

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE



Zuzana Hrbáčková

Studium elektromagnetických vln v blízkosti geomagnetického rovníku ve výšce několika poloměrů Země

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí diplomové práce: Doc. RNDr. Ondřej Santolík, Dr.

Studijní program: Fyzika, Fyzika povrchů a ionizovaných prostředí

2009

Na tomto místě bych chtěla především poděkovat docentovi Ondřeji Santolíkovi za neutuchající podporu a četné podnětné rady, díky kterým jsem dovedla tuto práci do zdárného konce. Dále bych pak chtěla poděkovat Vjačeslavu Sochorovi za pomoc s jazykovou korekturou a za poskytnutí psychické podpory. A nakonec ještě Karlu Jelínkovi, Davidu Píšovi a všem Krutám za pomoc při boji s technickou stránkou a za potřebné rozptýlení.

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

V Praze dne

Zuzana Hrbáčková

Obsah

1	Úvod	6
2	Šíření elektromagnetických vln ve studeném plazmatu	8
2.1	Základní vlastnosti elektromagnetického vlnění	8
2.2	Disperzní relace	9
2.2.1	Izotropní plazma	10
2.2.2	Anizotropní plazma	11
2.3	Šíření kolmo ke statickému magnetickému poli	12
3	Rovníkový šum	15
3.1	Magnetosféra Země	15
3.2	Historie	16
3.3	Charakteristika RŠ	17
3.3.1	Teoretické vlastnosti	17
3.3.2	Šíření a výskyt RŠ	18
3.4	Urychlování elektronů ve vnějším Van Allenově radiačním pásu	21
4	Cíle práce	24
5	Projekt CLUSTER	25
5.1	Přístrojové vybavení	25
6	Analýza dat	28
6.1	Metody pro analýzu šíření elektromagnetických vln	28
6.1.1	Singulární rozklad magnetické spektrální matice	29
6.2	PRASSADCO	30
6.3	wbd2psd	31

7	Získané výsledky a jejich diskuze	32
7.1	Seznam časových intervalů pro rovníkový šum	32
7.2	Rozbor dat z přístroje STAFF-SA	37
7.3	Analýza jemné spektrální struktury pro data z WBD	40
8	Závěr	49
	Literatura	51

Název práce: *Studium elektromagnetických vln v blízkosti geomagnetického rovníku ve výšce několika poloměrů Země*

Autor: *Zuzana Hrbáčková*

Katedra: *Katedra fyziky povrchů a plazmatu*

Vedoucí bakalářské práce: *Doc. RNDr. Ondřej Santolík, Dr.*

e-mail vedoucího: *ondrej.santolik@mff.cuni.cz*

Abstrakt: *V této práci předkládáme výsledky dosažené analýzou dat v oblasti geomagnetického rovníku z družic Cluster ve výšce několika poloměrů Země. Z dat z palubních přístrojů STAFF-SA a WBD jsme vytvořili dva jedinečné seznamy časových intervalů emisí typu rovníkový šum pokrývající období od ledna 2002 do prosince 2007. Následným systematickým zpracováním získaných dat jsme potvrdili některé důležité vlastnosti těchto vln a díky přístroji WBD poskytujícímu měření s vysokým rozlišením jsme analyzovali spektrální strukturu těchto vln.*

Klíčová slova: *mimořádný mód, magnetozvukové vlny, rovníkový šum, spektrální struktura, Van Allenovi radiační pásy*

Title: *Analysis of electromagnetic wave observed close to the geomagnetic equator at altitudes of several Earth's radii*

Author: *Zuzana Hrbáčková*

Department: *Department of Surface and Plasma Science*

Supervisor: *Doc. RNDr. Ondřej Santolík, Dr.*

Supervisor's e-mail address: *ondrej.santolik@mff.cuni.cz*

Abstract: *We present results of systematic analysis of measurements from the geomagnetic equatorial region recorded by the Cluster spacecraft at altitudes of several Earth's radii. We create a unique database of time interval of equatorial noise emissions for two onboard instruments - WBD and STAFF-SA. The database covers the time period between January 2002 and December 2007. We confirm some important properties of these waves and we analyze fine spectral structures of these emissions using the high-resolution measurements from the WBD instrument.*

Keywords: *extraordinary mode, magnetosonic waves, equatorial noise, fine spectral structure, Van Allen radiation belts*

Kapitola 1

Úvod

V dnešní elektrotechnické době je téměř vše kolem nás řízeno elektronikou. Není tomu jinak ani u většiny vědeckých přístrojů. Jedním z hlavních pohonů lidského pokroku byla kromě lenosti taky zvědavost a touha po poznání. Proto v posledních několika desítkách let vysíláme na oběžné dráhy kolem Země vědecké družice sloužící k naměření dat, jejichž zpracováním pak můžeme pochopit děje probíhající kolem Země od atmosféry až po vzdálené oblasti ve slunečním větru.

Družice, které se dostávají do vzdáleností několika poloměrů Země, protínají svou dráhou oblast vysokoenergetických elektronů nazývanou vnější Van Allenův radiační pás. Tyto relativistické částice mohou poškodit měřicí přístroje a tím znehodnotit naměřená data. Abychom zabránili těmto nechtěným jevům je potřeba znát, jak se tato oblast vyvíjí v čase, a tedy je potřeba vědět, jakým způsobem dochází k procesu urychlení. Jedním z urychlujících mechanismů je urychlování pomocí vln hvizdového módu. U emisí typu chórus se již ví, že hrají při urychlování elektronů velkou roli. Další z vln u které se předpokládá, že by mohla mít vliv na urychlení elektronů je rovníkový šum.

V této práci se budeme zabývat analýzou dat z družic Cluster v období mezi lednem 2002 a prosincem 2007. Přesněji řečeno bude našim cílem nalézt všechny emise typu rovníkový šum pro dva palubní přístroje - STAFF-SA a WBD. Než se však budeme věnovat diskuzi o dosažených výsledcích, ve stručnosti si vysvětlíme teorii šíření vln ve studeném plazmatu. Zvláště se pak zaměříme na mód, ve kterém se tato emise šíří, tzn. rozebereme šíření kolmo ke statickému magnetickému poli. V další části zrekapitulujeme výsledky, kterých již bylo z dřívějších měření dosaženo. V kapitole 5

krátce představíme projekt Cluster a ve stručnosti popíšeme přístroje, ze kterých jsme čerpali data. V jedné z posledních kapitol se budeme věnovat softwarovému zázemí, programům pomocí nichž jsme naměřená data zpracovávali a na závěr se pak budeme věnovat prezentování a diskuzi dosažených výsledků.

Kapitola 2

Šíření elektromagnetických vln ve studeném plazmatu

V plazmatu existuje mnoho módů, ve kterých se elektromagnetické vlny mohou šířit. Abychom zjistili, v jakém módu se šíří daná vlna, musíme nejdříve odvodit disperzní relaci, která popisuje závislost úhlové frekvence ω na vlnovém vektoru \vec{k} .

2.1 Základní vlastnosti elektromagnetického vlnění

Každou periodicky oscilující veličinu lze zapsat jako superpozici sinusových oscilací s různou frekvencí. Oscilující veličinu \vec{L} můžeme zapsat ve tvaru

$$\vec{L} = \Re\{\vec{\mathcal{L}} \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)]\}, \quad (2.1)$$

který představuje idealizaci rovinné vlny. Vektor \vec{L} charakterizuje danou fyzikální veličinu a $\vec{\mathcal{L}}$ je její komplexní amplituda, v níž může být obsažena jak fáze vlny, tak její reálná amplituda.

Důležitou vlastností vlny je její rychlost šíření. Pro šíření místa na vlně, jemuž přísluší konstantní fáze, zavádíme fázovou rychlost \vec{v}_f definovanou jako

$$\vec{v}_f = \vec{\kappa} \frac{\omega}{k}, \quad (2.2)$$

kde $\vec{\kappa}$ je jednotkový vektor ve směru vektoru \vec{k} . Fázová rychlost má tedy směr vlnového vektoru a může přesahovat rychlost světla. Což neodporuje

teorii relativity, neboť vlna s konstantní amplitudou nemůže přenášet žádnou informaci. Pokud však vlnu zmodulujeme, pak rychlost modulační informace je popsána vztahem (odvození viz [1])

$$\vec{v}_g = \frac{\partial \omega}{\partial \vec{k}}, \quad (2.3)$$

kde \vec{v}_g nazýváme grupovou rychlostí, která již rychlost světla přesáhnout nemůže.

2.2 Disperzní relace

Řešení disperzní relace v obecném tvaru je relativně složité. Proto si zavědeme při jejím odvození zjednodušení. Nadále nebudeme uvažovat žádné jiné pohyby kromě vlnových, tzn., že zanedbáme například tepelné pohyby částic. Toto zjednodušení se nazývá *přiblížením studeného plazmatu*. Dále předpokládejme, že prostředí je homogenní na vzdálenosti daleko větší než je vlnová délka λ a vlastnosti prostředí a šířících se vln nezávisí na amplitudě (tzv. linearizace vlny). Dříve, než si odvodíme samotnou disperzní relaci, je potřeba odvodit vlnovou rovnici. Vyjdeme z Maxwellových rovnic, které v diferenciálním tvaru mají tvar:

$$\text{Faradayův indukční zákon} \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2.4)$$

$$\text{Ampérův zákon} \quad \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right), \quad (2.5)$$

$$\text{Gausův zákon elektrostatiky} \quad \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (2.6)$$

$$\text{Zákon spojitosti indukčního toku} \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0. \quad (2.7)$$

Provedeme-li nyní rotaci na rovnici 2.4 a dosadíme-li za $\nabla \times \vec{B}$ z rovnice 2.5 dostaneme pak vlnovou rovnici

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = 0. \quad (2.8)$$

Tu můžeme dále upravit dosazením rovnice rovinné vlny 2.1 a použitím vztahu pro index lomu \vec{n} , který je

$$\vec{n} = \frac{\vec{k}c}{\omega}. \quad (2.9)$$

Rovnice 2.8 pak přejde do tvaru¹

$$n^2 \vec{\kappa} \vec{\kappa} \cdot \vec{\mathcal{E}} - n^2 \vec{\mathcal{E}} + \varepsilon \cdot \vec{\mathcal{E}} = 0. \quad (2.10)$$

Nyní již můžeme přistoupit k odvození disperzní relace. Rozebereme zvlášť 2 způsoby řešení a to pro izotropní a anizotropní plazma.

2.2.1 Izotropní plazma

Nejprve si ještě uvedeme pohybovou rovnici a vztah pro proudovou hustotu plazmatu bez vnějšího magnetického pole

$$m_j \frac{d\vec{v}_j}{dt} = q_j \vec{E}, \quad (2.11)$$

$$\vec{J} = \sum_j n_j q_j \vec{v}_j(\vec{E}), \quad (2.12)$$

kde indexy j označují druhy částic, q_j je jejich náboj, n_j jejich hustota a \vec{J} je proudová hustota. Vyjádřením rychlosti z rovnice 2.11 a jejím dosazením do rovnice 2.12 odvodíme vztah pro Ohmův zákon v diferenciálním tvaru:

$$\vec{J} = i \underbrace{\frac{1}{\omega} \sum_j \frac{n_j q_j^2}{m_j}}_{\sigma} \cdot \vec{\mathcal{E}}, \quad (2.13)$$

kde σ je vodivost daného prostředí (viz [2]). Na plazma lze pohlížet jako na dielektrikum, pro které zavádíme dielektrickou konstantu definovanou jako

$$\varepsilon = 1 + \frac{i}{\varepsilon_0 \omega} \sigma. \quad (2.14)$$

Vynásobíme-li rovnici 2.8 skalárně vektorem $\vec{\kappa}$ zjistíme, že $\vec{\mathcal{E}}$ je kolmé na $\vec{\kappa}$. Pak můžeme napsat

$$n^2 = \varepsilon = 1 - \frac{\omega_{pj}}{\omega}, \quad (2.15)$$

což je disperzní relace pro izotropní studené plazma a

$$\omega_{pj} = \left(\sum_j \frac{n_j q_j^2}{m_j \varepsilon_0} \right)^{1/2} \quad (2.16)$$

je plazmová frekvence oscilací daného druhu částic.

¹Symboly $\vec{\mathcal{E}}$ a $\vec{\mathcal{B}}$ budou představovat komplexní amplitudu vlny.

2.2.2 Anizotropní plazma

Odvození bude podobné jako u izotropního plazmatu, pouze v případě pohybové rovnice 2.11 přidáme na pravou stranu Lorentzovu sílu způsobenou statickým magnetickým polem \vec{B}_0 , které právě tvoří anizotropii systému. Rovnice 2.11 a 2.13 pak přejdou do tvaru

$$m_j \frac{d\vec{v}_j}{dt} = q_j (\vec{E} + \vec{v}_j \times \vec{B}_0), \quad (2.17)$$

$$\vec{J} = \vec{\sigma} \vec{E}, \quad (2.18)$$

kde $\vec{\sigma}$ je tenzor vodivosti. V rovnici 2.17 jsme zanedbali vektorový součin $\vec{v}_j \times \vec{B}$, neboť pole vlny je slabé oproti vnějšímu magnetickému poli \vec{B}_0 . Pro dielektrický tenzor (podrobnější odvození viz [3]) pak dostáváme

$$\vec{\varepsilon} = \vec{I} + \frac{i}{\varepsilon_0 \omega} \vec{\sigma} = \begin{pmatrix} S & -iD & 0 \\ iD & S & 0 \\ 0 & 0 & P \end{pmatrix}, \quad (2.19)$$

kde \vec{I} je jednotkový vektor a S, D, R, L, P jsou Stixovy parametry, které mají tvar

$$S = \frac{1}{2}(R + L), \quad D = \frac{1}{2}(R - L), \quad (2.20)$$

$$R = 1 - \sum_j \frac{\omega_{pj}^2}{\omega(\omega + \Omega_j)}, \quad (2.21)$$

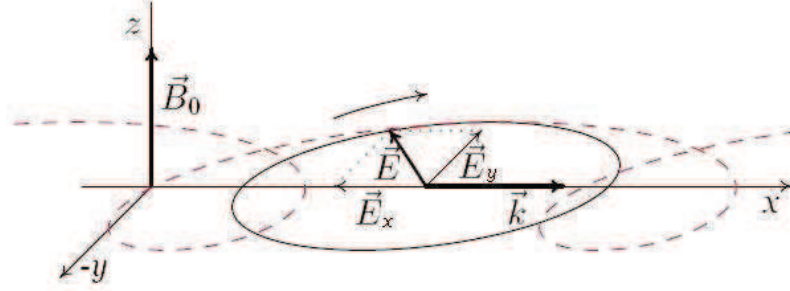
$$L = 1 - \sum_j \frac{\omega_{pj}^2}{\omega(\omega - \Omega_j)}, \quad (2.22)$$

$$P = 1 - \sum_j \frac{\omega_{pj}^2}{\omega^2}, \quad (2.23)$$

kde Ω_j je cyklotronová frekvence neboli frekvence kruhového pohybu nabitých částic kolem magnetických siločar. Její velikost je úměrná velikosti magnetického pole a směr rotace je dán nábojem (kladným či záporným) daného druhu částic. Z rovnice 2.17 lze odvodit, že velikost cyklotronové frekvence je rovna (viz [1])

$$\Omega_j = \frac{q_j B_0}{m_j}. \quad (2.24)$$

Pro další odvození předpokládejme, že směr statického magnetického pole bude ve směru osy z , tedy $\vec{B}_0 = (0, 0, B_z)$ a směr vlnového vektoru bude mít směr shodný se směrem osy x , viz obrázek 2.1. A nyní se dostáváme



Obrázek 2.1: Orientace os a směr vnějšího magnetického pole pro odvození disperzní relace pro anizotropní plazma. Na obrázku je dále ukázán směr a typ polarizace elektrického pole pro X -mód. Obrázek převzat z [4].

k samotné disperzní relaci pro anizotropní plazma. Po dosazení do vlnové rovnice můžeme napsat

$$\begin{pmatrix} S - n^2 \cos^2 \theta & -iD & n^2 \cos \theta \sin \theta \\ iD & S - n^2 & 0 \\ n^2 \cos \theta \sin \theta & 0 & P - n^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathcal{E}_x \\ \mathcal{E}_y \\ \mathcal{E}_z \end{pmatrix} = 0, \quad (2.25)$$

kde θ je úhel odklonu vlnového vektoru \vec{k} od statického magnetického pole \vec{B}_0 . Pro netriviální řešení této rovnice musíme položit determinant roven nule. Po menších úpravách nám vyjde bikvadratická rovnice pro n , která může mít maximálně dva kořeny. Z toho plyne, že pro danou frekvenci ω , daný úhel θ a ostatní parametry existují maximálně dva vlnové módy, ve kterých se elektromagnetická vlna za daných podmínek může šířit. Všechny vlnové módy, které mohou ve studeném plazmatu existovat efektně zpřehledňuje CMA diagram (viz. obr. 2.2).

