto zpracovaných spekter je na obrázku 8.5. Na ose x je frekvence v MHz, na ose y je spektrální hustota výkonu. Tři vertikální čárkované čáry odpovídají experimentálně stanovené frekvenci ořezu (žlutá), teoreticky vypočtené frekvenci ořezání L-módu (červená) a plazmové frekvenci (modrá).

8.3 Výsledky

Všechny získané údaje byly zapsány do tabulky pro možné další zpracování. Na obrázku 8.6 je zobrazena geografická distribuce nalezených pulzů. Dále bylo provedeno srovnání experimentálně nalezeného ořezání s teoreticky vypočtenou hodnotou a hodnotou plazmové frekvence. Tyto závislosti jsou vyneseny do histogramů na obrázku 8.7. Na ose y je počet událostí a na ose x je a) rozdíl frekvencí experimentálně nalezeného ořezu pulzu a teoreticky vypočteného ořezu L-módu v MHz, b) rozdíl frekvence ořezu experimentálně nalezeného pulzu a plazmové frekvence v MHz. Jednotlivé histogramy jsou barevně odlišeny pro jednotlivé sklony růstu ořezání pulzu, černá barva $> 10 \text{ dB MHz}^{-1}$, modrá barva $> 20 \text{ dB MHz}^{-1}$ a zelená barva $> 30 \text{ dB MHz}^{-1}$.

8.4 Případové studie

V tomto oddíle si ukážeme dvě události, které byly pozorovány v rychlém měřicím módu družice. V tomto módu je dostupná vlnová forma vysokofrekvenční elektrické komponenty, a to v délce 0,6 ms po každých 2,048 s. Vytvořeným programem jsme tyto vlnové formy načítali a zpracovávali do formy časově-frekvenčních výkonových spektrogramů. Na těchto spektrogramech jsme v časech pozorovaných pulzů hledali stopy typické pro TIPPů (viz. kap. 4.2). Nejlepší nalezené záznamy jsou ve dvou případových studiích popsanych níže. Následně byla pro tyto dvě události provedena analýza metodou aproximace rovinnou vlnou [F. Němec, 2006]. Tato analýza byla prováděna z důvodu hledání vln v hvizdovém módu, které by v čase pozorované události identifikovaly bleskový výboj, který je zdrojem pulzů.

8.4.1 2005-08-02 19:50:52.951

Kompletní zjišťované údaje pro pozorovanou událost:

- Světový čas: 2005-08-02 19:50:52.951
- Geografická šířka: -42°
- Geografická délka: 44°
- Lokální čas: 22,75

- Výška družice: 719 km
- Plazmová frekvence: 2,500 MHz
- Vypočtená frekvence L=0: 2,111 MHz
- Pozorovaná frekvence ořezání pulzu: 2,100 MHz

Na obrázku 8.8 je zobrazeno výkonové spektrum pro studovanou událost. Čárkovanými vertikálními čarami jsou vyznačeny jednotlivé význačné frekvence. Na obrázku 8.9 je zobrazen výkonový spektrogram. Na tomto spektrogramu je červenou šipkou vyznačena stopa odpovídající trans-ionosférickému párovému pulzu. Vlnová analýza nízkofrekvenčních komponent s popisem jednotlivých panelů je zobrazena na obrázku 8.10.

8.4.2 2007-05-29 21:01:09.844

Na obrázku 8.11 je zobrazeno výkonové spektrum pro studovanou událost. Čárkovanými vertikálními čarami jsou vyznačeny jednotlivé význačné frekvence. Na obrázku 8.12 je zobrazen výkonový spektrogram. Na tomto spektrogramu je červenou šipkou vyznačena stopa odpovídající trans-ionosférickému párovému pulzu. Vlnová analýza nízkofrekvenčních komponent s popisem jednotlivých panelů je zobrazena na obrázku 8.13.

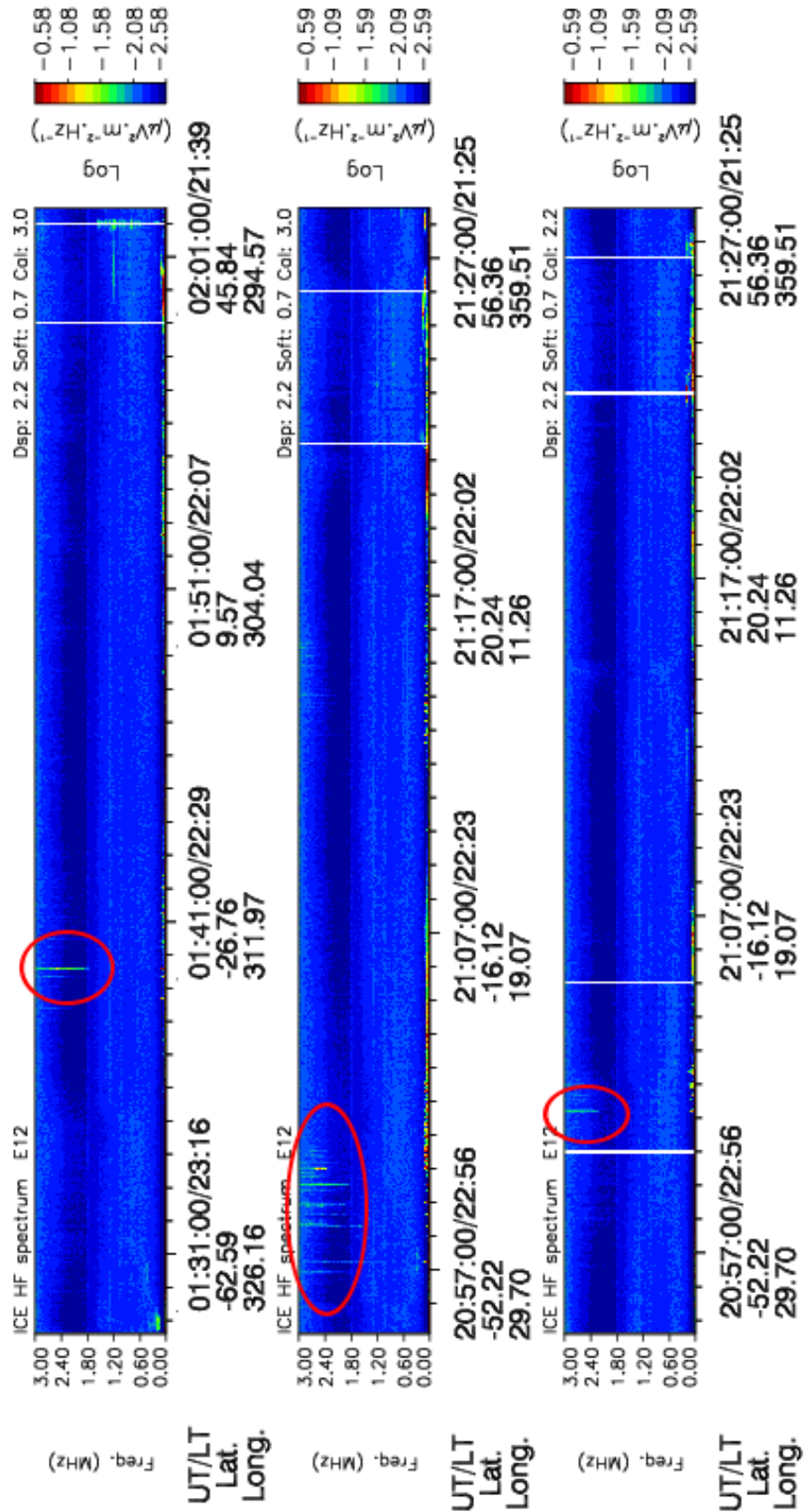
- Světový čas: 2007-05-29 21:01:09.844
- Geografická šířka: -37°
- Geografická délka: 24°
- Lokální čas: 22,64
- Výška družice: 720 km
- Plazmová frekvence: 2,530 MHz
- Vypočtená frekvence L=0: 2,212 MHz
- Pozorovaná frekvence ořezání pulzu: 2,150 MHz

8.5 Diskuze

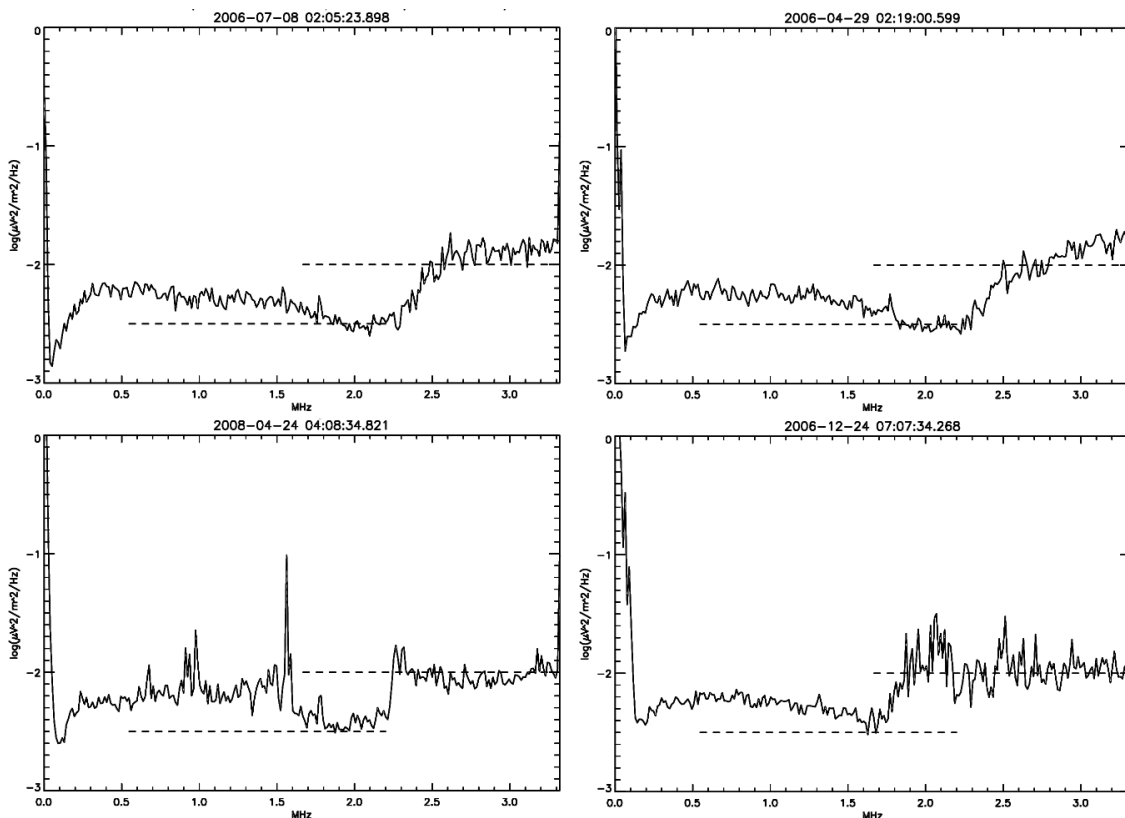
Nalezli a rozpoznali jsme vysokofrekvenční pulzy v měřeních družice DEMETER. Ořezání těchto pulzů bylo srovnáno s teoreticky vypočtenou hodnotou ořezání elektromagnetických vln v L-módu a plazmovou frekvencí. Tyto pulzy byly výhradně pozorovány v lokálních nočních hodinách, což je důsledkem nižší elektronové koncentrace v oblasti šíření vln, a tudíž nižších frekvencí ořezu. Histogram 8.7b) ukazuje, že ořezání těchto pulzů nesouvisí s plazmovou frekvencí, tzn. většina pozorovaných

