

Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta



## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2007

Alexander Tomori

Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Alexander Tomori

### Studium radiových vln šířících se ve sluneční soustavě

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

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

Studijní program: Fyzika  
Studijní obor: Obecná fyzika

2007

Rád by som poďakoval svojmu vedúcemu bakalárskej práce Doc. RNDr. Ondřejovi Santolíkovi, Dr. za odborné vedenie, poskytnutý software, trpezlivosť a pripomienky pri vypracovávaní tejto práce.

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

V Praze dne 31. V. 2007

Alexander Tomori

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Súčasný stav problematiky</b>	<b>6</b>
2.1	Rádiové emisie v magnetosfére Jupitera, S bursty . . . . .	6
2.2	Rádiové emisie v slnečnom vetre . . . . .	9
2.2.1	Slnečné erupcie a výrony koronálnej hmoty . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Cieľ práce</b>	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>Experiment</b>	<b>17</b>
4.1	Spracovanie a vizualizácia pozorovania S burstov . . . . .	17
4.2	Projekt STEREO . . . . .	19
4.2.1	Ciele misie . . . . .	19
4.2.2	Sonda . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Výsledky a diskusia</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Záver</b>	<b>23</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>24</b>

Název práce: Studium rádiových vln šířících se ve sluneční soustavě

Autor: Alexander Tomori

Katedra: Katedra fyziky povrchů a plazmatu

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

e-mail vedoucího: [ondrej.santolik@mff.cuni.cz](mailto:ondrej.santolik@mff.cuni.cz)

Abstrakt:

V práci sa venujeme šíreniu rádiových vln Slnecnou sústavou, konkrétne rádiovým búrkam vznikajúcim pri slnečných erupciách a S burstom—sporadickým rádiovým emisiách vznikajúcim v magnetosfére Jupitera za špeciálnej konfigurácie s mesiacom Io. Ide o najintenzívnejšie rádiové emisie v Slnecnej sústave. Súčasťou práce je aj spracovanie pozorovaní S burstov rádioteleskopom v Grazi z 17. februára 2004. Vlnovú formu fitujeme sínovým modelom s kvadraticky závislou amplitúdou, čím získaváme časový priebeh frekvencie, fázy a strednej hodnoty amplitúdy, ktorá nám odhaľuje jednotlivé vlnové balíčky (subpackets) S burstov. V závere si všimneme časté typy priebehu frekvencie vrámci jednotlivých vlnových balíčkov.

Klíčová slova: rádiové emisie, slnečný vietor, joviánske S bursty

Title: Radio waves propagating in the solar system

Author: Alexander Tomori

Department: Department of Surface and Plasma Science

Supervisor: Doc. RNDr. Ondřej Santolík, Dr.

Supervisor's e-mail address: [ondrej.santolik@mff.cuni.cz](mailto:ondrej.santolik@mff.cuni.cz)

Abstract:

We discuss propagation of radio waves in the solar system, especially solar radio storms and S bursts—sporadic radio emissions originating in Jupiter's magnetosphere which occur only at specific observer-Jupiter-Io configuration. These emissions are the most prominent radio emissions in the solar system. In the experimental part of this work we analyse data from observation of S bursts which has been recorded at the Lustbühel observatory near Graz. The sinusoidal model with amplitude as a quadratic function of time is fitted to the waveform. This provides us with a description of the temporal evolution of frequency, phase and the mean value of amplitude. This allows us to detect wave subpackets of S bursts. We describe separate types of frequency behavior in successive subpulses.

Keywords: radio emissions, solar wind, Jovian S bursts

# Kapitola 1

## Úvod

Na našej Zemi, kde žijeme, sme zvyknutí, že kdekofvek v civilizovanej časti sveta a vlastne všade, kde zapneme rádiový prijímač, naladíme nejaké rádiostanice. Samozrejme, naša Slnčná sústava je už asi plná našich rádiových signálov, či už piesní a rôznych relácií z pozemských rádiových vysielaní, ktoré sa predrali zemskou ionosférou.

Slnčná sústava však obsahuje rádiové signály aj prirodzene. A práve tie nám so sebou prinášajú informácie o fyzikálnych procesoch, ktoré stoja za vznikom týchto vln, a o podmienkach v priestore, ktorým sa k nám šíria. Rádiové emisie spôsobené slnečnými erupciami nás upozornia na možnosť prílevu energetických nabitých častíc zo Slnka, čo má významné praktické dôsledky. Rádiové emisie vznikajúce v magnetosfére Jupitera nám zasa umožňujú lepšie spoznať procesy obklopujúce Jupiter.