2.3 Šíření kolmo ke statickému magnetickému poli

Zaměříme se nyní na případ kolmého šíření. To znamená, že vlnový vektor \vec{k} bude svírat se statickým magnetickým polem \vec{B}_0 úhel $\theta = 90^\circ$. Pro tento případ jsou řešením dva vlnové módy

$$n^2 = \begin{cases} P \\ \frac{2RL}{S^2} \end{cases} \quad (2.26)$$

Vrchní z rovnic 2.26 popisuje šíření v tzv. *řádém módu*, zatímco druhé řešení 2.26 popisuje *mimořádný X-mód*. Nyní se blíže podíváme na polarizaci *X-módu*. Dosazením řešení 2.26 zpět do rovnice 2.25 zjistíme, že fluktuační elektrického pole jsou elipticky polarizované a to v rovině x, y (viz obrázek 2.1). Kde poměr komplexních složek \mathcal{E}_x a \mathcal{E}_y je roven

$$\frac{\mathcal{E}_x}{\mathcal{E}_y} = i \frac{D}{S} . \quad (2.27)$$

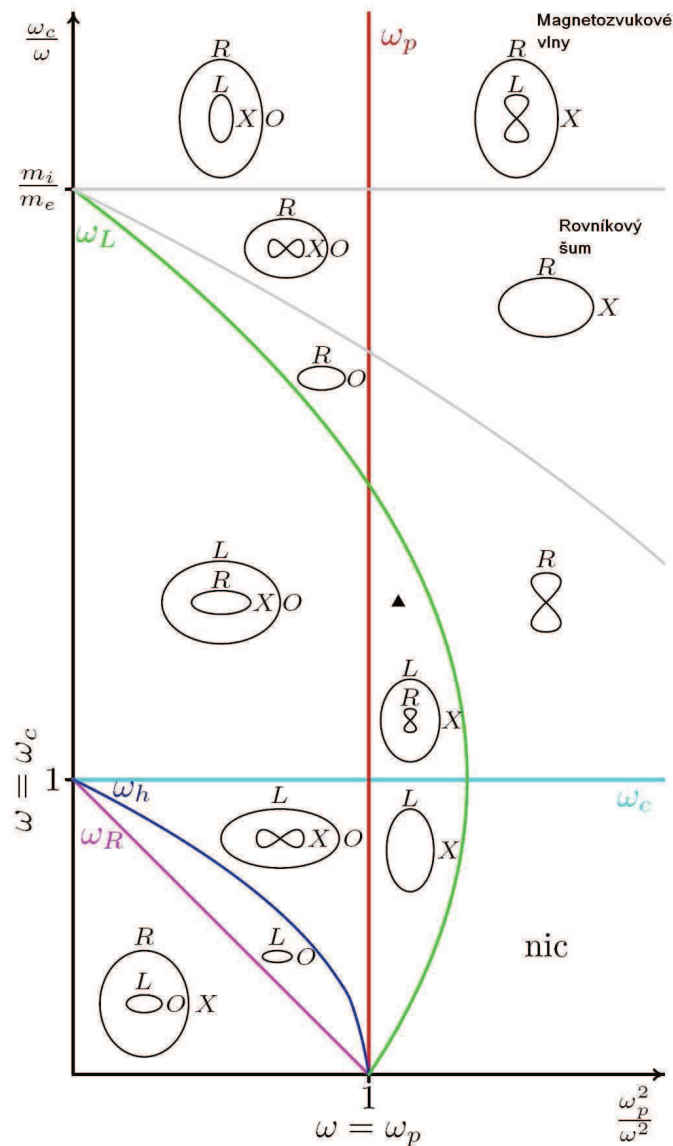
Dosadíme-li do lineární podoby rovnice 2.4

$$\vec{k} \times \vec{\mathcal{E}} = \omega \vec{\mathcal{B}} , \quad (2.28)$$

za intenzitu elektrického pole $\vec{\mathcal{E}} = (\mathcal{E}_x, -i \frac{S}{D} \mathcal{E}_x, 0)$, pak zjistíme, že fluktuační magnetického pole jsou lineárně polarizované a to ve směru statického magnetického pole a velikost těchto fluktuačních je

$$\mathcal{B}_z = \mathcal{E}_x \frac{n}{c} \frac{S}{iD} . \quad (2.29)$$

Právě *mimořádný mód* je mód, ve kterém se šíří emise typu *rovníkový šum*.

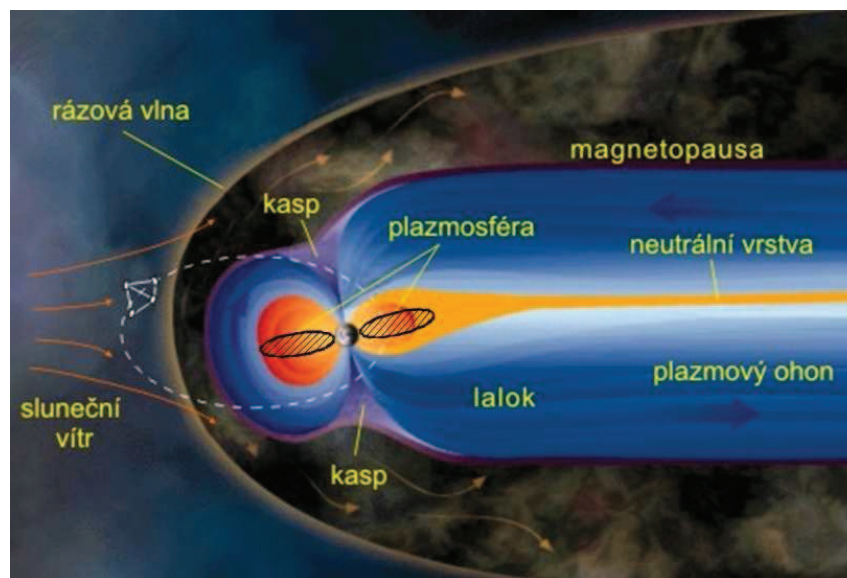


Obrázek 2.2: Uvedený Clemm-Mullaly-Allis diagram pojmenovaný podle jeho tvůrců platí pro dvousložkové plazma (pouze elektrony a protony). Osa y je úměrná statickému magnetickému poli a osa x hustotě plazmatu. Diagram je rozdělen do 13 oblastí, na jejichž hranicích je index lomu pro příslušné vlnové módy dané oblastí $N=0$ nebo $N = \infty$. Tedy dochází buď k ořezání vln, či k jejich rezonanci. Převzato z [4].

Kapitola 3

Rovníkový šum

3.1 Magnetosféra Země



Obrázek 3.1: Magnetosféra Země a její některé části. Šrafováním jsou vyznačena místa výskytu rovníkového šumu. Čárkovaná bílá linka je přibližným příkladem orbity družic Cluster. Obrázek je převzat z <http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004-24-son.html>.

V předchozí kapitole jsme si teoreticky odvodili v jakém módu se šíří rovníkový šum (dále jen RŠ). Nyní je na čase se dozvědět jak tato emise vypadá, kde se šíří a jaké má vlastnosti. Dříve však, než se budeme věnovat těmto tématům, tak je třeba krátce představit oblast kolem Země, kde se šíří mnoho typů vln, mezi nimi i RŠ. Touto oblastí je zemská magnetosféra.

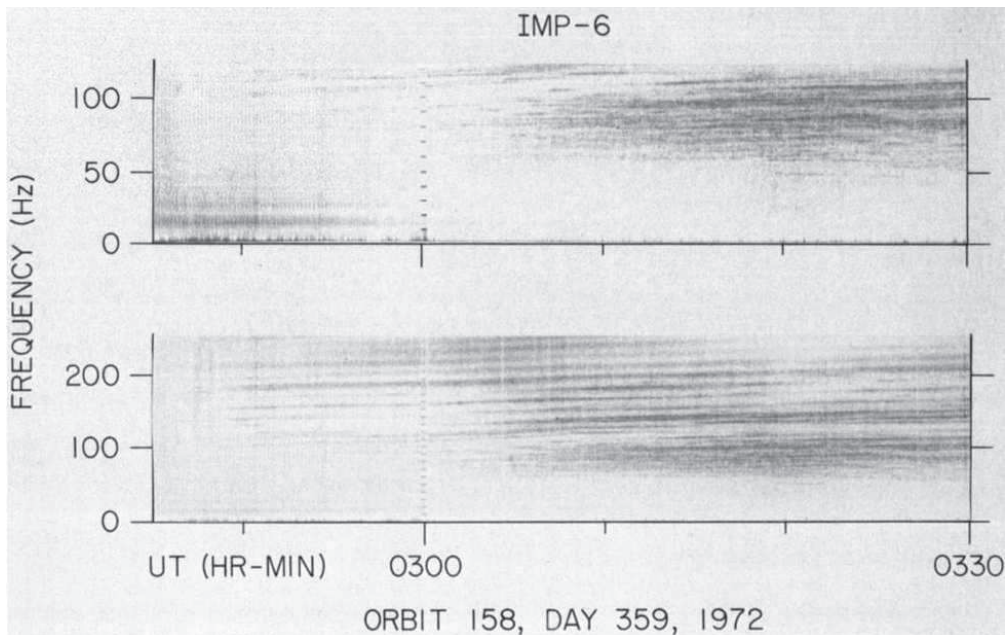
Každé těleso ve sluneční soustavě tvoří přirozenou překážku pro sluneční vítr (proud plazmatu vyvrhovaný ze Slunce). Pokud však těleso má kolem sebe magnetické pole, mezi něž patří například Země či Jupiter, je překážkou pro sluneční vítr právě toto pole a ne přímo povrch těles. Proud plazmatu postupuje od Slunce nadzvukovou rychlostí. Při styku s magnetickým polem Země se rychlost sníží na podzvukovou (vzniká rázová vlna) a plazma začne Zemi obtékat. Vytváří se tak magnetická obálka, což je přechodová oblast mezi slunečním větrem a magnetickým polem Země. V této oblasti může docházet k přepojování mezi magnetickými siločárami Země a meziplanetárním magnetickým polem, které je zamrzlé unášeno plazmatem ze Slunce.

Na obrázku 3.1 jsou detailněji vidět některé části magnetosféry. Hustota částic jak nabitých, tak neutrálních se může rapidně lišit pro každou z těchto oblastí. RŠ se vyskytuje ve vnitřní magnetosféře, například v oblasti zvané plazmasféra. Tato oblast se rozkládá zhruba do 5 poloměrů Země R_E a je v ní vysoká hustota nabitých částic.

3.2 Historie

Historie objevu této vlny sahá do roku 1970, kdy byla poprvé naměřena a popsána. Data obsahující rovníkový šum byla zaznamenána na magnetometru družice OGO 3. *Russel a kol.* [5] ji popsali jako šum na extrémně nízkých frekvencích do 100 Hz existující pouze vně plazmasféry. Již v tomto článku bylo zmíněno, že rovníkový šum zřejmě může přispívat k lokálnímu urychlování energetických elektronů ve vnějším Van Allenově pásu. Data z družice OGO 3 neměla tak dobré rozlišení, aby byla vidět nějaká vnitřní struktura této emise, která tedy vypadala čistě jako šum na daném frekvenčním rozsahu. Z toho vzniklo pojmenování *rovníkový šum*. Avšak v článku *Gurnetta* [6] z roku 1976 se zjistilo ze širokopásmového měření družic Imp 6 a Hawkeye 1, že šum se skládá z mnoha spektrálních čar vzdálených od sebe od několika desetin Hz až po několik desítek Hz. Díky tomuto objevu se zjistilo jak se vlny pravděpodobně generují. RŠ interaguje s ionty (jako např. H^+ , He^+ a jinými těžšími ionty) na jejich charakteristických

cyklotronových frekvencích, čímž vznikají spektrální čáry ve frekvenčním spektru. Ukázka typického časově-frekvenčního spektrogramu je vidět na obrázku 3.2. Se startem družice Cluster (projekt Cluster bude představen v kapitole 5) přibylo dostatek dat z oblasti výskytu RŠ na provedení hlubší analýzy těchto vln.



Obrázek 3.2: Frekvenčně-časový spektrogram rovníkového šumu ukazující výskyt mnoha spektrálních čar ve frekvenčním spektru. Obrázek převzat z [6].

3.3 Charakteristika RŠ

3.3.1 Teoretické vlastnosti

RŠ je intenzivní elektromagnetická emise, patří do relativně velké rodiny vln hvizdového módu, které se šíří ve frekvenčním pásmu přibližně stejném jako je slyšitelné pásmo. Tedy převedením zachyceného elektromagnetického

signálu na akustický je možno tyto vlny slyšet. Mezi další zástupce tohoto módu patří např. *hvizdy* (emise z bleskových výbojů šířící se v ionosféře [7]), podle kterých tento mód dostal jméno, dále vlny typu *chórus* (mají velký význam v urychlování elektronů ve vnějším radiačním pásu [8]) či *lví řevy* [9]. Na obrázku 3.3 jsou uvedeny teoreticky vypočtené vlastnosti hvizdového módu.