pulzů se vyskytovala pod její hodnotou. Z histogramu 8.7a) je patrná souvislost ořezání pulzů s hodnotou ořezání L-módu. Posun píku histogramu a hodnoty v záporné oblasti odpovídají tomu, že je zde mnoho pozorovaných pulzů pod teoreticky spočtenou hodnotou. Tuto skutečnost můžeme vysvětlit nepřesným stanovením experimentální frekvence ořezu. Další vysvětlení určité nepřesnosti je na obrázku 8.14. Zde je zobrazena velikost oblasti, na kterou má družice přímou viditelnost. Tento fakt způsobí, že zdroj pulzů nemusí ležet přímo v oblasti svisle pod družicí. Všechny teoreticky počítané frekvence odpovídají šíření od zdroje, který leží přímo pod družicí. Ve skutečnosti dané body na obrázku 8.6 neodpovídají zdroji události, ale pozici družice při její detekci. To dále vysvětluje, proč je většina událostí nad oceány, zatímco většina bleskových výbojů se nachází nad pevninami (viz. kap. 3.3).

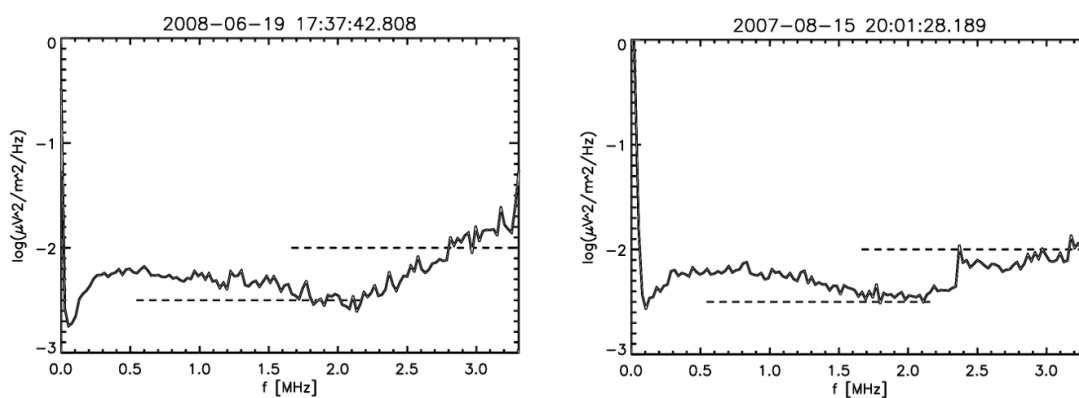
V následující práci bude nutné provést ještě zpřesnění určení ořezu pulzu a vykreslení závislosti rozdílu frekvencí na geomagnetické pozici. Následně bude dobré provést případovou studii, v které se budeme snažit najít takovou pozici zdroje pulzu, pro kterou by byly vypočtené hodnoty dostatečně blízko těm experimentálním.



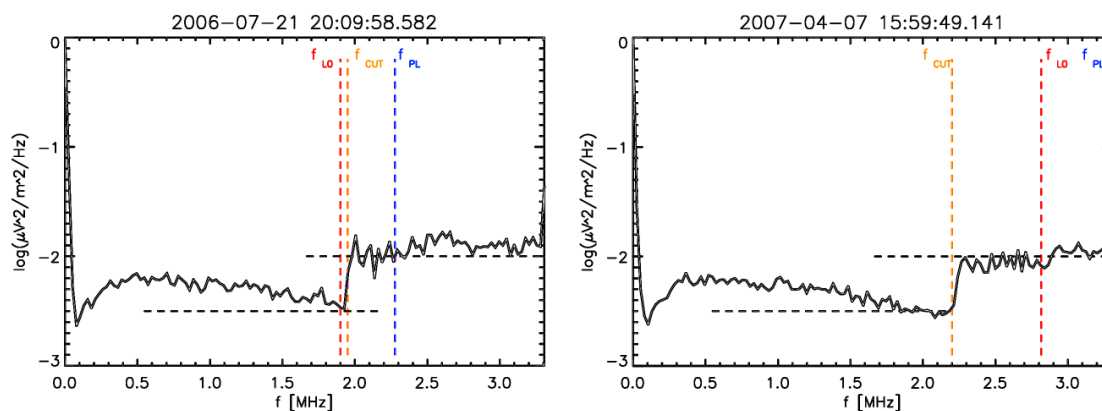
Obrázek 8.2: Příklady HF panelů procházených QuickLooků.



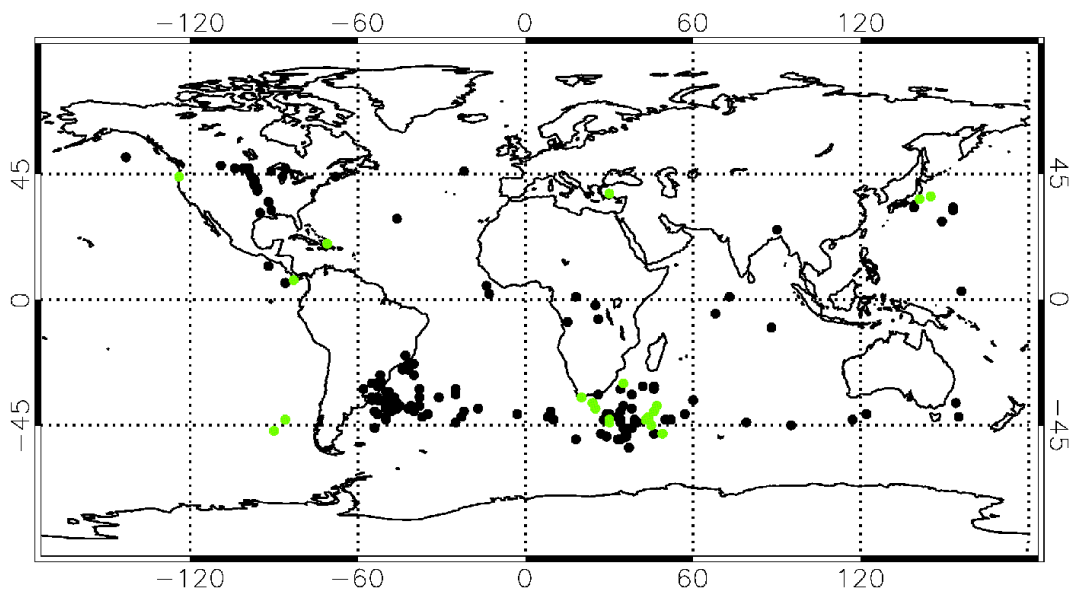
Obrázek 8.3: Příklady vybraných výkonových spekter. Na ose x je frekvence v MHz, na ose y spektrální hustota elektrického výkonu. Horizontální čárkované čáry jsou vodítkem pro oči a představují výkonový rozdíl 1/2 řádu.



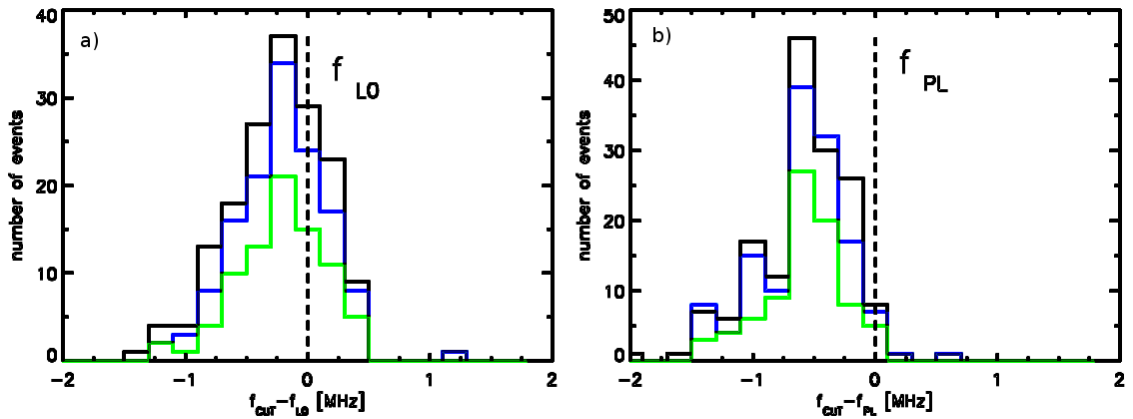
Obrázek 8.4: Příklady výkonových spekter, která nesplňovala nastavená kritéria. Na ose x je frekvence v MHz, na ose y spektrální hustota elektrického výkonu. Horizontální čárkované čáry jsou vodítkem pro oči a představují výkonový rozdíl 1/2 řádu.