Krokom k porozumeniu šírenia rádiových vln v slnečnom vetre je aj dvojica (takmer identických) sond misie STEREO (Solar TERrestrial RElations Observatory), ktorá štartovala 25. októbra 2006 na Floride. To nám umožní vôbec prvé stereoskopické merania v histórii zamerané na štúdium Slnka a výronov koronálnej hmoty (CME). Jedným z prístrojov, ktoré sú na palubách sond umiestnené, je aj STEREO/WAVES (SWAVES), ktorého cieľom je sledovať generovanie a postup rádiových emisií od Slnka k dráhe Zeme.

Táto práca sa zaoberá rádiovými emisiami a ich spracovaním z najintenzívnejšieho planetárneho zdroja—Jupitera—a rádiovými emisiami spôsobenými slnečnými erupciami.

# Kapitola 2

## Súčasný stav problematiky

### 2.1 Rádiové emisie v magnetosfére Jupitera, S bursty

Najintenzívnejšími zdrojmi rádiových vln v Slnčnej sústave sú Slnko a Jupiter, ktorý produkuje najmohutnejšie planetárne rádiové emisie. Jupiter emituje rádiové žiarenie jednak vo svojej atmosfére ako súčasť termálnej energie (milimetrové vlny), jednak v magnetosfére interakciou so zachytenými nabitými časticami (spojité decimetrové vlny) a interakciou s nabitými časticami vyvrhnutými z mesiaca Io tvoriacimi tzv. Io torus (prerušované dekametrové vlny).

Sporadické rádiové emisie z joviánskej magnetosféry sa vyskytujú v oblasti približne 10 kHz až 40 MHz. Spodná hranica je daná priepustnosťou medziplanetárneho priestoru pre rádiové vlny a horná hranica súvisí s maximálnou hodnotou elektrónovej cyklotrónovej frekvencie  $f_c$  v magnetosfére Jupitera. Najčastejšie sa emisie vyskytujú v oblasti 5 až 10 MHz, avšak zo Zeme sú pozorovateľné len emisie v rozmedzí 10 MHz (dané priepustnosťou ionosféry Zeme pre rádiové vlny) až 27 MHz (prudký pokles frekvencie výskytu emisií). Tie spadajú do oblasti dekametrových vln (DAM) [1]. Prvýkrát ich pozorovali Burke a Franklin v roku 1955 [2]. Ďalšie pozorovania a štatistické spracovania ukázali súvislosť výskytu týchto emisií s danými hodnotami CML<sup>1</sup> (hovoríme o A, B a C zdrojoch) a často aj polohami Jupiterovho

---

<sup>1</sup>Central Meridian Longitude, značí dĺžku jovianského poludníka, ktorý k nám smeruje. Mení sa s rotáciou Jupitera. Ten však nemá pevný povrch, ale rotuje ako kvapalina. Používa sa preto perióda odvodená z meraní magnetického poľa. Táto doba rotácie je

mesiaca Io (fázou jeho obehu).

Najintenzívnejšie sú zdroje A a B, ktoré majú spoločný pôvod v polárnej zóne severného magnetického pólu. Emisie sa z tejto oblasti šíria v smere kužeľovej plochy s polovičnou veľkosťou vrcholového uhla približne  $70^\circ$  a osou rovnobežnou s lokálnym magnetickým poľom. Či ide o zdroj A alebo B závisí na tom, ktorá strana kužeľovej plochy smeruje k Zemi. V prípade, že aktívnou oblasťou v severnej magnetickej polárnej oblasti prechádzajú magnetické čiary prechádzajúce zároveň aj mesiacom Io, dochádza k výraznému zvýšeniu pravdepodobnosti emisií. Preto emisie zo zdrojov A a B ďalej delíme podľa toho, či súvisia alebo nesúvisia s mesiacom Io. Hovoríme o Io-B, non-Io-B, Io-A a non-Io-A rádiových búrkach. Io-B sa vyskytujú najčastejšie, zatiaľ čo non-Io-B sú najslabšie. Zdroje A a B sa nachádzajú nad severnou polárnou oblasťou a emisie sú pravotočivo kruhovo alebo elipticky polarizované. O treťom zdroji, označovanom ako C, sa predpokladá, že sa nachádza nad južnou polárnou oblasťou kvôli jeho prevažne ľavotočivo polarizovaným emisiám. Jeho CML sleduje CML zdroja A a silnejší Io-C variant sa vyskytuje v tej istej konfigurácii mesiaca Io ako Io-A.