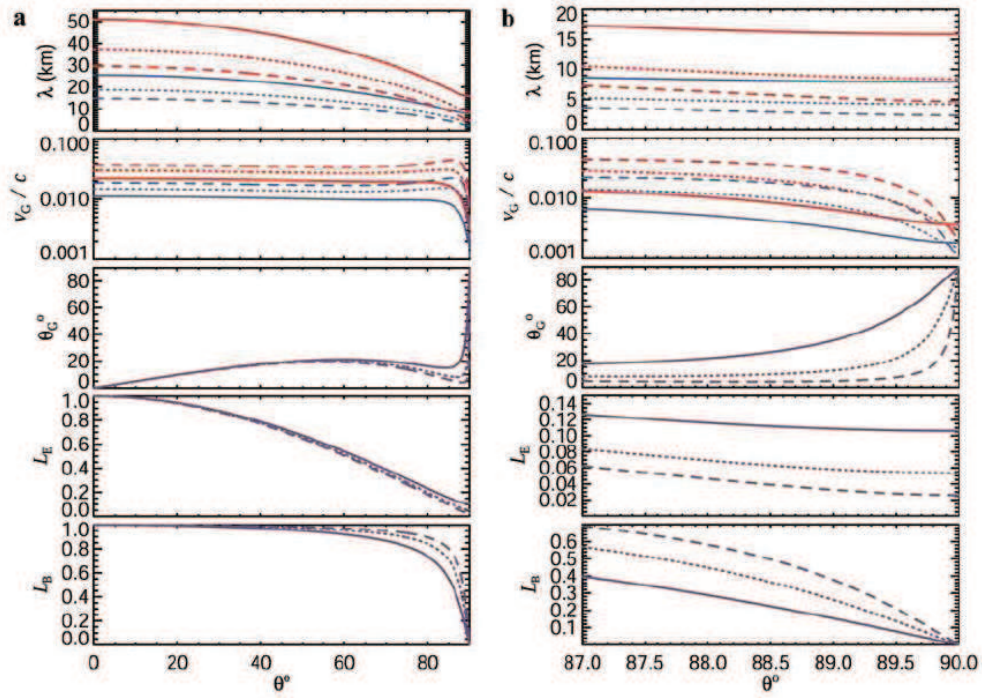
Někdy se RŠ označuje jako rychlá magnetozvuková vlna. Zmenšíme-li totiž frekvenci vlny pod cyklotronovou iontovou frekvenci, dostaneme se do oblasti, kde se vlny šíří jako magnetozvukové (viz 2.2). Řešením disperzní relace jsou pak Alfénovy vlny a rychlé magnetozvukové vlny, které se mohou šířit kolmo k magnetickému poli jako mimořádný mód. Ovšem k tomuto řešení lze dojít také z rovnice 2.26 pokud frekvenci dostatečně zmenšíme. Mluvíme-li tedy o rychlých magnetozvukových vlnách nad iontovou cyklotronovou frekvencí Ω_i , je to stejné jako bychom mluvili o vlnách ve hvizdovém módu pod spodní hybridní frekvencí ω_{LH} .

3.3.2 Šíření a výskyt RŠ

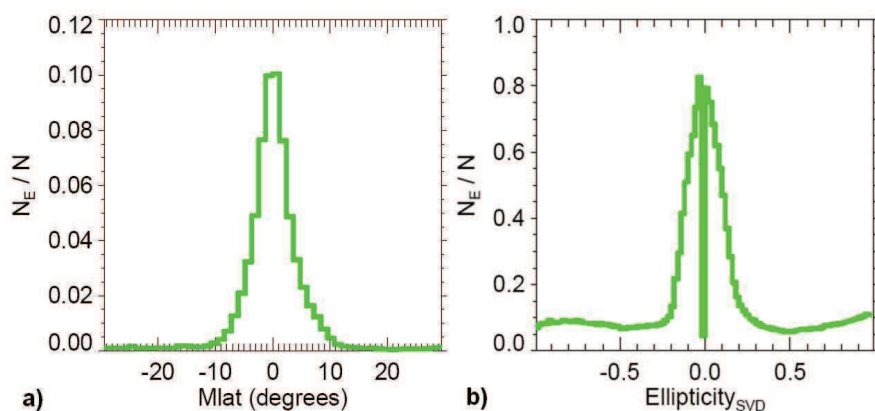
Jak bylo odvozeno v předchozí kapitole, RŠ se šíří kolmo k \vec{B}_0 přibližně v rovině geomagnetického rovníku na frekvencích od dvojnásobku lokální protonové cyklotronové frekvence po spodní hybridní frekvenci ve výšce 2-7 R_E (tedy nejenom vně plazmasféry, jak se předpokládalo z prvních měření). Frekvenční rozsah těchto vln je tedy přibližně od několika Hz po několik stovek Hz.

Z hlubší analýzy naměřených emisí bylo zjištěno, že vlny se pohybují jak azimutálně [10] a [11] tak radiálně [12]. Azimutální šíření bylo zjištěno z orientace hlavní osy polarizační elipsy, která je rovnoběžná s vektorem \vec{k} . Radiální bylo také zjištěno ze směru hlavní osy polarizační elipsy, ale i z výkonového spektra elektrického pole [12]. Frekvenční vzdálenost mezi výkonovými píky totiž neodpovídala velikosti cyklotronové protonové frekvence v místě pozorování.

Systematickou analýzou dat z prvních dvou let měření družic Cluster byl RŠ zaznamenán v 60% průchodů družic rovníkem. Naměřené emise se vyskytovaly převážně do 10° od rovníku a elipticita vln byla především do 0,2. Tyto výsledky jsou vidět na obrázku 3.4. *Santolik a kol.* [13] zjistili, že fluktuační magnetického pole jsou velice intenzivní (zachyceny až v 80% případů, kde intenzita přesahovala $10^{-4} \text{nT}^2 \text{Hz}^{-1}$) mezi ostatními přírodními emisemi, zatímco elektrické fluktuační jsou sice intenzivnější, ale ve vyšších



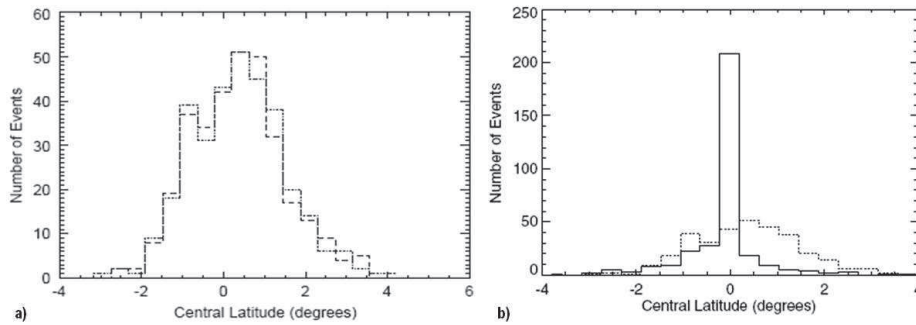
Obrázek 3.3: Teoretické vlastnosti hvizdového módu jako funkce úhlu θ - úhel mezi vlnovým vektorem a statickým magnetickým polem. θ je v rozmezí pro případ a) $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ a b) $87^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. $\omega_p = 6 \Omega_e$ (červaná křivka); $\omega_p = 12 \Omega_e$ (modrá křivka); $\omega = 9 \Omega_H^+$ (plná křivka); $\omega = 16 \Omega_H^+$ (tečkovaná křivka); $\omega = 25 \Omega_H^+$ (čárkovaná křivka). V panelech od shora jsou: vlnová délka, normalizovaná grupová rychlost, úhel θ_G mezi grupovou rychlostí a \vec{B}_0 , elipticita elektrického pole a elipticita magnetického pole. Převzato z [12].



Obrázek 3.4: a) Normovaný histogram elipticity intenzivních emisí. b) Normovaný histogram magnetické dipólové šířky pro blízce lineárně polarizované vlny. Oba histogramy jsou počítány ze spektrální matice pro magnetické pole. Převzato z [13].

intenzitách nad $10^{-2}\text{mV}^2\text{m}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ převládají více emise s jinou polarizací.

Další studie byly prováděny na základě zjištění parametrů gaussovského modelu výkonové hustoty (blíže viz [14]), kterým byly proloženy naměřené emise. Výsledky ukázaly, že intenzitní pík gaussovského modelu leží do 2° od rovníku (obrázek 3.5) a jeho pološířka je pod 3° . Tyto hodnoty byly vypočteny za použití dipólového modelu magnetického pole Země, který však přesně nepopisuje, kde leží minimum magnetického pole. To je definováno jako poloha na siločáře, které přísluší nejmenší hodnota magnetického pole. Přesnější spočtení polohy minima umožňuje např. model *Tsyganenko 89*. Aplikací tohoto modelu na data z družic Cluster provedl *Němec a kol.* [15]. Centrální poloha intenzitního píku byla lokalizována kolem rovníku, jak je vidět na obrázku 3.5. Při bližším pohledu na případy, jejichž pík ležel mimo rovník (nad 1° od rovníku) bylo zjištěno, že korespondují s extrémními hodnotami Kp a Dst indexů. Tyto indexy popisují aktivitu magnetického pole Země, jinak řečeno velikost fluktuací od průměrné hodnoty.



Obrázek 3.5: a) Histogram pozic intenzitního píku RŠ elektrické (čárkovaně) a magnetické (tečkovaně) výkonově spektrální hustoty za použití dipólového modelu. b) Histogram pozic píku při použití modelu *Tsyganenko 89*. Pro srovnání je zde vykreslen tečkovaně histogram při použití dipólového modelu. Převzato z [14] a [15]

3.4 Urychlování elektronů ve vnějším Van Allenově radiačním pásu

V magnetosféře Země se nachází dva radiační pásy pojmenované po jejich objeviteli *J. Van Allenovi*. Jsou to oblasti energetických nabitých částic. Hranice mezi nimi a jejich samotná tloušťka se mění, neboť tyto oblasti jsou velmi dynamické (zvláště vnější pás). Vnitřní pás se přibližně rozkládá na vzdálenostech 1-3 R_E . Převládají v něm vysokoenergetické protony a částice zachycené z kosmického záření. Tento pás se nachází blíže Zemi, a leží tedy v silnějším magnetickém poli, proto je stabilnější než pás vnější, který se nachází přibližně od 3 do 7 R_E a je tzv. udržován Sluncem. Nachází se v něm částice ze slunečního větru a je velice citlivý na sluneční aktivitu, tedy na magnetické bouře. Během magnetické bouře ve vnějším radiačním pásu roste intenzita toku energetických elektronů, což může způsobit poruchu měřících přístrojů či přímo satelitů, které radiačním pásem prolétají.

Změny toku elektronů, které mohou být až v rozmezí pěti řádů, jsou způsobeny kombinací jejich urychlení, přenosu energie a ztrátových procesů odehrávajících se uvnitř magnetosféry. Právě urychlování elektronů způsobené interakcí s elmag. vlnami je jedním z důležitých mechanismů lokálního urychlení. U vlnových emisí typu chorus se již potvrdilo, že hrají významnou roli při urychlování elektronů [16] a předpokládá se, že RŠ je

taky velice efektivní při urychlování elektronů o energiích ≥ 10 keV na relativistické energie (≥ 1 MeV) [17].

RŠ může silně interagovat s elektrony a ionty za splnění rezonanční podmínky zahrnující Dopplerův posun

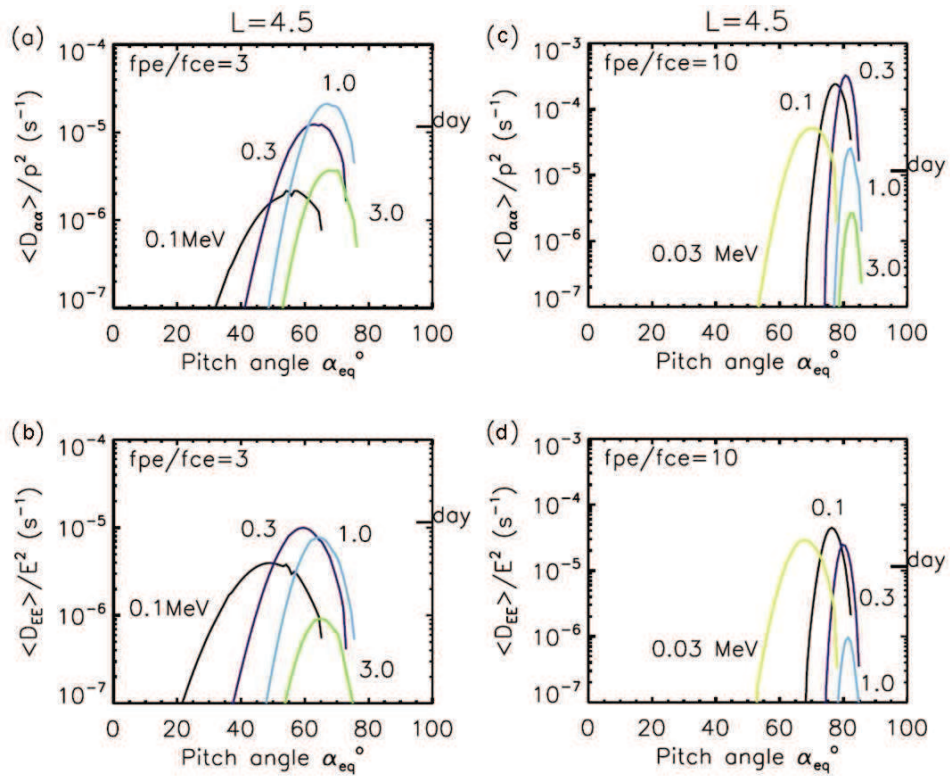
$$\omega - \frac{n|\Omega_c|}{\gamma} - k_{\parallel}v_{\parallel} = 0, \quad (3.1)$$

kde ω je kruhová frekvence vlny, Ω_c je cyklotronová frekvence, n je harmonické číslo, γ je relativistický korekční faktor, v_{\parallel} je složka rychlosti elektronů rovnoběžná s magnetickým polem a k_{\parallel} je stejná složka vlnového vektoru. Poslední člen na levé straně rovnice představuje Dopplerův posun frekvence vlny v soustavě pohybujícího se elektronu ve směru statického magnetického pole. Vyřešením této rovnice za použití disperzní relace 2.26 pro X-mód můžeme dostat energie a pitch-úhly¹ elektronů, se kterými vlna může rezonovat. Jelikož všechny cyklotronové rezonance se vyskytují u elektronů hodně nad 3 MeV je tedy nepravděpodobné, že by mohly způsobit rozptyl elektronů. Nicméně Landauova rezonance ($n = 0$) je možná pro široký rozsah energií, a proto se dále budeme zabývat pouze touto rezonancí. Pro další diskuzi je vhodnější se zabývat rozptylem elektronů jako difúzním procesem v energii a pitch-úhlu. Difúzní koeficienty energie a pitch-úhlu (viz [18]) průměrované přes periodu odrazu² jsou ukázány na obrázku 3.6. Velikost rozptylu je daleko efektivnější na pitch-úhlech nad 50° , kde difúze v energiích se pohybuje v řádu dní. Ze zvyšující se plazmovou frekvencí se zmenšuje podélná složka rychlosti vln, a proto se rezonance se stejně energetickými elektrony odehrává na větších pitch-úhlech (obrázek 3.6 (c) a (d)). Vzhledem k tomu, že magnetozvukové vlny nemohou rozptýlit elektrony do ztrátového kužele ($\sim 4, 5^\circ$ pro $L = 4, 5$)³, není nutné neustále zásobovat danou oblast nízkenergetickými elektrony.