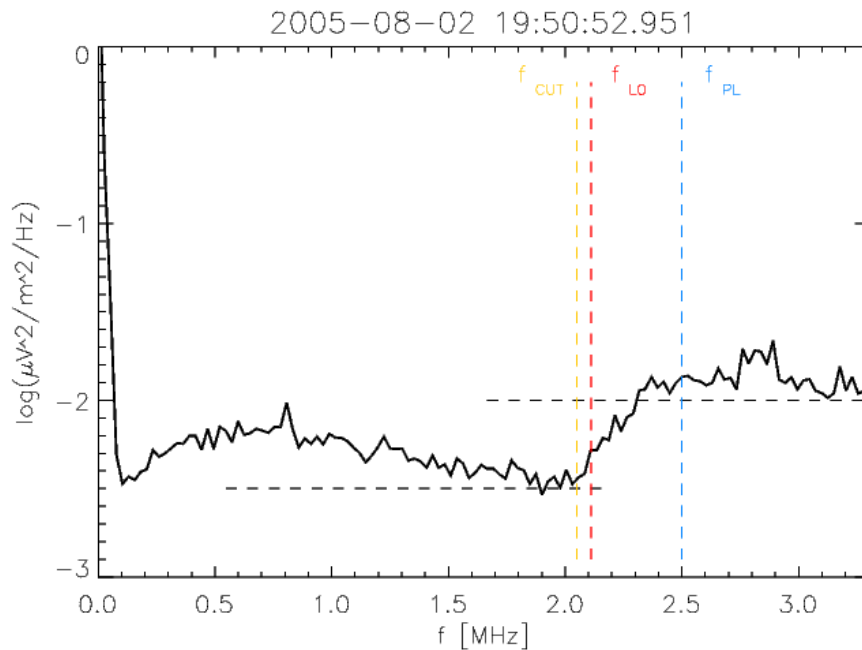
Obrázek 8.5: Příklady zpracovaných výkonových spekter. Na ose x je frekvence v MHz, na ose y spektrální hustota elektrického výkonu. Horizontální čárkované čáry jsou vodítkem pro oči a představují výkonový rozdíl 1/2 řádu. Tři vertikální čárkované čáry odpovídají experimentálně stanovené frekvenci ořezu (žlutá), teoreticky vypočtené frekvenci ořezání L-módu (červená) a plazmové frekvenci (modrá).



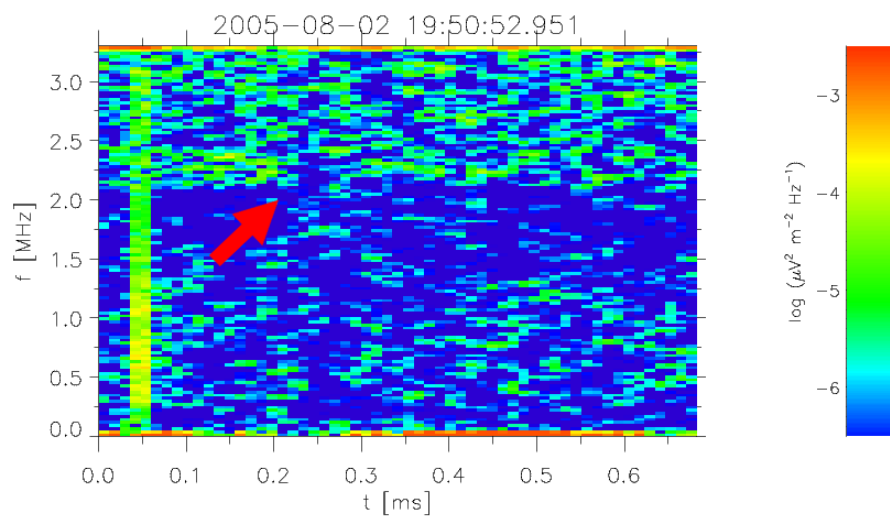
Obrázek 8.6: Mapa geografické distribuce pozorovaných HF pulzů. Černé symboly značí události pozorované v běžném a zelené v rychlém měřícím módu.



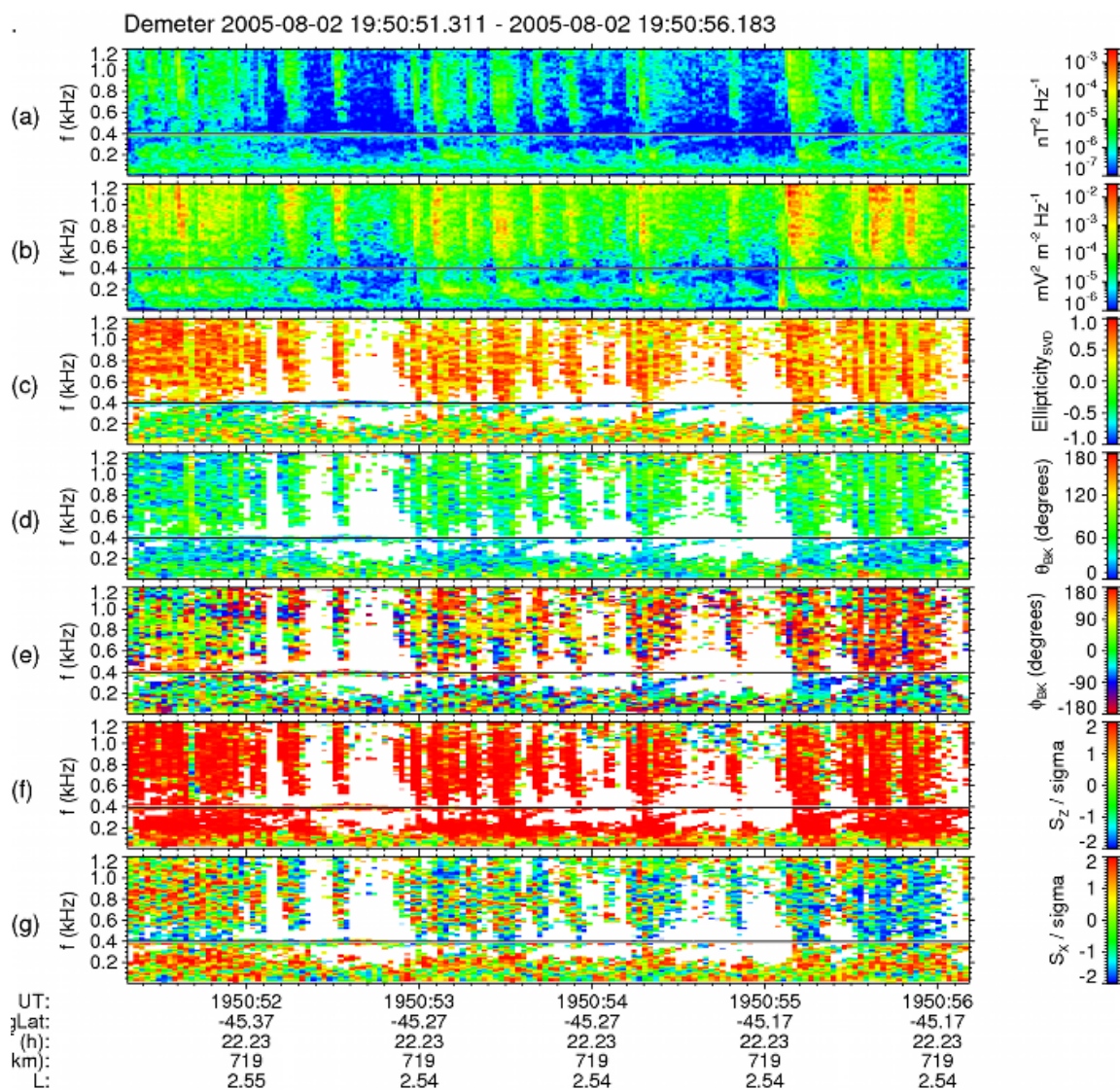
Obrázek 8.7: Histogramy rozdílů frekvencí mezi hodnotou experimentálně nalezenou a (a) teoreticky vypočtenou hodnotou ořezu, (b) hodnotou plazmové frekvence. Jednotlivé sklony růstu ořezání pulzu jsou barevně rozlišeny: černá barva $> 10 \text{ dB MHz}^{-1}$, modrá barva $> 20 \text{ dB MHz}^{-1}$ a zelená barva $> 30 \text{ dB MHz}^{-1}$.



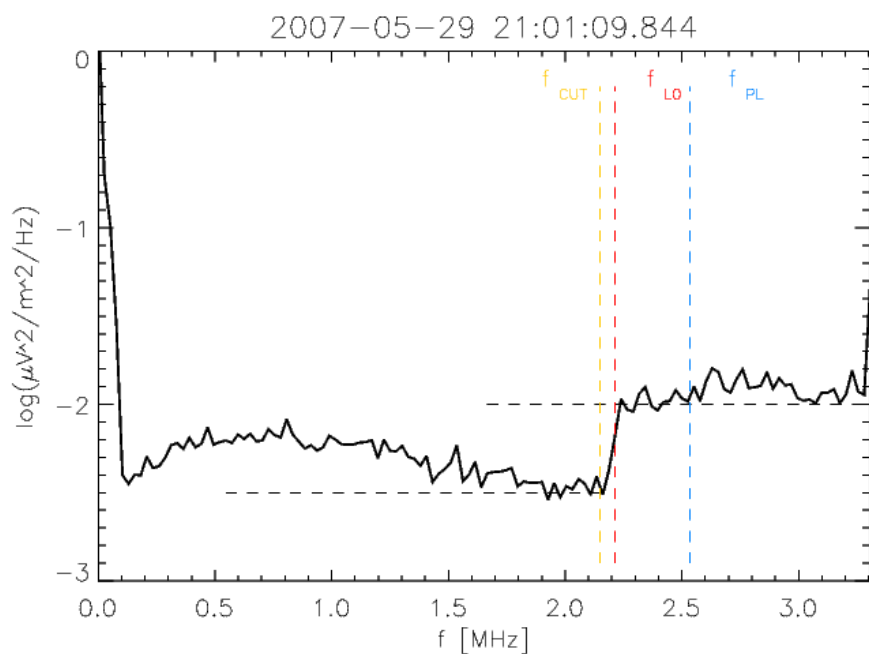
Obrázek 8.8: Výkonové spektrum HF elektrické komponenty pro studovanou událost.