Podľa tvaru dynamického spektra (napr. závislosť frekvencie na čase) rádiové emisie delíme na dve skupiny, a to na tzv. L bursty a S bursty. L bursty (long), ktoré sú najčastejšie, pozostávajú z gaussovského šumu so šírkou pásma do 3 MHz, ktorý zosilňuje a po dosiahnutí maxima slabne, a to v časovom intervale 2 až 10 s. Zástupcovia zriedkavejšieho typu, S bursty (short), sa vyskytujú len v búrkach súvisiacich s mesiacom Io, a to opakujú sa 2 až 200-krát za sekundu (najčastejšie 20-krát za sekundu) v intervaloch pár sekúnd. Každý z týchto burstov v danej sérii má klesajúcu frekvenciu, najčastejšie s rýchlosťou 20 MHz/s. Tvoria len 10% Jupiterovho dekametrového žiarenia, ale sú najmohutnejšie [1]. Ukážka dynamického spektra S burstov, ktoré sú v tejto práci spracúvané, je na Obr. 4.1 na strane 18.

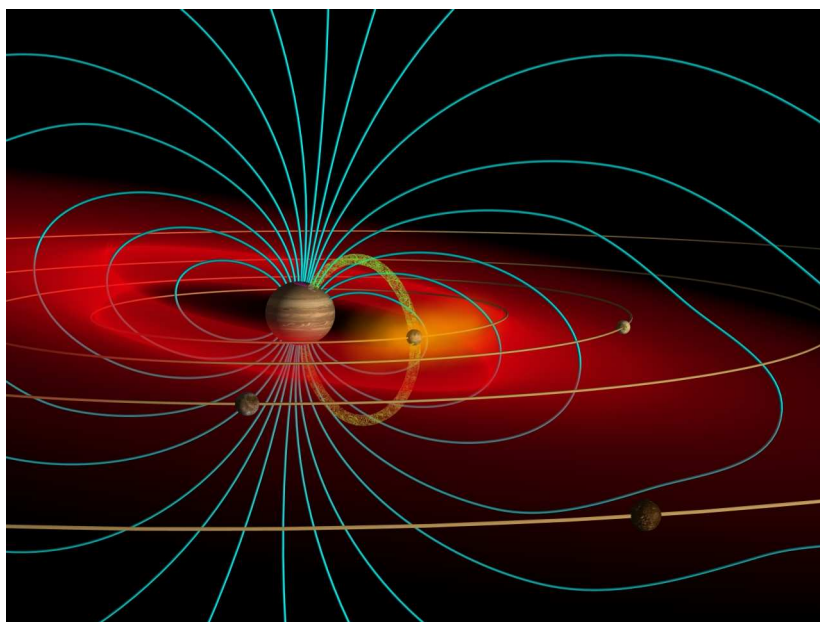
Io, najvnútornejší mesiac (z Galileových mesiacov, objavené roku 1610 Galileom Galilei), má svoju orbitu oveľa väčšiu ako náš Mesiac, ale silné gravitačné pole Jupitera ho preháňa okolo seba raz za 1,8 dňa. Silné slapové sily stláčajú a uvoľňujú jeho jadro, čo z neho robí vulkanicky najaktívnejšie teleso v našej slnečnej sústave. Cez jeho deravú tenkú kôru vytryskujú prúdy sopečného materiálu. Pomalšie z nich padajú späť na jeho povrch a tie s rýchlosťou presahujúcou únikovú rýchlosť mesiaca vytvoria okolo Io mrak pozostávajúci z neutrálnych atómov síry, kyslíka, sodíka a draslíka. Po ich ionizácii sú vlečené magnetickým poľom Jupitera a radiálnym elek-

---

9 hodín 55,5 minút.



trickým poľom vzniknutým korotáciou Jupiterovej magnetosféry (na rozdiel od neutrálnych atómov, ktoré sprevádzajú Io) a tvoria a zásobujú Io torus, pás plazmy, ktorý obopína Jupiter. Podobne ako zvyšok magnetického poľa Jupitera, Io torus je vzhľadom k joviánskemu rovníku (a orbitálnej rovine Io) naklonený. Preto je niekedy Io nad a niekedy pod centrálnou časťou Io toru (Obr. 2.1).



Obrázok 2.1: Schéma magnetosféry Jupitera. Mesiace Io (najbližšie k planéte) je obklopený mrakom neutrálnych atómov a planétu obopína Io torus. Prevzaté z <http://www.boulder.swri.edu/~spencer/digipics.html>

To všetko sa odohráva v magnetosfére Jupitera— v oblasti priestoru, v ktorom je pohyb nabitých častíc diktovaný magnetickým poľom Jupitera. V smere k Slnku je ohraničená magnetopauzou, kde sa zráža so slnečným vetrom, v smere od Slnka je značne pretiahnuá, môže siahť až k Saturnu. Ak by magnetosféra Jupitera bola pre nás viditeľná voľným okom, zo Zeme by na oblohe okolo Jupitera zaberala štyrikrát väčšiu oblasť ako Mesiace v splne.