¹Úhel mezi směrem pohybu elektronů a magnetickým polem.

²Ve sbíhavém magnetickém poli pro daný pitch-úhel může dojít k odrazu nabitých částic. Pokud je úhel větší než mezní úhel ztrátového kužele, pak částice v magnetosféře vykonávají periodický pohyb mezi jižní a severní polokoulí.

³ L je McIlwainův parametr, který určuje na jaké siločáře se zrovna nacházíme. Velikost je definovaná tak, že na geomagnetickém rovníku je shodná se vzdáleností od Země vyjádřeno v R_E (např. $L = 4$ je rovno na geom. rovníku vzdáleno $4 R_E$).



Obrázek 3.6: Difúzní koeficienty pro (a), (c) pitch-úhly elektronů a (b), (d) energie průměrované přes odraz ve vzdálenosti $L = 4,5$ pro různý poměr plazmové a cyklotronové elektronové frekvence. Převzato z [17].

Kapitola 4

Cíle práce

Cílem této diplomové práce je studium elektromagnetických emisí na nízkých frekvencích v okolí geomagnetického rovníku. Toto studium bude založeno především na analýze dat z družice Cluster. Přesněji bylo naším cílem:

1. Sestavit seznam časových intervalů, kdy byl pozorován rovníkový šum na družicích Cluster, pro přístroje STAFF-SA a WBD.
2. Ze seznamu pro STAFF-SA zjistit, na jakých vzdálenostech a do kterých magnetických šířek se vlna pohybuje.
3. Ze seznamu pro WBD vykreslit spektrogramy s vysokým rozlišením a provést jejich analýzu:
 - Zjistit frekvenční rozdíly mezi spektrálními čarami.
 - Pomocí těchto rozdílů zjistit, na jakých radiálních vzdálenostech se nacházela zdrojová oblast.
 - Zjistit možnou spojitost mezi polohou družice a zdrojovou oblastí pozorovaných vln.

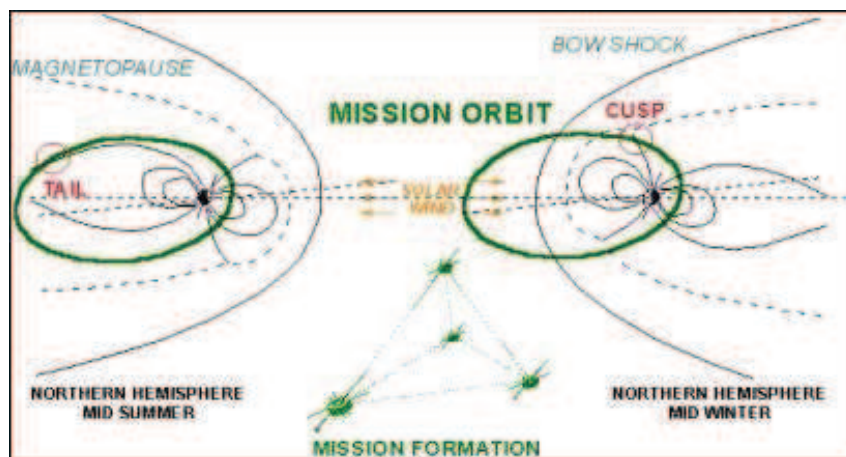
Kapitola 5

Projekt CLUSTER

Z touhy poznat a popsat nejen naše bezprostřední okolí, ale také zjistit co se děje v okolí naší planety hlavně pak v zemské magnetosférické obálce, vzešla na počátku 80. let myšlenka na bližší studium oblasti kaspů a chvostu magnetosféry. Takto vznikl projekt Cluster. Tyto unikátní čtyři družice měli vyletět na oběžnou dráhu v roce 1996, ale jejich let trval pouze 37 sekund než byly zničeny autodestrukční nosné rakety *Ariane 5*, z důvodu poruchy jejího softwaru. Vypadalo to, že 10 let práce přijde vniveč. Avšak ESA včele s několika vědci z původního týmu se rozhodla v projektu pokračovat a postavit pátou družici, která byla přílehně pojmenovaná po mytologickém ptáku Fénixovi, který se vždy po své smrti znovu zrodí ze svého popela. Vědci si však po čase uvědomili, že jedna družice je nedostatečná pro požadované vědecké uplatnění, a tak i přes velké obtíže s rozpočtem byly zkonstruovány další tři družice. V polovině roku 2000 pak byly tedy čtyři družice Cluster II - Salsa (C1), Samba (C2), Tango (C3) a Rumba (C4) vypuštěny z ruského kosmodromu Bajkonur na raketách Sojuz vstříc výzkumům.

5.1 Přístrojové vybavení

Všechny čtyři družice nesou stejné vědecké vybavení - sadu 11 přístrojů vážících dohromady 71 kg a sloužících k měření magnetického a elektrického pole a nabitých částic. Družice létají v tetraedrickém uspořádání s rozestupy od několika set km po několik poloměrů Země. Toto uspořádání nám umožňuje dívat se na časový i prostorový vývoj sledovaných jevů, což je neocenitelná výhoda oproti jednodružicovým měřením. Perioda oběhu se pohybuje okolo 57 hodin a eliptická polární dráha má perigeum 19 000 km a



Obrázek 5.1: Orbita družic Cluster s vyznačenými oblastmi, které družice protínají - kasy (cusp), magnetický ohon (tail), rázová vlna (bow shock) a magnetopauza. Ze středu přichází sluneční vítr. Převzato z <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=24451>.

apogeum 119 000 km. V oblasti perigea prochází družice plazmasférou, kde se vyskytují emise typu rovňkový šum. Díky tomu, že Země obíhá kolem Slunce, tak mohou družice měřit jak ve slunečním větru mimo magnetosféru, tak v magnetickém ohonu (viz. obrázek 5.1).

V této práci jsme při analýze používali data z těchto tří přístrojů:

EFW (Electric Field and Wave experiment)

Tento přístroj slouží k měření fluktuací elektrického pole v plazmatu. Sestává se ze čtyř sond umístěných na 50 m dlouhém kovovém lanku tvořících dvouosé měření elektrického pole v rovině rotace družice.

STAFF (Spatio-Temporal Analysis of Field Fluctuation experiment)

Jednou ze součástí tohoto přístroje je tříosý cívkový magnetometr umístěný na 5 m dlouhém rameni měřící fluktuace magnetického pole od 0,1 Hz do

4 kHz. Nízkofrekvenční data se zpracovávají na zemi, zatímco data pro vyšší frekvence jsou zpracovávány přímo na palubě a to dvěma přístroji spektrálním analyzátozem (STAFF-SA) a analyzátozem vlnových forem, které jsou také součástí STAFF experimentu. My jsme čerpali data ze STAFF-SA, který přijímá signál z magnetometru a elektrických antén. Časové rozlišení dat v režimu *normal mode* je 4s a v režimu *burst mode* je to 1s. Na palubě z dat vytváří spektrální matice a ty přeposílá na zem.

WBD (Wide Band Data instrument)

Přístroj byl skonstruován k poskytnutí měření elektrického a magnetického pole s vysokým rozlišením. Při zpracování přijímá signál pouze z jedné elektrické antény nebo magnetické antény. Na palubě vznikající vlnové formy jsou digitalizovány a přenášeny na zem, kde se následně zpracovávají. Přístroj pracuje ve třech frekvenčních rozsazích 25 Hz - 9,5 kHz, 1 - 77 kHz a 50 Hz - 19 kHz. Pro naše účely (rovníkový šum se vyskytuje na frekvencích několika hertz až několika stovek hertz) je nejzajímavější oblast do 9,5 kHz. V tomto pásmu je zpracováván signál vzorkován s frekvencí 27,4 kHz, což je nejnižší poskytovaná vzorkovací frekvence.

Kapitola 6

Analýza dat

6.1 Metody pro analýzu šíření elektromagnetických vln

S dokonalejší technikou se vylepšují i přístroje pro vlnová měření. V dnešní době je potřeba zpracovávat vícesložková měření. V případě družic Cluster je vektor magnetického pole tříložkový (STAFF) a elektrické pole je měřeno dvěma anténami (EFW). S těmito daty můžeme zjistit vlastnosti šířící se vlny jako např. elipticitu, planaritu, polarizaci, směr vlnového vektoru a směr os polarizačního elipsoidu a vytvořit tak výkonová spektra a spektrogramy. Předpokládáme-li, že vlna je rovinná ve tvaru 2.1 s frekvencí $\omega = 2\pi f$, pak z rovnice 2.28 plyne, že \vec{B} je vždy kolmé jak na vlnový vektor, tak na \vec{E} . Kolmost na vlnový vektor je také výsledkem další z Maxwellových rovnic 2.7:

$$\vec{B} \cdot \vec{k} = 0 . \quad (6.1)$$

Tato rovnice může sloužit k zjištění směru vlnového vektoru. Jedna z metod je založena na analýze minimální odchylky magnetických fluktuací [19]. Tato metoda přímo pracuje s vlnovými formami a předpokládá měření v úzkém frekvenčním pásu a nebo požaduje neměnnost vlnového vektoru s frekvencí.

Další způsob jak zjistit směr \vec{k} je založen na vícerozměrné spektrální analýze vektoru fluktuací pole. Všechny známé praktické aplikace se však týkají pouze vektoru magnetického pole.

6.1.1 Singulární rozklad magnetické spektrální matice

Vícerozměrná spektrální analýza je základem pro metodu SVD (Singular Value Decomposition) [20], kterou lze snadno rozšířit pro simultání zpracování elektrického i magnetického pole, což umožňuje zjistit nejen plně definovaný vlnový vektor, ale také vlnové číslo a elektromagnetickou planaritu.

Postupným vynásobením 6.1 třemi křezskými složkami vektoru \vec{B}^* komplexně sdruženému k \vec{B} dostaneme tři vzájemně závislé komplexní rovnice

$$\sum_{i=1}^3 B_i B_j^* k_i = 0, \quad j = 1 \dots 3, \quad (6.2)$$

kde výrazy $B_i B_j^*$ mohou být napsány jako komponenty hermitovské spektrální matice S_{ij} . Pro praktické užití SVD metody přepíšeme rovnice 6.2 na homogení systém šesti reálných rovnic

$$\mathbf{A} \cdot \vec{k} = 0, \quad (6.3)$$

kde \mathbf{A} je reálná matice 6×3 utvořena jako superpozice reálné a imaginární části matice S_{ij} :

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \Re S_{11} & \Re S_{12} & \Re S_{13} \\ \Re S_{12} & \Re S_{22} & \Re S_{23} \\ \Re S_{13} & \Re S_{23} & \Re S_{33} \\ 0 & -\Im S_{12} & -\Im S_{13} \\ \Im S_{12} & 0 & -\Im S_{23} \\ \Im S_{13} & \Im S_{23} & 0 \end{pmatrix}. \quad (6.4)$$

Ze sady rovnic 6.3, z nichž pouze dvě jsou nezávislé, můžeme určit pouze směr vlnového vektoru, ne jeho velikost. Dokonce nemůžeme rozlišit mezi dvěma antiparalelními vektory, neboť rovnice 6.3 může být vynásobena beze změny jakýmkoli (kladnými i zápornými) reálnými koeficienty. Řešením tedy může být pouze bod na povrchu jednotkové polokoule, který bude plně určen převedením do sférických souřadnic polárním úhlem θ (odklon od magnetického pole \vec{B}_0) a azimutálním úhlem ϕ (poloha vůči Zemi). Nahradíme-li nyní idealizovanou matici \mathbf{A} maticí $\hat{\mathbf{A}}$, která bude obsahovat místo idealizované hermitovské spektrální matice \mathbf{S} její experimentální protějšek $\hat{S}_{ij} = \langle \hat{B}_i \hat{B}_j^* \rangle$ (závorky $\langle \rangle$ znamenají výsledný průměr z postupně braných časových intervalů, kde odhadované \hat{B}_i je počítáno z konečné časové

posloupnosti reálného vzorkování každé složky i), pak pozměněná rovnice 6.3 bude mít nyní tvar

$$\hat{\mathbf{A}} \cdot \hat{\boldsymbol{\kappa}} = 0 . \quad (6.5)$$

Pokud jsou v 6.5 více jak tři nezávislé rovnice, což je téměř vždy, neboť zachycená vlna není většinou ideálně rovinná, pak není možné zjistit vektor $\hat{\boldsymbol{\kappa}}$, který by zároveň řešil všech šest rovnic. Namísto toho se hledá sloupcový vektor $\hat{\boldsymbol{\kappa}}$, který dává minimální modul šestirozměrného vektoru $\hat{\mathbf{A}} \cdot \hat{\boldsymbol{\kappa}}$. Právě zde využijeme SVD metodu k rozkladu matice $\hat{\mathbf{A}}$

$$\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{V}^T , \quad (6.6)$$

kde \mathbf{U} je matice 6×3 s ortonormálními sloupci, \mathbf{W} je diagonální matice 3×3 tří nezáporných singulárních hodnot and \mathbf{V}^T je matice 3×3 s ortonormálními řádky. Pokud seřadíme tři diagonální hodnoty matice \mathbf{W} podle velikosti ($w_3 \geq w_2 \geq w_1$), pak planarita magnetického pole bude definována jako

$$F = 1 - \sqrt{\frac{w_1}{w_3}} \quad (6.7)$$

a polarizace

$$L_p = \frac{w_2}{w_3} . \quad (6.8)$$

Pokud je L_p blízké jedné, pak polarizace je kruhová, pokud se blíží nule, pak polarizace je lineární.