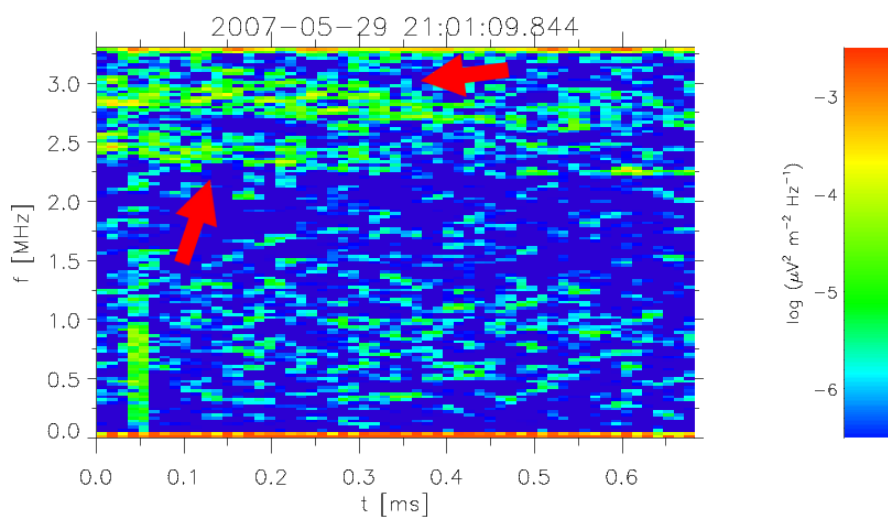
Obrázek 8.9: Výkonový spektrogram získaný z vlnové formy. Červená šipky ukazuje na stopu trans-ionosférických párových pulzů.



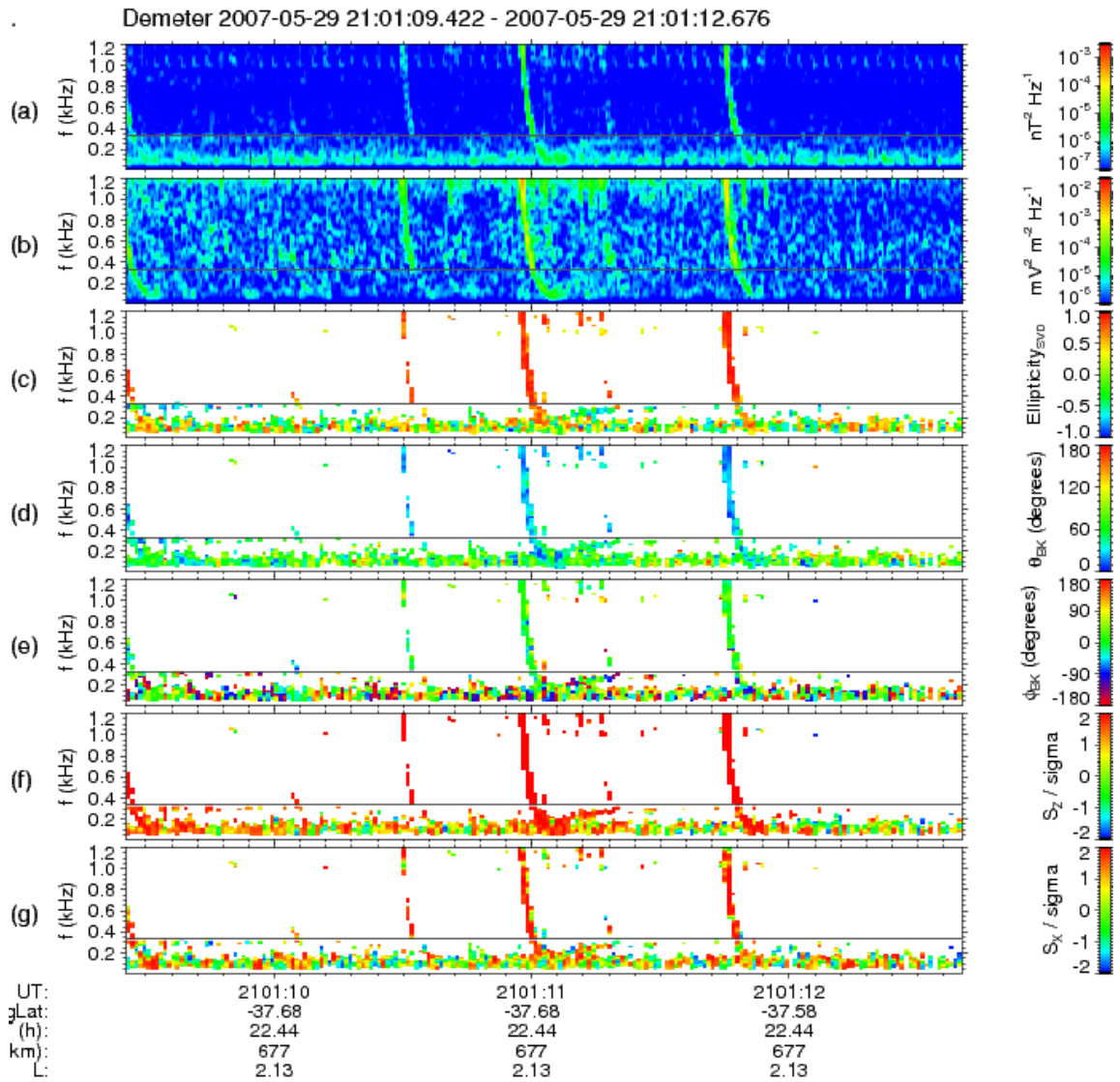
Obrázek 8.10: Analýza rovinné vlny pro vybraný časový interval. Popis jednotlivých panelů shora dolů: (a) výkonový spektrogram magnetického pole, (b) výkonový spektrogram elektrického pole, (c) elipticita, (d) polární úhel vlnového vektoru, (e) azimutální úhel vlnového vektoru ϕ , (f) paralelní komponenta Poyntingova vektoru S_z normalizovaná její standardní odchylkou a (g) kolmá komponenta Poyntingova vektoru S_x podél osy x , ležící v rovníkové rovině. Černé horizontální čáry odpovídají měřené protonové cyklotronové frekvenci. Osobní sdělení Doc. O. Santolík



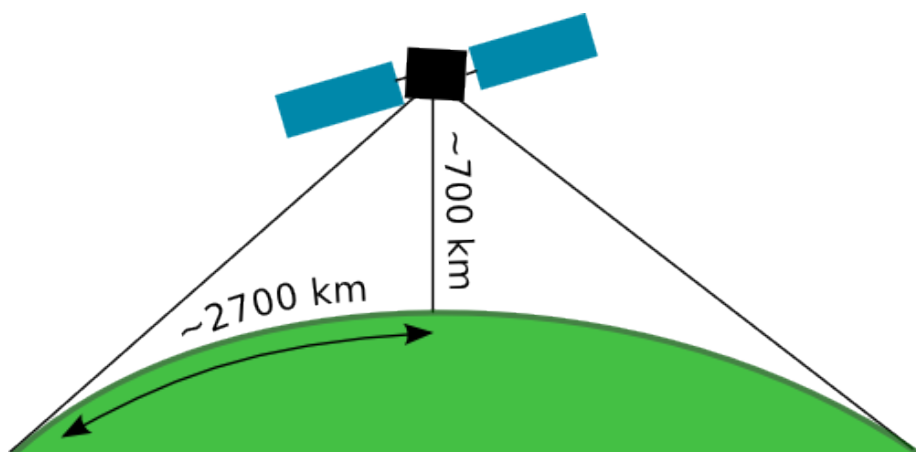
Obrázek 8.11: Výkonové spektrum HF elektrické komponenty pro studovanou událost.



Obrázek 8.12: Výkonový spektrogram získaný z vlnové formy. Červené šipky ukazují na stopy trans-ionosférických párových pulzů.



Obrázek 8.13: Analýza rovinné vlny pro vybraný časový interval. Popis jednotlivých panelů shora dolů: (a) výkonový spektrogram magnetického pole, (b) výkonový spektrogram elektrického pole, (c) elipticita, (d) polární úhel vlnového vektoru, (e) azimutální úhel vlnového vektoru ϕ , (f) paralelní komponenta Poyntingova vektoru S_z normalizovaná její standardní odchylkou a (g) kolmá komponenta Poyntingova vektoru S_x podél osy x , ležící v rovníkové rovině. Černé horizontální čáry odpovídají měřením protonové cyklotronové frekvence. Osobní sdělení, O. Santolík



Obrázek 8.14: Nákres oblasti, kterou může pozorovat družice přímo.

Kapitola 9

Simulace detekčního algoritmu pro IME-HF

V této části bude představena simulace funkčnosti vnitřního výběrového algoritmu pro připravovaný vlnový přístroj IME-HF. Všechny vyjmenované programy byly vytvořeny v interakčním programovacím jazyce IDL. Simulace je zaměřena na detekci času příchodu signálů. Provedeny byly simulace pro tři různé časy příchodu signálů, pro širokopásmový pulz a pro signál na jedné frekvenci.

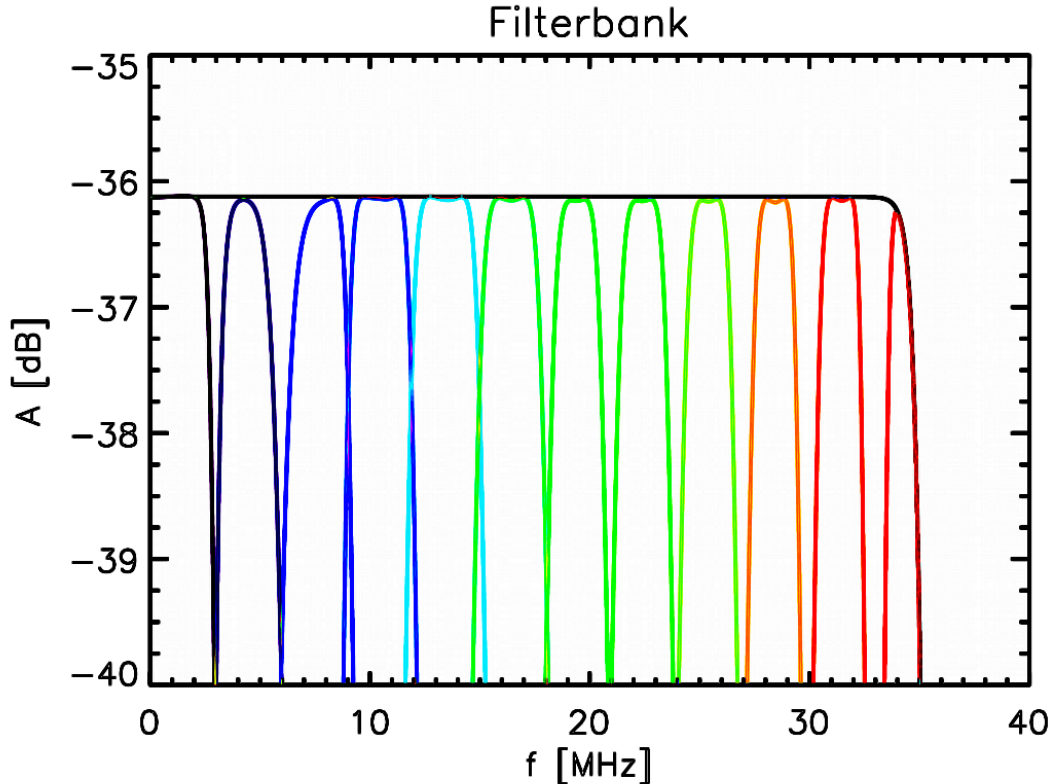
9.1 Vstupní vlnová forma

Vstupní vlnové formy pro TIPPs, použité v simulacích, byly získány od J. Chuma (ÚFA AV ČR). Jedná se o širokopásmový pulz generovaný bleskovým výbojem. Pro tento pulz je poté spočítáno grupové zpoždění jednotlivých frekvencí typických pro šíření signálu ionosférou (kap. 2.4). Dále je na signál superponován šum a signál vysílače (20 MHz). Časově-frekvenční spektrogram výkonové hustoty vstupního signálu je přiložen pro každý simulovaný případ. Na spektrogramech jsou typické dva páry pulzů (kap. 4.2). První pár odpovídá řádnému a mimořádnému módu přímého signálu od blesku. Druhý pár pulzu odpovídá signálu prvního pulzu odraženého od zemského povrchu. Signál je opět v obou vlnových módech. Dalším testovaným signálem byl širokopásmový pulz. Posledním zpracovávaným signálem byl monofrekvenční sinusový signál.

9.2 Analogové filtry

V první fázi testování bylo nutné sestavit a nasimulovat funkci analogových filtrů. Parametry filtrů byly získány od J. Chuma a jejich hodnoty jsou uvedeny v kap. 6.2.1. Jedná se o pasivní analogové filtry vysokých řádů (9. a 10. řádu). Až na antialiasingový a první filtr, což jsou dolní propusti, jde o pásmové propusti sestavené z horní a dolní propusti. Koefficienty navržených filtrů byly získány z webové stránky (<http://www-users.cs.york.ac.uk/fisher/mkfilter/>). Po sestavení programu na počítání těchto filtrů byl proveden test na impulzní odezvu. Výsledek tohoto

testu je na obrázku 9.1, na ose x je frekvence a na ose y je přenos v decibelech. Tento obrázek je kvalitativně shodný s obrázkem 6.3, kde ale byla funkčnost filtrů prováděna měřením reálného prototypu. Důvodem použití pasivních filtrů vysokých řádů místo digitálních filtrů je omezený příkon pro celý přístroj.



Obrázek 9.1: Přenosové charakteristiky jednotlivých filtrů. Přenos všech filtrů byl nastaven stejně, což nebude odpovídat reálnému stavu, kdy budou přenosy různé.

9.3 Simulace detekčního algoritmu

Sestavili jsme program, který zpracovával vstupní vlnové formy se vzorkovací frekvencí 80 MHz. Následně byl signál rozdělen přes sadu filtrů do 12 kanálů. Na jednotlivé kanály byly aplikovány logaritmické zesilovače s časovou konstantou $\tau = 4 \mu\text{s}$. Na výstupu tohoto stupně byla na každém kanálu zlogaritmovaná efektivní hodnota vstupujícího signálu. Následně je každý kanál převzorkován na frekvenci 83.3 kHz, což odpovídá pracovní frekvenci analogově-digitálního převodníku před vstupem do FPGA. Následně byla na každém kroku spočtena průměrná hodnota přes celou vlnovou formu. Tento krok se liší od skutečnosti tím, že bude brán dlouhý předešlý časový průměr. Tento fakt ale má na naše testování jen kvantitativní vliv. Poté jsou nastaveny parametry výběrového algoritmu: **Malg** - délka rámce, přes který se počítají

průměry (pokud $M_{alg} = -1$ bral se průměr z celého signálu), N_{alg} - délka rámce, na kterém se hledají maxima, a \mathbf{fw} - váhy jednotlivých kanálů. Samotný detekční algoritmus poté postupuje podle návrhu popsaného v kapitole 6.2.2. V každém kroku běhu algoritmu je zaznamenána hodnota sumy R. Po skončení běhu programu je zobrazen získaný čas detekce hledané události, hodnota sumy RM. Následně je vykreslen histogram časového průběhu sumy R.

9.4 Výsledky simulací

Provedli jsme simulace detekce pro čtyři případy. V prvních dvou případech byla vstupním signálem vlnová forma od namodelovaných TIPPů. V dalších dvou případech byly testovány širokopásmový pulz a sinusový signál o jedné frekvenci (20 MHz).

Na obrázku 9.2 jsou výsledky detekce prvního simulovaného TIPPu. Příchod prvního z dvojice TIPPů na přijímač je v čase $t \sim 160 \mu s$. Ve vrchní části obrázku je výkonový spektrogram vstupního signálu. Jednotlivé panely a) - d) odpovídají různým parametrům vyhledávacího algoritmu. Pro testované případy a),c),d) se průměry počítaly z celé délky signálu. Pro případ b) se počítaly průměry přes dvojnásobek vyhledávacího rámce. Parametry a časy detekce pro jednotlivé panely:

- a) $M_{alg}=-1$, $N_{alg}=16$, $w=[0,0,2,5,8,10,10,10,10,10,10,10]$,
čas detekce = $192 \mu s$
- b) $M_{alg}= 8$, $N_{alg}=4$, $w=[0,0,2,5,8,10,10,10,10,10,10,10]$,
čas detekce = $192 \mu s$
- c) $M_{alg}=-1$, $N_{alg}=8$, $w=[0,0,2,5,8,10,10,10,10,10,10,10]$,
čas detekce = $192 \mu s$
- d) $M_{alg}=-1$, $N_{alg}=16$, $w=[0,0,2,5,8,10,10,10,10,10,10,10]$,
čas detekce = $288 \mu s$

Na obrázku 9.3 jsou výsledky detekce prvního simulovaného TIPPu. Čas příchodu pulzů je $t \sim 360 \mu s$. Ve vrchní části je výkonový spektrogram vstupního signálu. Jednotlivé panely a) - d) odpovídají různým parametrům vyhledávacího algoritmu. Pro testované případy a),b),d) se průměry počítaly z celé délky signálu. Pro případ c) se průměry počítaly přes dvojnásobek vyhledávacího rámce. Parametry a časy detekce pro jednotlivé panely:

- a) $M_{alg}=-1$, $N_{alg}=16$, $w=[0,0,2,5,8,10,10,10,10,10,10,10]$,
čas detekce = $384 \mu s$
- b) $M_{alg}=-1$, $N_{alg}=8$, $w=[0,0,2,5,8,10,10,10,10,10,10,10]$,
čas detekce = $384 \mu s$
- c) $M_{alg}=16$, $N_{alg}=8$, $w=[0,0,2,5,8,10,10,10,10,10,10,10]$,
čas detekce = $384 \mu s$

- d) $M_{alg}=-1$, $N_{alg}=16$, $w=[0,0,2,5,80,150,100,10,10,10,10,10]$,
čas detekce = 576 μs

Třetím případem byla detekce širokopásmového pulzu, který měl čas příchodu $t = 1152 \mu s$ délku trvání $\tau = 10 \mu s$. Výsledek je zobrazen na obrázku 9.4. Parametry a časy detekce pro jednotlivé panely:

- a) $M_{alg}=-1$, $N_{alg}=16$, $w=[0,0,2,5,8,10,10,10,10,10,10,10]$,
čas detekce = 1152 μs
- b) $M_{alg}=32$, $N_{alg}=16$, $w=[0,0,2,5,8,10,10,10,10,10,10,10]$,
čas detekce = 1152 μs
- c) $M_{alg}=32$, $N_{alg}=8$, $w=[0,0,2,5,8,10,10,10,10,10,10,10]$,
čas detekce = 1200 μs
- d) $M_{alg}=-1$, $N_{alg}=16$, $w=[0,0,2,5,0,10,0,10,0,10,0,10]$,
čas detekce = 1152 μs

Čtvrtým testovaným případem byl sinusový signál o frekvenci 20 MHz. Testována byla hlavně detekce příchodu hrany tohoto signálu. Čas příchodu tohoto signálu byl $t = 3125 \mu s$. Parametry a časy detekce pro jednotlivé panely:

- a) $M_{alg}=-1$, $N_{alg}=32$, $w=[0,0,2,5,8,10,10,10,10,10,10,10]$,
čas detekce=4224 μs
- b) $M_{alg}= 32$, $N_{alg}=16$, $w=[0,0,2,5,8,10,10,10,10,10,10,10]$,
čas detekce = 3168 μs
- c) $M_{alg}= 32$, $N_{alg}=16$, $w=[0,0,0,0,0,0,10,0,0,0,0,0]$,
čas detekce = 3168 μs
- d) $M_{alg}= 32$, $N_{alg}=16$, $w=[0,0,2,5,8,0,0,10,10,10,10,10]$,
čas detekce = 3168 μs