6.2 PRASSADCO

PRASSADCO (**PR**opagation **A**nalysis of **STAFF-SA** **D**ata with **CO**herency tests) [21] je program, napsaný v jazyce IDL, který počítá vlastnosti elektromagnetických vln z měření jejich fluktuací elektrického a magnetického pole. Jeho hlavním úkolem je usnadnit analýzu dat z přístroje STAFF-SA na družicích Cluster. Nicméně umí zpracovávat také jakákoli data obsahující tříosé měření magnetického pole. Zpracování probíhá v dané frekvenční oblasti a je předpokládána předchozí spektrální analýza. Vstupními daty jsou spektrální matice, směr elektrických antén, výkonově-spektrální hustoty a další pomocné informace. Tyto data jsou zpracovávány různými metodami (patří mezi ně také SVD metoda), které vedou ke zjištění polarizace a parametrů šíření, stejně tak jako směru vlnového vektoru, Poyntingova vektoru a indexu lomu. Výsledky mohou být prezentovány v několika vizuálních či numerických formátech.

6.3 wbd2psd

Program `wbd2psd`, taktéž napsaný v jazyce IDL slouží k převádění dat z přístroje WBD do souborů `.psd`, které se následně dají přímo zpracovat programem PRASSADCO. Vstupními daty je začátek a konec požadovaného intervalu, mód neboli pro jaké frekvenční pásmo chceme data zpracovávat a číslo družice. Při zpracování jsou dále potřeba pomocná data, která umožňují vykreslovat výsledky ve správných souřadnicích.

Kapitola 7

Získané výsledky a jejich diskuze

7.1 Seznam časových intervalů pro rovníkový šum

Jak bylo řečeno v úvodu, tato práce se zabývá rozbohem dat z družic Cluster pro data ze dvou palubních přístrojů a to spektrálního analyzátoru STAFF-SA a přístroje WBD poskytujícího data s vysokým rozlišením elektrického i magnetického pole. Zaměřili jsme se na období mezi lednem 2002 a prosincem 2007. Pro hlubší analýzu bylo třeba sestavit seznam časových intervalů, kdy byl pozorován RŠ na družicích procházejících rovníkem. Časy, kdy družice protínala rovník, jsme čerpali z již existujícího seznamu, kde mimo jiné byly obsaženy i přibližné časy průchodů družice C3 (později C4) (seznam je k vidění na <http://babeta.ufa.cas.cz/santolik/staff-sa/>). Tento seznam byl vytvářen z Quicklooku¹ a byl tedy pouze přibližný. V některých obdobích se družice od sebe natolik vzdálily, že čas průchodu rovníkem se mezi jednotlivými družicemi lišil až v řádu několika hodin, proto byla potřeba občasná časová korektura. Vzhledem k tomu, že v seznamu byla zahrnuta každá družice zvlášť, znesnadňovala tato časová nesrovnalost najít pro dané družice přesný čas průchodu.

¹Přehledová data pro družici C3 (od dubna 2003 pro družici C4) rozdělena do šestihodinových intervalů s malým časovým i frekvenčním rozlišením. V quickloocích jsou např. spektrogramy magnetického a elektrického pole pro STAFF-SA, orbita či velikost magnetického pole (http://www.cluster.rl.ac.uk/csdsweb-cgi/csdsweb_pick).

Seznam byl tvořen pro každý přístroj zvlášť, neboť data v daném frekvenčním rozsahu jsou na STAFFu zpracovávána kontinuálně, naopak na přístroji WBD se střídají čtyři módy pro různé frekvenční rozsahy. Při vytváření seznamů jsme nejdříve zjistili, z výše zmíněné databáze, čas průchodu družice C3 (později C4) rovníkem. Pak z databáze *.png souborů pro přístroj STAFF-SA² (viz obrázky 7.1 až 7.4) jsme vybrali soubor pro daný čas a vizuálně podle daných kritérií popsaných níže jsme určili, zda šum na družici byl zaznamenán či ne. Pokud ano, zapsali jsme časový interval do seznamu pro STAFF. Následně jsme se podívali do seznamu časových intervalů pro přístroj WBD, kde se nacházely informace, které udávaly, kdy a v jakém módu přístroj měřil. Pokud pro daný interval existovala data v daném frekvenčním rozsahu (pro naši potřebu v rozsahu 25 Hz až 9,5 kHz) pro elektrickou nebo magnetickou složku, pak byl daný časový interval i s módem přidán do seznamu pro WBD. Ukázky textových souborů, které reprezentují naše seznamy jsou vidět v tabulkách 7.1 a 7.2.

Výběrová kritéria, které musely splňovat všechny události zaznamenané v obou seznamech, byly určeny z předchozích publikovaných výsledků, které byly diskutovány v kapitole 3.3 a jsou následující:

- Píky magnetické i elektrické výkonově-spektrální hustoty musí ležet do 3° od geomagnetického rovníku.
- Fluktuaace magnetického pole musí být blízce lineárně polarizované a elipticita musí být maximálně v rozmezí $-0,2$ až $0,2$.
- Emise musí být viditelné jak v magnetickém tak elektrickém poli (RŠ je elektromagnetická vlna) a spodní hranice pro magnetickou intenzitu je $10^{-6} \text{ nT}^2 \text{ Hz}^{-1}$, respektive elektrickou intenzitu $10^{-5} \text{ mV}^2 \text{ m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$.

Na obrázcích 7.1 až 7.4 jsou ukázky spektrogramů, ze kterých jsme dle daných kritérií vybírali hledané emise. Pro přehlednost jsme neukázali všechny panely pro všechny družice, ale jen ukázkově jsme uvedli potřebné informace (viz 7.1) pro jednu družici. Obrázky 7.1 a 7.4 jsou pro družici C3, druhé dva jsou pro družici C4. Jak již bylo řečeno, údaje pro osu x byly uváděny pro C3, a proto neleží intenzivní pík emise v obr. 7.2 a 7.3 na rovníku ($MLAT = 0$). Naopak u obr. 7.1 a 7.4 leží pík přibližně na rovníku.

²V databázi jsou obsaženy zvlášť spektrogramy pro šíření pro polarizaci a časově-frekvenční spektrogramy. V každém časovém intervalu pro daný spektrogram jsou uvedeny data pro všechny čtyři družice dohromady. Informace na ose x jsou počítána pouze pro družici C3.

Časové intervaly rovníkového šumu pro přístroj STAFF-SA			
Poznámka: 1...slabá emise, špatně viditelná ve spektrogramu nebo v elipticitě 2...bez B (elipticita neexistuje, pouze výkonové spektrum) 3...zvláštní emise			
			pozn.
4	2002-03-13T16:41:00	2002-03-13T16:53:00	2
1	2002-03-18T10:43:00	2002-03-18T10:55:00	
2	2002-03-18T10:44:30	2002-03-18T10:56:00	
3	2002-03-18T10:43:30	2002-03-18T10:56:00	
4	2002-03-18T10:43:30	2002-03-18T10:55:00	
1	2002-03-30T07:51:00	2002-03-30T08:23:00	3
2	2002-03-30T07:52:00	2002-03-30T08:23:30	3
...			
3	2002-07-05T21:52:00	2002-07-05T22:00:00	1
4	2002-07-05T21:24:00	2002-07-05T21:27:00	1

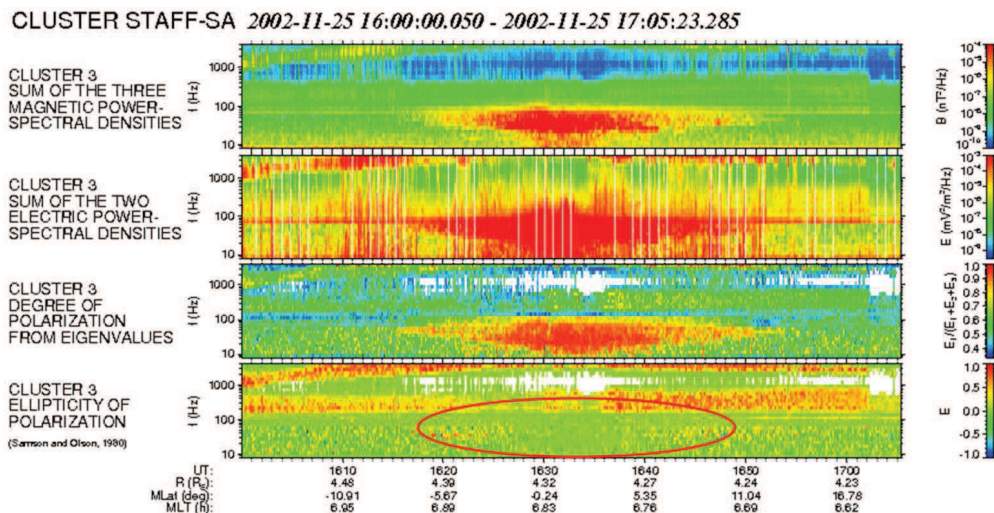
Tabulka 7.1: Ukázka ze seznamu časových intervalů, kdy byl zaznamenán rovníkový šum na přístroji STAFF-SA. Sloupce zleva: číslo družice, čas začátku emise, čas konce emise, poznámka: 1 - emise má nízkou intenzitu; 2 - během záznamu RŠ neběžel přístroj pro měření magnetického pole (cívkový magnetometr); 3 - tvar emise nemá typickou formu (viz 7.2).

Časové intervaly rovníkového šumu pro přístroj WBD			
Poznámka: 1...slabá emise, špatně viditelná ve spektrogramu nebo v elipticitě 2...bez B (elipticita neexistuje, pouze výkonové spektrum) 3...zvláštní emise			
			pozn.
wbd2psd,	'2002-01-03T17:47:00.000',	'2002-01-03T17:53:00.000',	2380,sc=[4] 1
wbd2psd,	'2002-01-08T11:54:30.000',	'2002-01-08T12:10:00.000',	2380,sc=[2]
wbd2psd,	'2002-01-08T11:48:00.000',	'2002-01-08T11:59:00.000',	2380,sc=[4]
...			
wbd2psd,	'2002-03-30T07:51:00.000',	'2002-03-30T08:23:00.000',	2380,sc=[1] 3
wbd2psd,	'2002-03-30T07:52:00.000',	'2002-03-30T08:23:30.000',	2380,sc=[2] 3
wbd2psd,	'2002-03-30T07:51:30.000',	'2002-03-30T08:23:00.000',	2380,sc=[3] 3
wbd2psd,	'2002-03-30T07:51:30.000',	'2002-03-30T08:23:00.000',	2380,sc=[4] 3

Tabulka 7.2: Totéž co v 7.1 tentokrát pro přístroj WBD a s rozdílem, že první sloupec slouží k volání procedury wbd2psd, čtvrtý sloupec říká, v jakém módu chceme data zpracovávat a pátý sloupec znamená číslo družice.

Poznamenejme k pojmu stupeň polarizace, který říká, jak moc je vlna polarizovaná (0 znamená vlnu nepolarizovanou a 1 vlnu silně polarizovanou), že

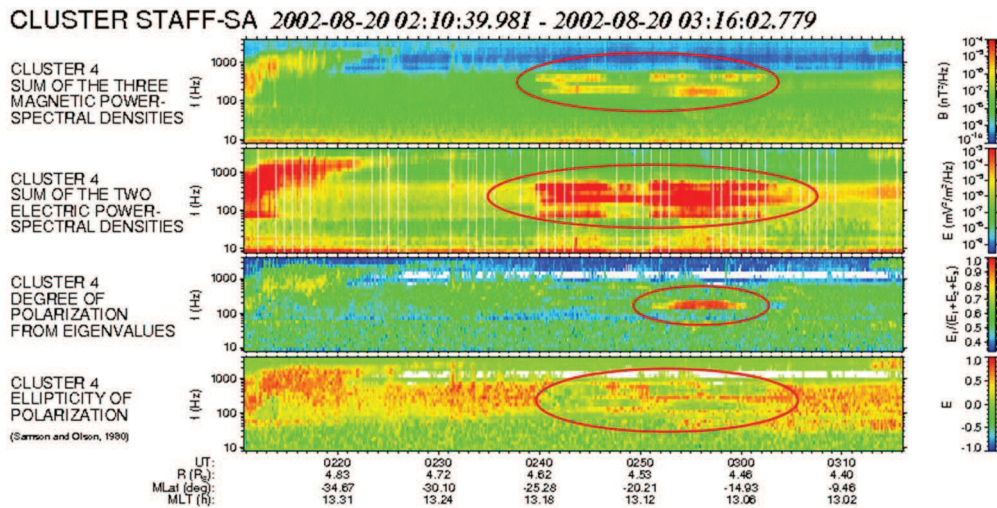
informace plynoucí z tohoto panelu jsme občas užívali k identifikaci sporných či méně viditelných případů. Neboť fluktuace magnetického pole jsou silně lineárně polarizované, měla by být v oblasti, kde byla vlna pozorována vidět žlutá či spíše červená flek. Tato věta je obzvláště vypečená, jako snad i štrůdl (aspoň tedy doufám).



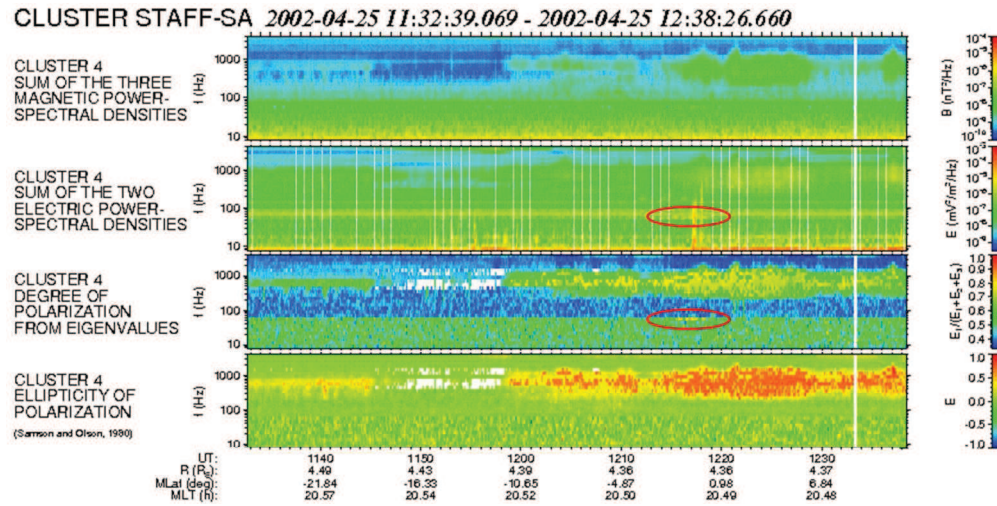
Obrázek 7.1: Ukázka souboru z databáze STAFF. Panely shora: výkonově-spektrální hustota magnetického a elektrického pole, stupeň polarizace a elipticita. Poslední dva panely jsou počítány pro data z magnetického pole. Na ose x je světový čas, vzdálenost od Země v R_E , magnetická šířka a magnetický lokální čas. Tyto údaje jsou vždy uváděny pro Cluster 3. Uvedená emise splňuje všechny kritéria. Zakroužkovaná oblast ukazuje, kde jsme vlnu považovali lineárně polarizovanou, což vyjadřuje zelená barva ($L_p \cong 0$).