9.5 Diskuze

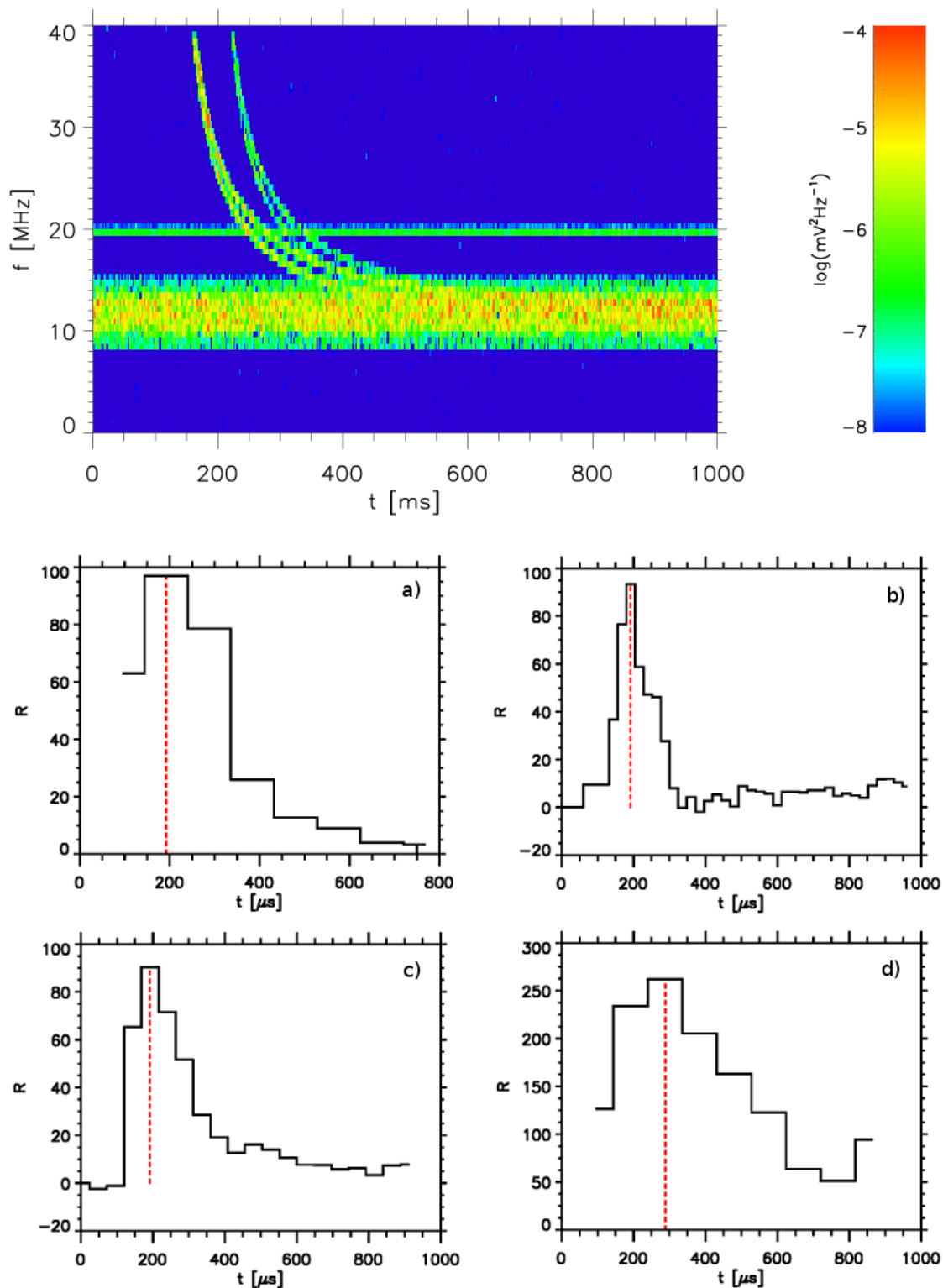
V prvním testovaném signálu 9.2 byl příchod prvního pulzu na $t \sim 180 \mu s$. V první třech nastavení algoritmu byly rozdílné pouze délky vyhledávacího rámce a rámce pro počítání průměru. Příchozí signál byl vždy detekován v $t = 192 \mu s$. V posledním případě 9.2d) se změnila váhy jednotlivých kanálů tak, že nižší frekvenční kanály mají vyšší váhu. To způsobí, že se čas detekce posunul na $t = 384 \mu s$.

Druhý testovaný signál měl příchod první pulzu v čase $t \sim 350 \mu s$. Na prvních třech panelech a) - c) jsou opět různá nastavení délky vyhledávacího rámce a rámce pro průměr. Časy detekce byly shodné a to $t = 384 \mu s$. V poslední případě d) byly zvýšeny váhy nižších kanálů, to způsobí, že čas detekce se posunul na $t = 596 \mu s$.

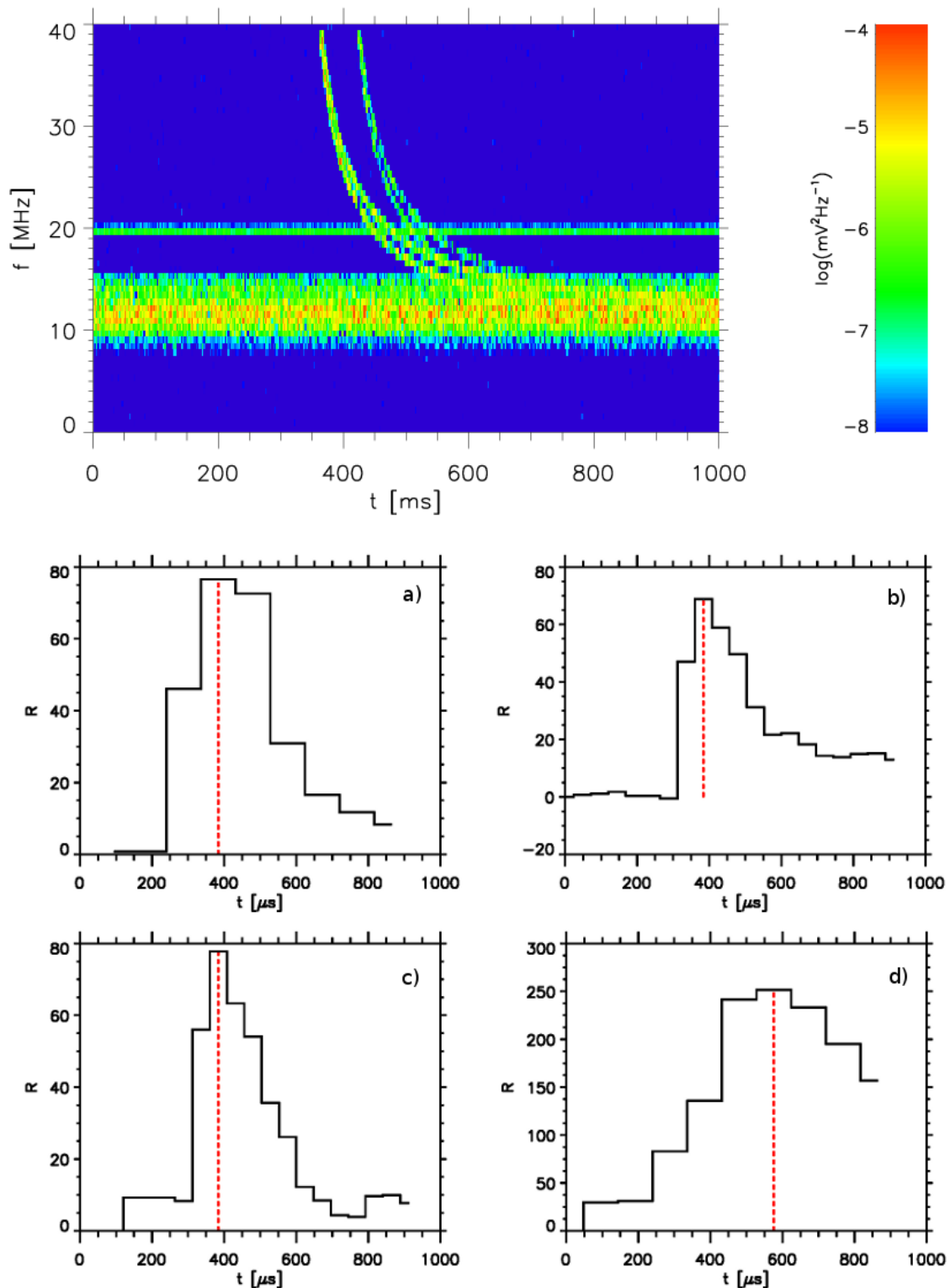
Třetím testovaným signálem byl širokopásmový pulz bez přidaného šumu. Tento signál měl čas příchodu $t = 1152 \mu\text{s}$. Časy příchodů signálu byly prakticky ve všech nastaveních parametrů shodně detekovány 9.4. Právě velmi dobrá detekce impulzních signálů může způsobit vyhodnocení špatného časového rámce.

Posledním testovaným signálem byl sinusový signál o frekvenci 20 MHz. Vkládaný signál byl čistý sinusový bez simulací šumu. Na analýze tohoto signálu, šlo předně o detekci hrany příchodu signálu. Problémem detekce těchto signálů byl dlouhý časový krok pro počítání průměru. To způsobovalo vytvoření takového plata v oblasti maximálních hodnot detekční sumy R a každá menší fluktuace způsobila posunutí vyhodnoceného času detekce 9.5a. Časový krok pro počítání průměru byl tedy zkrácen na dvojnásobek vyhledávacího rámce. V dalších případech 9.5b–d došlo již k dobré časové detekci. Příklad 9.5b ukazuje optimální nastavení pro detekci takovýchto signálů. V případech 9.5c,d byl předveden vliv vah pro jednotlivé frekvenční kanály, kde jsou patrné rozdílné hodnoty maxim sumy R . Signály s podobným průběhem budou moci sloužit jako řídicí signály pro synchronizaci přístrojů.

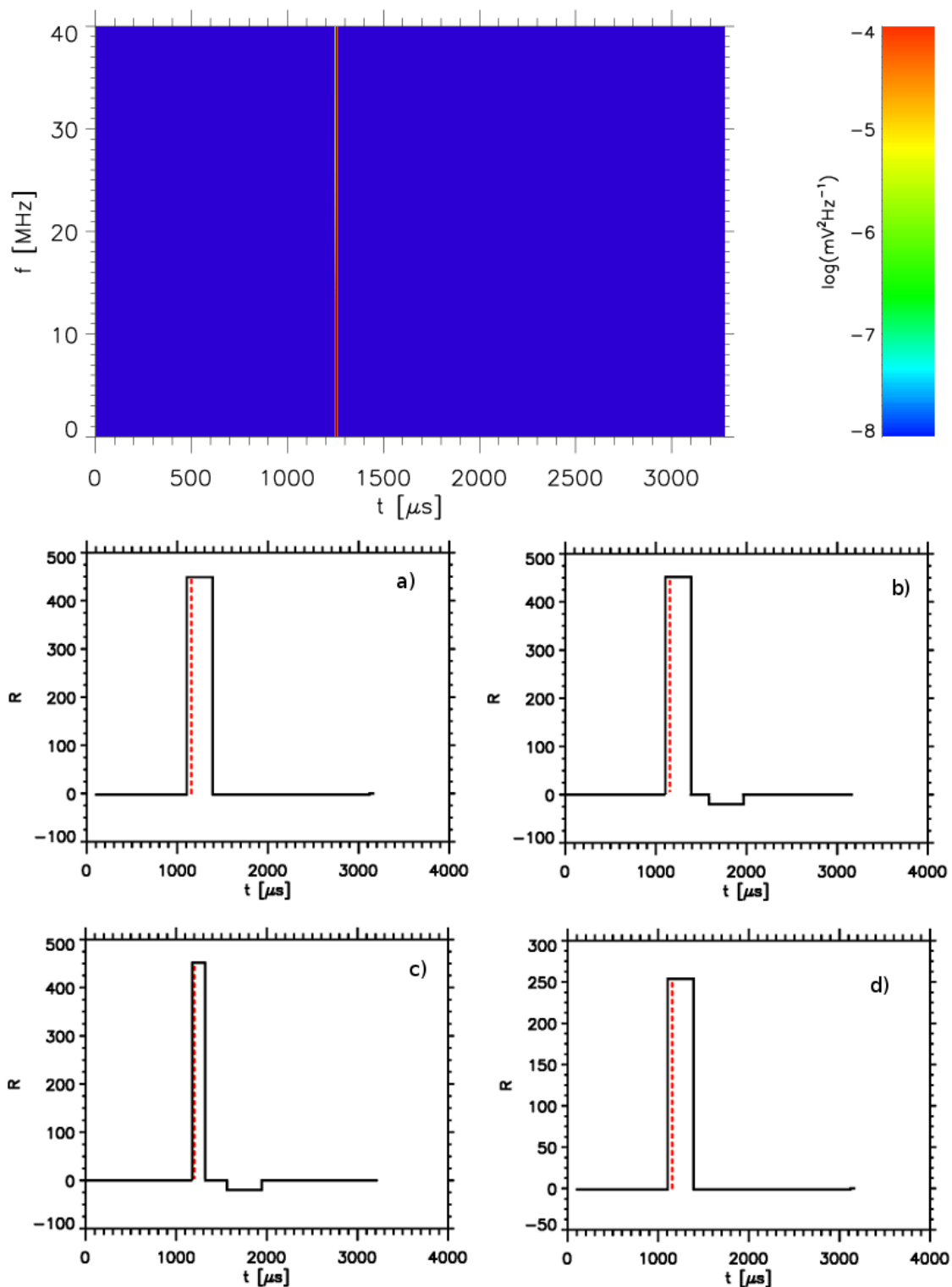
V další analýze bude dobré ještě provést testy na detekci signálů s různými úrovněmi šumu, které bude co nejvíce odpovídat očekávanému měření. Dále provést simulace detekce TIPPs pro různé vlastnosti prostředí, kterým se signál šíří. K tomu nám mohou sloužit data získaná z analýzy měření družice DEMETER (kap. 8).



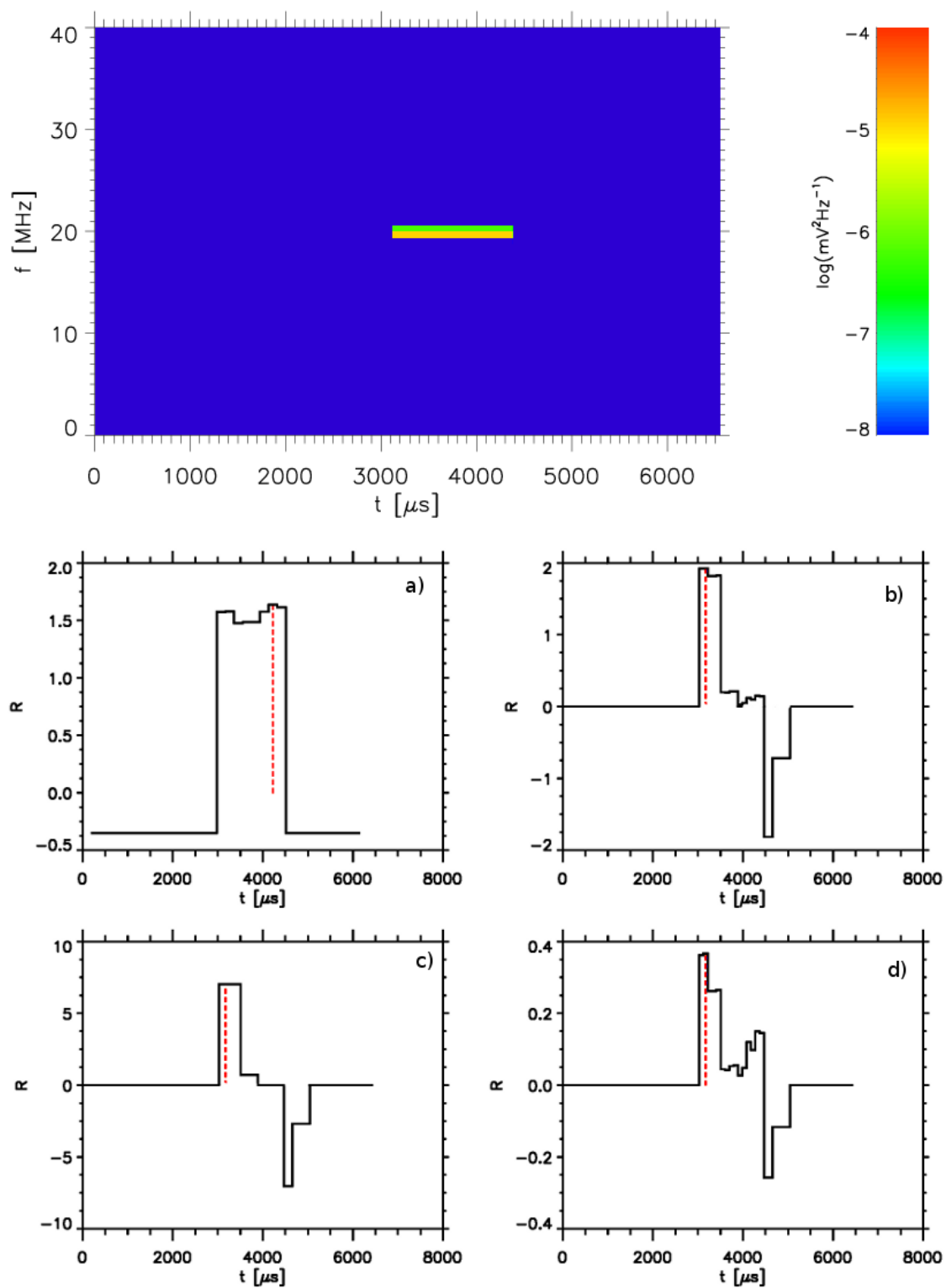
Obrázek 9.2: Výsledky detekce trans-ionosférických párových pulzů. Na horním panelu je výkonový spektrogram vstupního signálu. Na panelech a) - d) jsou časové průběhy detekční sumy R a červená čárkovaná čára odpovídající času detekce pro různé parametry algoritmu.



Obrázek 9.3: Výsledky detekce trans-ionosférických párových pulzů. V horní části je výkonový spektrogram vstupního signálu. Na panelech a) - d) jsou časové průběhy detekční sumy R a červená čárkovaná čára odpovídající času detekce pro různé parametry algoritmu.



Obrázek 9.4: Výsledky detekce širokopásmového pulzu. V horní části je výkonový spektrogram vstupního pulzu. Na panelech a) - d) jsou průběhy detekční sumy R pro různé parametry algoritmu. Čárkovanou červenou čarou je vykreslen čas detekce.



Obrázek 9.5: Průběhy detekční sumy R pro monofrekvenční vstupní signál.

Kapitola 10

Závěr

V této diplomové práci představujeme nejprve výsledky analýzy vysokofrekvenčních elektromagnetických pulzů pozorovaných družicí DEMETER, která poslouží pro následnou přípravu měření družice TARANIS. Analýza byla prováděna na vysokofrekvenčních elektrických komponentách v obou měřících módech družice. Postupně byla zpracována data od ledna 2005 do prosince 2008. Podle zvolených kritérií bylo vybráno 145 událostí v běžném měřícím režimu a 22 událostí v rychlém režimu. Pro tyto události byly dále nalezeny přesné údaje o pozici družice, vypočteny hodnoty teoretického ořezu a plazmové frekvence. Nakonec byla pro každou událost stanovena experimentální frekvence ořezu.

Naše výsledky ukazují:

- Všechny pozorované HF pulzy se vyskytují v nočních lokálních časech. To je spojeno s nižší hodnotou elektronové koncentrace v atmosféře.
- Ořezání pozorovaných pulzů není způsobeno plazmovou frekvencí. Téměř všechny hodnoty experimentálně stanoveného ořezu se vyskytují pod vypočtenou hodnotou plazmové frekvence.
- Ořezání pulzů souvisí s frekvencí pro ořezání vln v L-módu. Velké množství hodnot nalezených pod teoretickou hodnotou ořezání vysvětlujeme nepřesným stanovením experimentální frekvence ořezu a jinou skutečnou pozicí zdroje pulzu. Všechny hodnoty byly totiž počítány pro pozici zdroje, který leží v nadiru družice.

Dále jsme provedli testování a simulaci vnitřního výběrového algoritmu pro připravovaný vlnový přístroj IME-HF. Tento přístroj bude umístěn na palubě francouzské družice TARANIS. Výběrový algoritmus bude sloužit k vyhodnocování dat z analogové části přístroje. Hlavním jeho úkolem bude detekovat jevy spojené s bleskovými výboji.