Jelikož výběr probíhal vizuálně, docházelo někdy k případům, kdy odpověď na to, zda emisi zařadit do seznamu či ne, nebyla zcela jednoznačná. Jako příklad si uveďme emisi na obrázku 7.3. V čase 12:14 až 12:19 je v panelu ukazující intenzitu elektrického pole patrná nějaká slabší emise (červeně zakroužkovaná oblast). V tomtéž čase je ve třetím panelu vidět výrazně (oproti pozadí) žlutočervená oblast (taktéž červeně zakroužkovaná), což svědčí o tom, že v daném místě se zřejmě nachází polarizovaná vlna. Dokonce na panelu elipticity je vidět v daném čase zelená oblast - lineární polarizace. Všechny prozatím uvedené informace odpovídají tomu, že emise v námi zkoumaném časovém intervalu je opravdu RŠ. Ale z důvodu slabé intenzity v magnetickém poli, nebylo toto kritérium splněno a tato emise

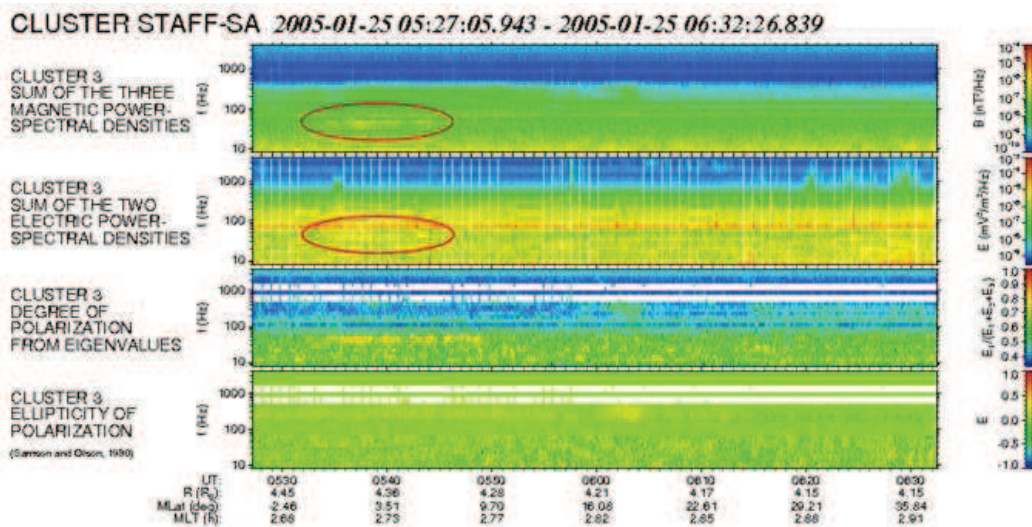
tudíž nemohla být zahrnuta do seznamu.



Obrázek 7.2: Totéž co na obrázku 7.1. Tentokrát však ukázka emise, která nemá typickou formu. Zakroužkované oblasti ukazují, kde jsme vlnu považovali za viditelnou. Z panelu elipticity je vidět, že polarizace je opravdu téměř lineární.



Obrázek 7.3: Totéž co na obrázku 7.1. Tentokrát však ukázka emise, která nebyla přidána do seznamu.



Obrázek 7.4: Totéž co na obrázku 7.1. Tentokrát však ukázka emise, která je velmi slabá, ale přesto splňuje všechna kritéria, a proto byla přidána do seznamu.

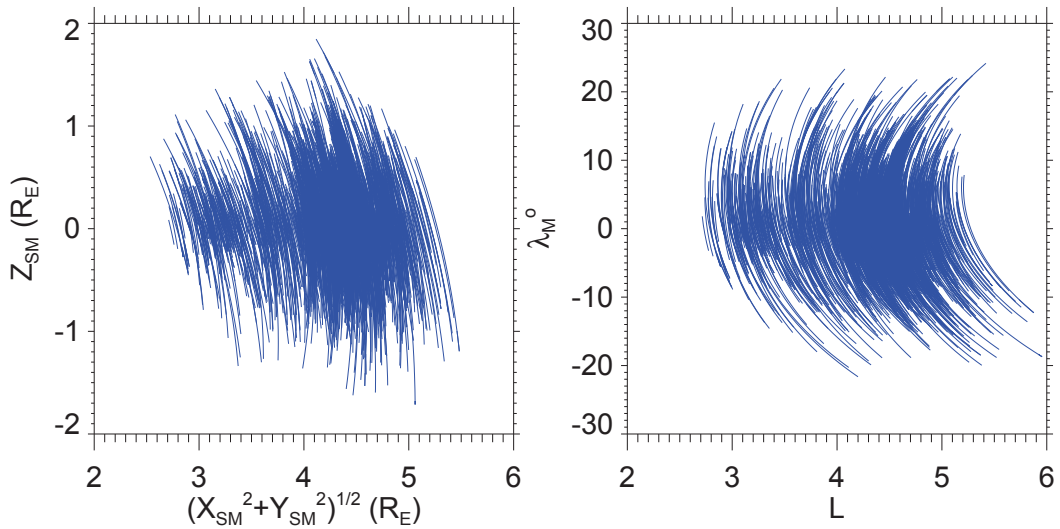
7.2 Rozbor dat z přístroje STAFF-SA

Seznamy časových intervalů byly dělány pro každý rok zvlášť. V tabulce 7.3 je uvedena statistika pro všechny zpracované roky pro přístroj STAFF-SA. Celkově jsme zaznamenali 920 průchodů rovníkem (jeden průchod rovníkem znamená průchod všech 4 družic v rámci jednoho oběhu), z toho pro 58 nebyla k dispozici žádná data, tzn. že buď přístroje na žádné z družic zrovna neměřily a nebo došlo k chybě při přenosu dat nebo při jejich pozdějším zpracování. Celkově v průběhu šesti let bylo nalezeno 589 případů emisí typu RŠ, z čehož plyne, že šum byl průměrně zaznamenán v 68% průchodů rovníkem. Tento výsledek se přibližně shoduje s předchozí statistickou analýzou. Ještě poznamenejme, že událost byla započítána, pokud emise byla viditelná alespoň na jedné z družic.

Z obrázků 7.5 a 7.7 je patrné, že rovníkový šum se převážně vyskytuje do 10° od rovníku. V extrémních případech do 20° od rovníku. Tyto krajní případy odpovídaly relativně velmi silným emisím, trvajícím v některých případech i přes hodinu. To mohlo být způsobeno tím, že zdrojová oblast dané emise byla v relativní blízkosti družice, takže nedošlo k téměř žádnému utlumení. Dalším vysvětlením může být geomagnetická bouře, při které vzrůstá kruhový proud a ionty mohou předávat interakcí s vlnou více energie

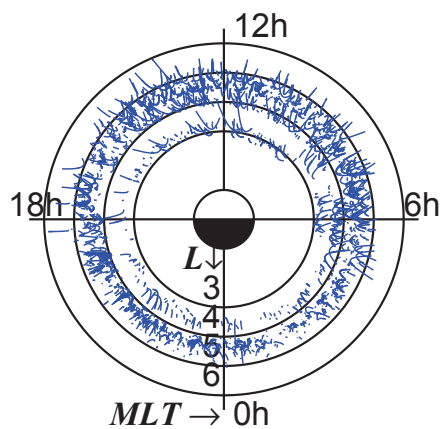
	průchody rovníkem	žádná data	naměřené události	míra výskytu [%]
2002	154	15	80	58
2003	153	2	109	72
2004	154	16	93	67
2005	153	8	125	86
2006	154	9	106	73
2007	152	8	76	53
celkem	920	58	589	68

Tabulka 7.3: Srovnání statistických údajů pro leden 2002 až prosinec 2007 pro přístroj STAFF-SA. Sloupce zleva: rok; počet průchodů rovníkem v daném roce; počet případů, kdy nebyla k dispozici žádná naměřená data; počet případů, kdy byl RŠ naměřen; procentuální míra výskytu. Událost byla do tabulky započítána, pokud emise byla viditelná alespoň na jedné z družic.

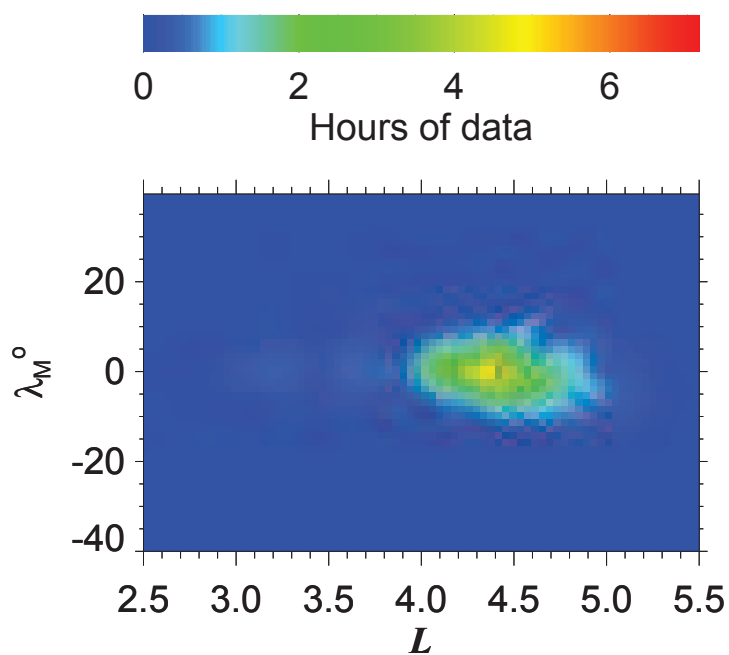


Obrázek 7.5: V levém grafu je poloha družice v závislosti na vzdálenosti na ose z (osa dipólu) a vzdálenosti v rovině x, y (rovina geomagnetického rovníku) v souřadnicové soustavě SM. V pravém grafu je poloha družice v závislosti na McIlwainově parametru L a magnetické šířce.

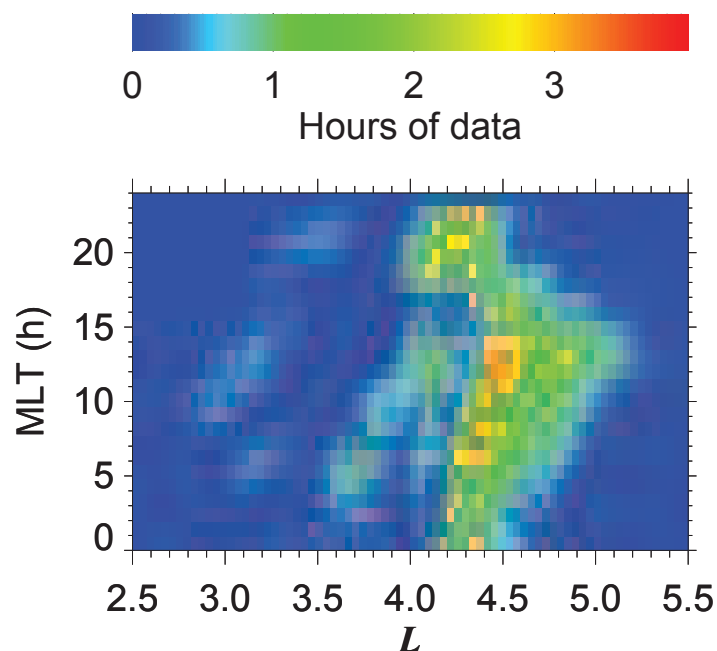
a způsobit částečnou změnu směru vlnového vektoru, díky které se vlny mohou dostat dále od rovníku. V roce 2007 se družice dostaly blíže k Zemi,



Obrázek 7.6: Polární diagram výskytu rovníkového šumu v závislosti na magnetickém lokálním čase a McIlwainově parametru L .



Obrázek 7.7: Densitogram výskytu RŠ mezi lednem 2002 až prosincem 2007 v závislosti na magnetické šířce a McIlwainově parametru L .



Obrázek 7.8: Totéž co na obrázku 7.7 tentokrát v závislosti na magnetickém lokálním čase.

přibližně na vzdálenosti 2,5 až 3,5 R_E . Proto je na všech obrázcích, pro tyto L , vidět několik událostí. Densitogramy 7.7 a 7.8 vypovídají kolik hodin strávily družice v daném místě měření RŠ.

Levý graf na obrázku 7.5 je vykreslen pro souřadnicovou soustavu $SM - Solar Magnetic$. V této soustavě směřuje osa z k severnímu magnetickému pólu a osa y směřuje na večerní stranu kolmo ke spojnici Země-Slunce. Osa x je pak dopočtena tak, aby soustava tvořila pravoúhlý pravotočivý systém.

V některých publikacích je uvedeno, že RŠ se vyskytuje převážně na večerní straně. Z našich měření je však vidět (viz obr. 7.8), že RŠ se vyskytuje na všech magnetických lokálních časech.

7.3 Analýza jemné spektrální struktury pro data z WBD

Statistické srovnání výsledků dosažených analýzou dat z přístroje WBD je uvedeno v tabulkách 7.4 a 7.5. Tabulka 7.4 byla vytvořena stejnou metodou

jako tabulka 7.3, tedy událost byla započítána, pokud emise byla viditelná alespoň na jedné z družic. Během šesti let bylo na přístroji WBD naměřeno 88 případů RŠ. Srovnáme-li tento výsledek s počtem naměřených emisí na STAFFu, tak data z WBD pro daný mód existovala v průměru pouze pro 15% z celkového množství zachycených emisí. Nutno ještě dodat, že ne vždy jsme měli data z WBD pro všechny 4 družice. Tento fakt také plyne ze srovnání prvního sloupce tabulek 7.4 a 7.5. V tabulce 7.4 byla událost započítána, pokud emise byla viditelná alespoň na jedné z družic. Tedy pokud jsme událost započítali jako bychom předpokládali, že emise vidíme na všech čtyřech družicích. Vynásobíme-li tyto hodnoty z prvního sloupce tabulky 7.4 čtyřmi, pak např. pro roce 2002 by mělo být zaznamenáno 56 emisí, ale reálně jich je, jak ukazuje tabulka 7.5 pouze 43. Z tohoto plyne, že případů, kdy data z WBD existují ve správném módu pro všechny čtyři družice je velmi málo.

Přístroj WBD poskytuje data z vysokým frekvenčním i časovým rozlišením, což nám umožnilo provést analýzu spektrální struktury zaznamenaných emisí. Ze seznamu pro WBD jsme pomocí programu wbd2psd a PRASSADCO vyrobili spektrogramy, které jsme posléze zpracovali pomocí programu Interval. Zpracování probíhalo ručně a to způsobem odečítání hodnot frekvencí spektrálních čar (dále jen SČ) přímo ze spektrogramů. Na obrázcích 7.9 a 7.10 jsou ukázky dvou spektrogramů, ze kterých se SČ odečítaly. U mnoha spektrogramů se stávalo, že hodnota frekvence dané SČ se s časem měnila (viz obr. 7.9). Proto jsme v takovýchto případech hodnoty frekvence vybírali pouze v jednom časovém okamžiku. V obr. 7.9 je tento čas označen červenou šipkou. Pro tyto dva dny jsme z identifikovaných frekvencí vykreslili dva grafy (obrázky 7.11 a 7.12), na kterých je na ose y hodnota frekvence SČ a na ose x příslušné harmonické číslo. Harmonická čísla jsme přiřazovali následujícím způsobem: vzali jsme všechny zjištěné frekvenční vzdálenosti SČ pro daný den a zjistili, která vzdálenost je nejčastější a tu jsme položili rovnu charakteristické cyklotronové frekvenci. Harmonické koeficienty jsme pak pro danou hodnotu frekvence zjistili tak, že jsme viděli tuto hodnotu velikostí zjištěné cyklotronové frekvence a zaokrouhlené vzniklé číslo jsme přiřadili dané frekvenci jako její harmonické číslo. Body jsou proloženy přímkou $y = Ax$. Chybu v určování hodnoty frekvence SČ jsme odhadli na 0,6 Hz. Tato hodnota byla započtena do směrodatné odchylky parametru A , který určuje charakteristickou iontovou cyklotronovou frekvenci oblasti, kde vlny interagovaly s ionty. Rovnice lineárního fitu je uvedena v rámci grafů pro každý den zvlášť. Je vidět, že

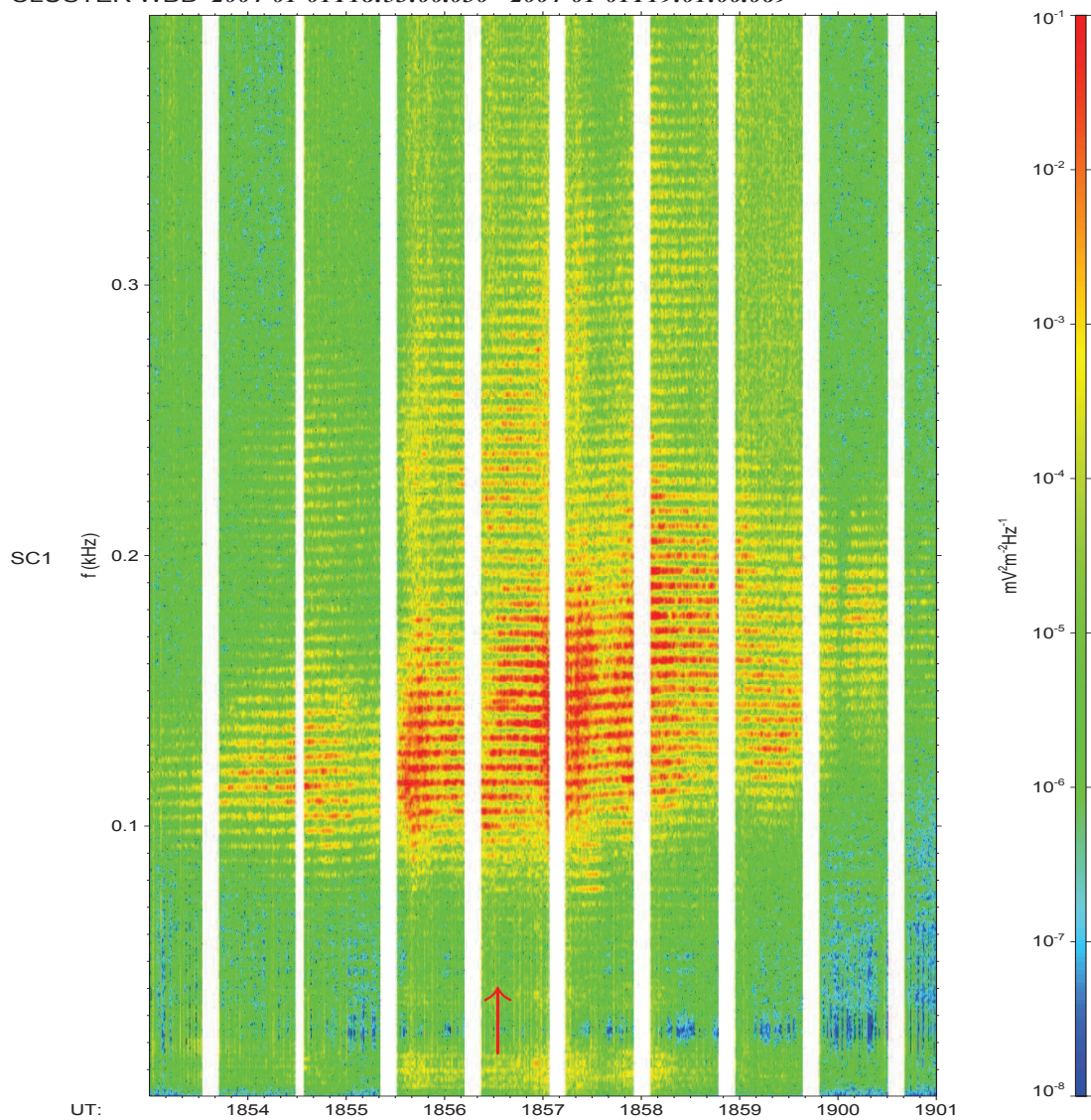
	naměřené události	viditelnost spektrálních čar	pravděpodobnost [%]
2002	14	14	100
2003	16	16	100
2004	17	17	100
2005	11	7	64
2006	15	12	80
2007	15	10	67
celkem	88	76	85

Tabulka 7.4: Srovnání statistických údajů pro leden 2002 až prosinec 2007 pro přístroj WBD. Sloupce zleva: počet emisí naměřených v módu 25 Hz - 9,5 kHz; viditelnost spektrálních čar; procentuální poměr případů, kdy byla zřetelná spektrální struktura ku všem případům zaznamenaných v seznamu. Stejně jako v předchozí tabulce 7.3 i zde jsme událost započítali byla-li viděna alespoň na jedné z družic.

	naměřené události	viditelnost spektrálních čar	pravděpodobnost [%]
2002	43	43	100
2003	45	45	100
2004	48	48	100
2005	30	17	57
2006	30	23	77
2007	30	22	73
celkem	226	198	84

Tabulka 7.5: Totéž jako v tabulce 7.4, ale každá družice byla tentokrát brána individuálně.

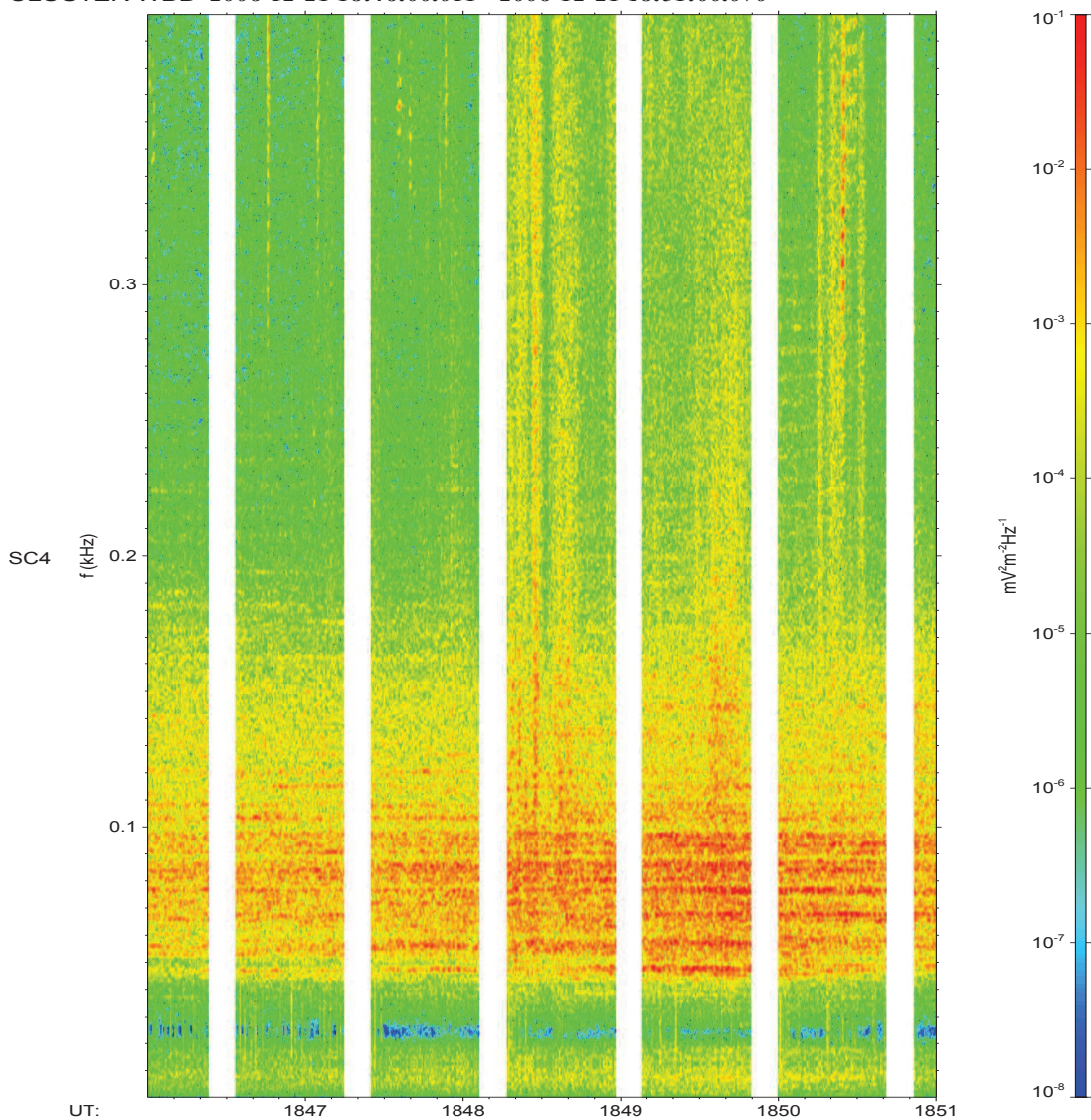
CLUSTER WBD 2004-01-01T18:53:00.030 - 2004-01-01T19:01:00.069



WBD mode: E9.5 kHz Sampling frequency: 27.4430 kHz Samples: 1129240 Data (ms): 41148.5 Gaps (ms): 10326.9
Processed Thu Apr 30 15:08:12 2009 by wbd2psd(2008-08-04 DownSam:4 FFT:16384 Data:8192 Aver:1 Shift:128 Expa:1)
Plot created Thu Apr 30 15:56:27 2009 by PRASSADCO(2007Jun17).

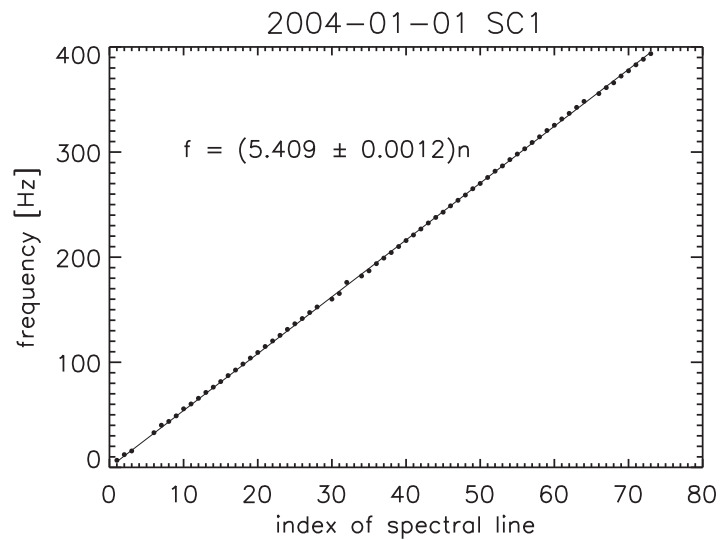
Obrázek 7.9: Frekvenčně-časový spektrogram elektrického pole ze dne 1.1.2004 z přístroje WBD.

CLUSTER WBD 2006-12-21 18:46:00.011 - 2006-12-21 18:51:00.070

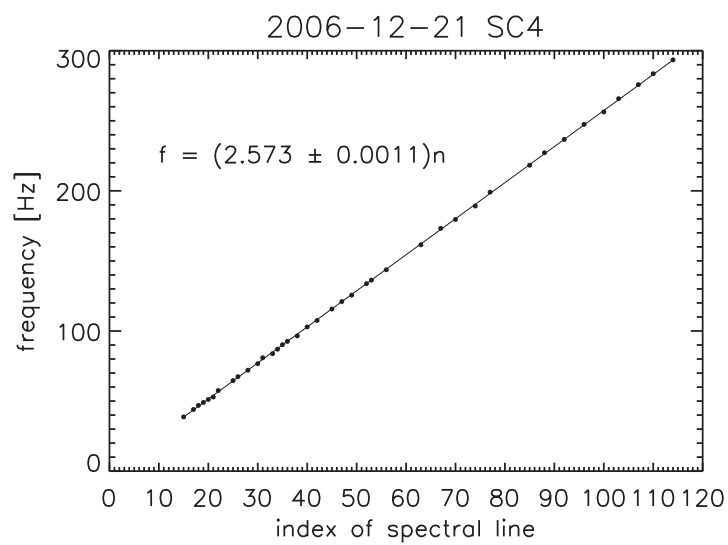


WBD mode: E9.5 kHz Sampling frequency: 27.4430 kHz Samples: 1129240 Data (ms): 41148.5 Gaps (ms): 10326.9
Processed Thu Mar 5 11:11:21 2009 by wbd2psd(2008-08-04 DownSam:4 FFT:16384 Data:8192 Aver:1 Shift:128 Expa:1)
Plot created Thu Apr 30 16:04:28 2009 by PRASSADCO(2007Jun17).