- Provedli jsme simulaci, při které jsme detekovali záznam trans-ionosférických pulzů. Časy detekce byly závislé na délkách vyhledávacích rámců ($Nalg$) a vahách jednotlivých kanálů (w_i). Optimální nastavení parametrů pro detekci

jsou: délka rámce $N_{alg} = 16$ ($T = 192 \mu s$) a váhy kanálů takové, že vyšší frekvenční kanály mají větší váhu.

- Následně jsme simulovali detekci širokopásmového pulzu. Algoritmus tyto signály spolehlivě detekoval. Právě dobrá detekce těchto impulzních signálů může způsobovat špatná vyhodnocení časů příchodů pozorovaných událostí.
- Nakonec byla provedena detekce sinusového signálu na frekvenci 20 MHz. Problémem při detekci těchto signálů byl dlouhý krok pro počítání průměru, proto bylo nutné délku kroku zkrátit až na dvojnásobek délky vyhledávacího rámce. Při tomto nastavení byly tyto signály již dobře detekovány. Optimálním nastavením parametrů pro detekci jsou: délka rámce $N_{alg} = 16$ ($T = 192 \mu s$), délka průměrování $M_{alg} = 2 \cdot N_{alg}$ a váhy kanálů takové, aby kanály, v kterých neočekáváme signál, byly potlačeny.

Literatura

- Barrington-Leigh, C. P., U. S. Inan, M. Stanley, S. A. Cummer, Sprites triggered by negative lightning discharges, *Geophys. Res. Lett.*, 1999, vol. 26, 3605–3608.
- Bertheliera, J.J. et. al., IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER, *Planet. and Space Sci.*, Elsevier, 2006, 54, 487–501.
- Berthelier, J.-M., et. al., ICE, the electric field experiment on DEMETER, *Planet. and Space Sci.*, Elsevier, 2006, 54, (2006), 456–471.
- Bilitza, D., B.W. Reinisch, International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters, *Adv. in Space Res.*, Elsevier, 2007, 42, 599–609.
- Blanc, E. et. al., TARANIS: A microsatellite project dedicated to the study of impulsive transfers of energy between the Earth atmosphere, the ionosphere, and the magnetosphere, *Adv. in Space Res.*, 2007, 40, 1268–1275.
- Cummer, S. A. and U. S. Inan, Measurement of charge transfer in sprite-producing lightning using ELF radio atmospherics, *Geophys. Res. Lett.*, 1997, 24, 1731–1734.
- Cummer, S. A., U. S. Inan, T. F. Bell, and C. P. Barrington-Leigh, ELF Radiation Produced by Electrical Currents in Sprites, *Geophys. Res. Lett.*, 1998, vol. 25, 1281–1284.
- Cummer, S. A., M. Stanley, Submillisecond resolution lightning currents and sprite development: Observation and implications, *Geophys. Res. Lett.*, 1999, vol.26, 3205.
- Christian, H. J., et. al., Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector, *Jour. of Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, 4005.
- Holden, D. N., C. P. Munson, and J. C. Devenport, Satellite observations of transitionospheric pulse pairs, *Geophys. Res. Lett.*, 1995, 22(8), 889–892.
- Hu, W., S. A. Cummer, W. A. Lyons, T. E. Nelson, Lightning charge moment changes for the initiation of sprite, *Geophys. Res. Lett.*, 2002, vol.29, 120.
- Jacobson, A. R., S. O. Knox, R. Franz, and D. C. Enemark, FORTE observations of lightning radio-frequency signatures: Capabilities and basic results, *Radio Sci.*, 1999, vol. 34, 337.

- Jacobson, A. R., K. L. Cummins, M. Carter, P. Klingner, D. Roussel-Dupre, and S. O. Knox, FORTE radio-frequency observations of lightning strokes detected by the National Lightning Detection Network, *Jour. of Geophys Res.*, 2000, vol. 105, 15653.s
- Lagoutte, D., J.J. Berthelier, J.P. Lebreton, M. Parrot and J.A. Sauvaud, DEMETER Microsatellite SCIENTIFIC MISSION CENTER DATA USER GUIDE, LPCE2 CNRS Orlean, 2005, ver. 1.0
- Lebreton, J.-P. et. al., The ISL Langmuir probe experiment processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results, *Planet. and Space Sci.*, Elsevier, 2006, 54, 472–486.
- Lefeuvre, F. et. al., TARANIS—A Satellite Project Dedicated to the Physics of TLEs and TGFs, *Space Sci. Rev.*, 2008, 137, 301–315.
- Le Vine, D. M., Sources of the Strongest RF Radiation From Lightning, *Jour. of Geophys. Res.*, 1980, vol. 85, 4091–4095.
- Light, T. E., D. M. Suszcynsky, and A. R. Jacobson, Coincident radio frequency and optical emissions from lightning, observed with the FORTE satellite, *Jour. of Geophys. Res.*, 2001, vol. 106, 28223.
- Massey, R. S., D. N. Holden , Phenomenology of transionospheric pulse pairs, *Radio Science*, 1995, 30, 1645–1659.
- Massey, R. S., D. N. Holden, and X.-M. Shao, Phenomenology of transionospheric pulse pairs: Further observations, *Radio Science*, 1998, 33, 1755–1761.
- Maus, S. et. al., The 10th generation international geomagnetic reference field, *Phys. of the Earth and Planet. Inter.*, 151 (2005) 320–322.
- Němec, F., Nízkofrekvenční vlnové jevy ve vnitřní magnetosféře Země, 2006, kap. Metody analýzy, str. 27
- Neubert, T., On Sprites and Their Exotic Kin, *SCIENCE*, 2003, vol.300.
- Parrot, M. et. al., The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results, *Planet. and Space Sci.*, Elsevier, 2006, 54, 441–455.
- Pasko, V. P., U. S. Inan, and T. F. Bell, Sprites as Luminous Columns of Ionization Produced by Quasi-Electrostatic Thundercloud Fields, *Geophys. Res. Lett.*, 1996, 23(6), 649–652.
- Pinto, O., Jr., I.R.C.A. Pinto, K.P. Naccarato, Maximum cloud-to-ground lightning flash densities observed by lightning location systems in the tropical region: A review, *Atmospher. Res.*, Elsevier, 2006, 189–200.

- Russell, C. T., R. S. Zuelsdorf, R. J. Strangeway, R. Franz, Identification of the Cloud Pulse Responsible for a Trans-Ionospheric Pulse Pair, *Geophys. Res. Lett.*, 1998, vol. 25, 2645–2648.
- Sauvaud, J.A. et. al., High-energy electron detection onboard DEMETER: The IDP spectrometer, description and first results on the inner belt, *Planet. and Space Sci.*, Elsevier, 2006, 54, 502–511.
- Shao, X.-M., and A. Jacobson, Polarization observations of boardband VHF signals by FORTE satellite, *Radio Sci.*, 2001, vol. 36, 1573–1589.
- Shao, X.-M., and A. R. Jacobson, Polarization observations of lightning-produced VHF emissions by the FORTE satellite, *Jour. Geophys. Res.*, 2002, vol. 107, 4430.
- Shao, X.-M. et. al., Radio frequency radiation beam pattern of lightning return strokes: Inferred from FORTE satellite observation, *J. Geophys. Res.*, 110, D24102.
- Smith, D. A., and D. Holden, Ground-base observations of subionospheric pulse pairs, *Radio Sci.*, 1996, vol. 31, 553–571.
- Smith, D. A., et. al., A distinct class of isolated intracloud lightning discharges and their associated radio emissions, *Jour. of Geophys. Res.*, 1999, vol. 104, 4189–4212.
- Stix, T. H., *Waves in plasma*, chap. *Waves in Cold Uniform Plasma*, pp. 1–46, Springer-Verlag New York, Inc., 175 Fifth Avenue, New York, NY 10010, USA
- Suszcynsky, D. M., M. W. Kirkland, A. R. Jacobson, R. C. Franz, and S. O. Knox, J. L. L. Guillen and J. L. Green, *FORTE observations of simultaneous VHF and optical emissions from lightning: Basic phenomenology*, *Jour. of Geophys. Res.*, 2000, vol. 105, 2191.
- Swanson, D. G., *Plasma Waves*, 2nd Edition, chap. *Waves in a cold uniform plasma*, Inst. of Phys. Publish., Bristol and Philadelphia.
- Tierney, H. E., A. R. Jacobson, R. Roussel-Dupré, W. H., Beasley, Transionospheric pulse pairs originating in maritime, continental, and coastal thunderstorms: Pulse energy ratios, *Radio Sci.*, 2002, vol. 37, 1039.
- Volland, H., *Handbook of atmospheric electrodynamics Vol. I*, chap. *Meteorological Aspects of Thunderstorms, Thunderstorm Electrification, Lightning Currents*, CRC Press, Inc., Boca Ration, Florida, USA.
- Willett, J. C., J. C. Bailey, C. Leteinturier, and E. P. Krider, Lightning Electromagnetic Radiation Field Spectra in the Interval From 0.2 to 20 MHz, *Jour. of Geophys. Res.*, 1990, vol. 95, 20367–20387.
- Williams, M., K. Rothkin, and D. Stevenson, Global Lightning Variations Caused by Changes in Thunderstorm Flash Rate and by Changes in the Number of Thunderstorms, *Jour. of Appl. Meteo.*, 2000, 39, 2223–2231.

Zuelsdorf, R. S., et. al., Trans-ionospheric pulse pairs (TIPPs): Their geographic distribution and seasonal variation, *Geophys. Res. Lett.*, 1997, vol. 24, 3165–3168.

Zuelsdorf, R. S., et. al., Ground detection of trans-ionospheric pulse pairs by stations in the National Lightning Detection Network, *Geophys. Res. Lett.*, 1998, vol. 25, 481–484.

Zuelsdorf, R. S., R. C. Franz, R. J. Strangeway, and C. T. Russell, Determining the source of strong LF/VLF TIPP events: Implications for association with NPBPs and NNBP, *Jour. of Geophys. Res.*, 2000, vol. 105, 20725–20736.