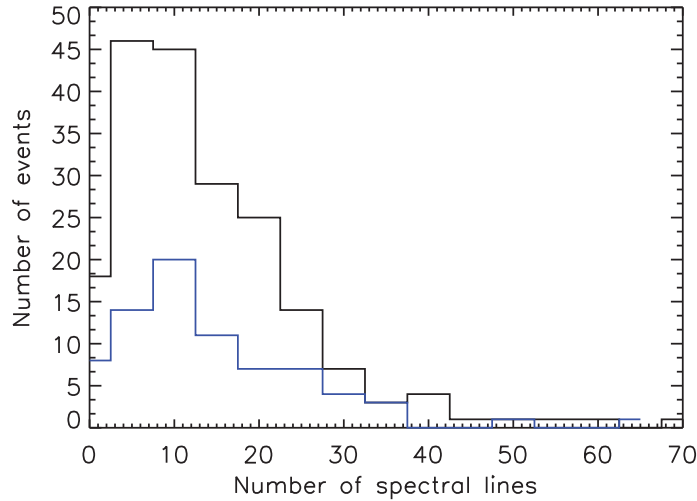
Obrázek 7.10: Frekvenčně-časový spektrogram elektrického pole ze dne 21.12.2006 z přístroje WBD.



Obrázek 7.11: Identifikované frekvence spektrálních čar pro emisy ze spektrogramu 7.9 jako funkce harmonických koeficientů.



Obrázek 7.12: Identifikované frekvence spektrálních čar pro emisy ze spektrogramu 7.10 jako funkce harmonických koeficientů.



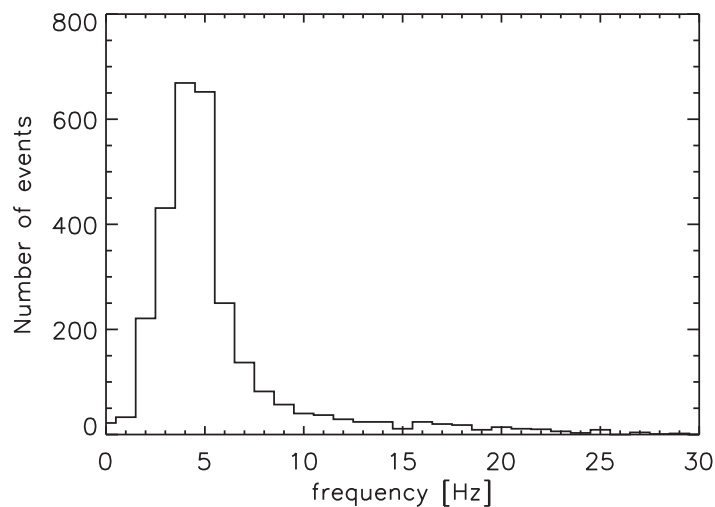
Obrázek 7.13: Histogram počtu identifikovaných spektrálních čar pro každou emisi samostatně (černou) a pro průměrnou hodnotu ze všech emisí, které byly zaznamenány během jedné orbity (modrou).

hodnota chyby parametru A je velmi malá, a to z toho důvodu, že pro obě emise bylo k dispozici ke zpracování velký počet SČ. To bohužel neplatilo pro všechny případy. Často se stávalo, že SČ byly velmi slabé, nebo naopak byla struktura natolik jemná, že se nedaly rozeznat jednotlivé intenzitní píky (např. obr. 7.10). V histogramu na obrázku 7.13 vidíme, že průměrná hodnota počtu SČ pro jednu emisi je 13. Tento výsledek je shodný jak pro zprůměrované hodnoty počtu SČ, tak pro hodnoty počtu SČ pro jednotlivé emise. Pro srovnání s průměrnou hodnotou je na obrázku 7.9 72 SČ. V grafu 7.12 je dále vidět, že s rostoucí frekvencí se zvětšují frekvenční intervaly mezi SČ. Tento trend se vyskytl také v mnoha dalších případech.

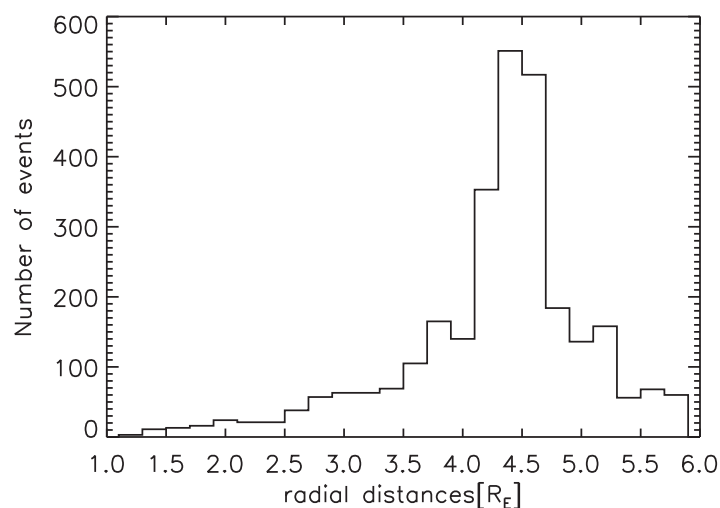
Předpokládáme-li interakci vlny s protony, pak použitím vztahu pro cyklotronovou frekvenci (rovnice 2.24) a vztahu pro výpočet magnetického pole dipólu v rovníkové rovině

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{R^3} \quad (7.1)$$

můžeme vypočítat polohu zdrojové oblasti vln. V rovnici 7.1 znamená M zemský magnetický dipólový moment, který má nyní hodnotu přibližně $M = 7,7 \times 10^{22} \text{ A/m}^2$. Pro graf 7.11 plyne z hodnoty parametru A , že radiální vzdálenost oblasti je $4,4 R_E$ a pro graf 7.12 je to $5,6 R_E$. Tento výpočet

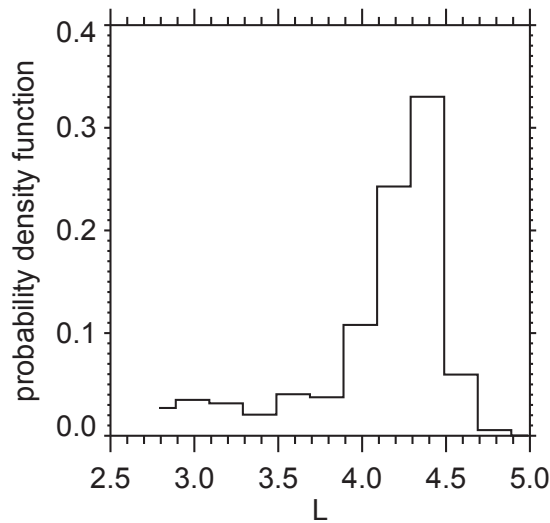


Obrázek 7.14: Histogram frekvenčních vzdáleností mezi spektrálními čarami.



Obrázek 7.15: Histogram radiálních vzdáleností zdrojových oblastí RŠ v rovníkové rovině.

jsme také provedli pro všechny zjištěné frekvenční intervaly (viz histogram na obrázku 7.14) v průběhu všech šesti let. Výsledné radiální vzdálenosti jsou vyneseny do histogramu na obrázku 7.15. Mediánem pro histogram frekvencí 7.14 je frekvence 4.5 Hz čemuž odpovídá radiální vzdálenost 4,5



Obrázek 7.16: Histogram vzdáleností družic jako parametru L pro případy z WBD seznamu, které vykazovaly viditelnost spektrálních čar, normovaný na všechny emise zaznamenané ve WBD seznamu.

R_E . Poznamenejme, že při vytváření histogramů v této podkapitole jsme předpokládali, že případy na sobě byly nezávislé i pokud byly zaznamenány v blízké časové či prostorové souslednosti. Z obrázku 7.15 plyne, že vlny zaznamenané na družici přišly převážně z oblasti vzdálené $4,5 R_E$. Pokud tento histogram srovnáme s histogramem na obrázku 7.16, který ukazuje polohu družice v závislosti na McIlwainově parametru L pro data naměřená na WBD, vidíme, že maxima se přibližně shodují. Tato shoda může mít dvojí vysvětlení. Pokud předpokládáme radiální šíření vln, pak prvním vysvětlením je, že na družicích jsou zachycovány převážně lokální vlny, tedy ty co vznikly v blízkém okolí družice. Ostatní vlny jsou natolik utlumeny, že na spektrogramech není žádná a nebo pouze omezená viditelnost SČ. Druhou možností je, že vlny se šíří k družici pouze azimutálně. Tuto možnost jsme však vyloučili, neboť víme, že RŠ se šíří jak azimutálně, tak radiálně (viz kapitola 3.3.2).

Kapitola 8

Závěr

V této práci jsme prezentovali výsledky analýzy dat z přístroje STAFF-SA a WBD pro data z oblasti geomagnetického rovníku. Oba přístroje byly umístěny na všech čtyřech družicích Cluster pohybujících se v tetraedrickém uspořádání a potínajících magnetický rovník ve výšce několika poloměrů Země (přesněji 2,5 - 6 R_E). Pro tyto data jsme sestavili seznamy (zvláště pro každý přístroj), ve kterých jsou zaznamenány časové intervaly naměřených emisí typu rovníkový šum. Oba seznamy pokrývají časový úsek od ledna 2002 do prosince 2007. Analýzou dat ze seznamu pro přístroj STAFF-SA jsme zjistili:

- Celkově bylo zaznamenáno v průběhu šesti let 920 průchodů rovníkem z toho v 589 případech byl naměřen rovníkový šum. Rovníkový šum byl tedy zaznamenán průměrně v 68% průchodů družic rovníkem.
- Rovníkový šum byl naměřen na všech lokálních magnetických časech uvnitř i vně plazmasféry.
- Převážně se emise vyskytovaly do 10° od rovníku. V extrémních případech až do 20° .

Pomocí seznamu pro přístroj WBD, kde vznikají data z vysokým časovým i frekvenčním rozlišením, jsme vytvořili pro všechny zaznamenané časové intervaly spektrogramy. Pomocí těchto spektrogramů jsme provedli analýzu spektrální struktury rovníkového šumu. Zjistili jsme:

- Spektrální struktura je vidět přibližně v 85% spektrogramů vykreslených z dat z přístroje WBD.

- Počet spektrálních čar vychází v průměru 13 na jednu emisi.
- Výsledky obdržené analýzou dat, při které událost byla započítána pokud byla viditelná alespoň na jedné družici, jsou téměř shodné s výsledky dosaženými analýzou dat pro každou družici odděleně.
- Nejčastější frekvenční vzdálenosti mezi spektrálními čarami jsou 5 Hz, což odpovídá radiální vzdálenosti zdrojové oblasti vln $4,5 R_E$, za předpokladu interakce s protony.
- Zdrojová oblast je přibližně stejná jako poloha družic při měření rovinného šumu. Převážně jsme identifikovali spektrální čáry z lokálně generovaných vln za předpokladu nenulové radiální složky Poyntingova vektoru.

Analýzou dat z relativně dlouhého časového období měření družic Cluster jsme dosáhli výsledků, jež nejen potvrzují, popřípadě vyvracejí výsledky uvedené v předchozích publikacích, ale také přinášejí (převážně díky datům s vysokým rozlišením z přístroje WBD) nové závěry, které již byly postupně prezentovány na konferenci AGU v prosinci 2008 v San Franciscu a EGU v dubnu 2009 ve Vídni.

Literatura

- [1] Chen F.F.: *Úvod do fyziky plazmatu*, Academia, Praha, 1984.
- [2] Sedlák B., Štoll I.: *Elektřina a magnetismus*, Academia, Praha, 2002.
- [3] Stix T.H.: *Waves in Plasmas*, American Institute of Physics, New York, 1992.
- [4] Horová Z.: *Diplomová práce - Demonstrace základních vlastností šíření vln na datech umělých družic*, Univerzita Karlova, Praha, 2007
- [5] Russel Ch.T., Holzer R.E., Smith E.J.: *OGO 3 Observations of ELF Noise in the Magnetosphere*, Journal of Geophysical Research *bf75* (1970).
- [6] Gurnett D.A.: *Plasma Wave Interactions With Energetic Ions Near the Magnetic Equator*, Journal of Geophysical Research **81** (1976).
- [7] Hrbáčková Z.: *Bakalářská práce - Studium hvizdů generovaných bleskovými výboji a analýza jejich průniku ionosférou*, Univerzita Karlova, Praha, 2006.
- [8] Macúšová E., *Diplomová práce - Analýza vln hvizdového modu z měření družic Cluster a Double Star*, Univerzita Karlova, Praha, 2006.
- [9] Krupař V., *Bakalářská práce - Analýza emisí typu "lví řev" měřených na umělých družicích*, Univerzita Karlova, Praha, 2006.
- [10] Laakso H., Junginger H., Roux A., Schmidt R., de Villedary C.: *Magnetoson Waves Above $f_c(H^+)$ at Geostationary orbit: GEOS 2 Results*, Journal of Geophysical Research **95** (1990) 10,609-10,621.

- [11] Kasahara Y., Kenmochi H., Kimura I.: *Propagation characteristics of the ELF emissions observed by the satellite Akebono in the magnetic equatorial region*, Radio Sci. **29** (1994) 751-767.
- [12] Santolík O., Pickett J.S., Gurnett D.A.: *Spatiotemporal variability and propagation of equatorial noise observed by Cluster*, Journal of Geophysical Research **107** (2002) 1495, doi:10.1029/2001JA009159.
- [13] Santolík O., Němec F., Gereová K., Macúšová E., de Conchy Y., Cornilleau-Wehrin N.: *Systematic analysis of equatorial noise below the lower hybrid frequency*, Annales Geophysicae **22** (2004) 2587-2595.
- [14] Němec F., Santolík O., Gereová K., Macúšová E., de Conchy Y., Cornilleau-Wehrin N.: *Initial results of a survey of equatorial noise emissions observed by the Cluster spacecraft*, Planetary and Space Science **53** (2005) 291-298.
- [15] Němec F., Santolík O., Gereová K., Macúšová E., Laakso H., de Conchy Y., Maksimovic M., Cornilleau-Wehrin N.: *Equatorial noise: Statistical study of its localization and the derived number density*, Advances in Space Research **37** (2006) 610-616.
- [16] Horne R.B., Thorne R.M., *Potencial waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic storms*, Geophysical Research Letters **25** (1998) 3011-3014.
- [17] Horne R.B., Thorne R.M., Glauert S.A., Meredith N.P.: *Electron acceleration in the Van Allen radiation belts by fast magnetosonic waves*, Geophysical Research Letters **34** (2007) L17170, doi:10.1029/2007GL030267.
- [18] Glauert S.A., Horne R.B., *Calculation of pitch angle and energy diffusion coefficients with the PADIE code*, Journal of Geophysical Research **110** (2005) A04206, doi:10.1029/2004JA010851.
- [19] Rezeau L., Roux A., Russel C.T.: *Characterization of small-scale structures at the magnetopause from ISEE measurements*, Journal of Geophysical Research **98** (1993) 179-186.
- [20] Santolík O., Parrot M., Lefeuvre F.: *Singular value decomposition methods for wave propagation analysis*, Radio. Sci. **38** (2003) 1010, doi:10.1029/2000RS002523.

- [21] Santolík O.: *Propagation Analysis of STAFF-SA Data with Coherency Tests (A User's Guide to PRASSADCO)*, LPCE/NTS/073.D, 2003