Asi desať rokov po objave dekametrového rádiového žiarenia Jupitera bolo objavené aurorálne kilometrové žiarenie Zeme (AKR, v čase, keď sa stali dostupnými rádiové pozorovania z umelých družíc na frekvenciách nízkych na to, aby prešli zemskou ionosférou), ktoré bolo vysvetlené modelom CMI

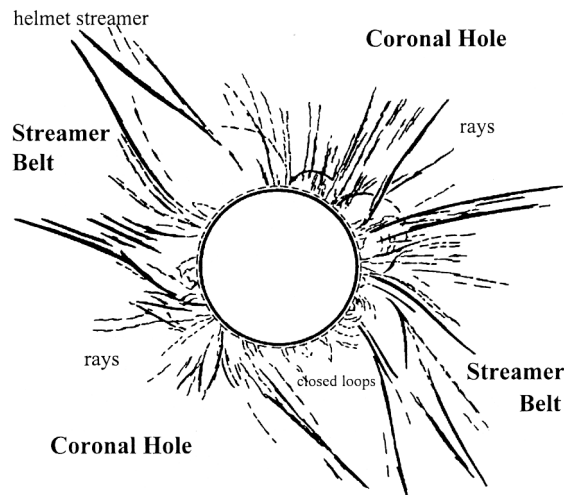
(cyclotron maser instability) [3]. Predpokladá sa, že tento mechanizmus je tiež zodpovedný za rádiové dekametrové, hektometrové a kilometrové vlny Jupitera (a aj Saturna, Uránu a Neptúna). Ide o zosilovanie elektromagnetických fluktuácií s frekvenciami blízkymi  $f_c$  prúdom mierne relativistických elektrónov. Žiarenie má frekvencie blízke frekvencii  $f_c$ .

## 2.2 Rádiové emisie v slnečnom vetre

Na rozdiel od Zeme, ktorá má stabilnú a ohraničenú atmosféru, koróna, vrchná časť atmosféry Slnka, nemá dobre definovanú hranicu. Slnečná atmosféra má vysokú teplotu, je nestabilná a rozpína sa ako slnečný vietor a vyplňa celú heliosféru. Prvé priame merania slnečného vetra boli vykonané v roku 1960 [4, str. 109]. Prvé modely toku častíc zo Slnka boli navrhnuté už začiatkom dvadsiateho storočia, napr. na základe pozorovania plynového chvostu kométy Biermann [5, 6] ukázal, že pozorovaný smer plynového chvostu kométy od Slnka je prejavom tlaku slnečného korpuskulárneho žiarenia a rýchlosť toku týchto častíc odhadol na niekoľko stovák km/s. Onedlho ďalší významný krok spravil Chapman [7, 8], ktorý poznamenal, že transport energie tepelnou vodivosťou vo vonkajšej slnečnej atmosfére prevyšuje radiačné energetické straty s výsledkom, že pozorovaná teplota  $10^6$  K pozorovaná v blízkosti Slnka musí (s malým poklesom) pokračovať aj za dráhu Zeme. S predpokladom hydrostatickej rovnováhy výpočtom získal hustotu 100 atómov/cm<sup>3</sup> vo vzdialenosti Zeme, takže Chapman mohol tvrdiť, že slnečná koróna vyplňa vnútornú časť Slnečnej sústavy. Ukázalo sa, že Biermannovo slnečné korpuskulárne žiarenie a Chapmanove koronálne plyny musia byť to isté, a teda pôvod dynamiky slnečného korpuskulárneho žiarenia je v dynamike vonkajšej slnečnej atmosféry [9]. Stále však mnohé otázky ostávajú nevyriešené. Napríklad prudké 200-násobné zvýšenie teploty koróny v prechodovom pásme nad chromosférou oproti teplote fotosféry.

Slnečný vietor je tok nabitých častíc zo Slnka. Jeho rýchlosť je nadzvuková (40 krát vyššia ako rýchlosť zvuku v slnečnom vetre), a to okolo 400 km/s a je daná štruktúrou koróny. Dráhu od Slnka k Zemi prekoná približne za štyri dni. Slnečný vietor podľa rýchlosti delíme na rýchly a pomalý. Rýchly slnečný vietor sa vyskytuje v oblastiach tzv. koronálnej diery (viď. Obr. 2.2 a 2.3). Je to oblasť slnečnej koróny v oblasti pólů so sníženou hustotou (okolo 3 ióny/cm<sup>3</sup> vo vzdialenosti 1 AU), teplotou (rádovo  $10^5$  K) a žiarením. Magnetické čiary sú otvorené, smerujú radiálne a umožňujú rýchly únik nabitých častíc s rýchlosťami 400 až 800 km/s. Pomalý slnečný vietor

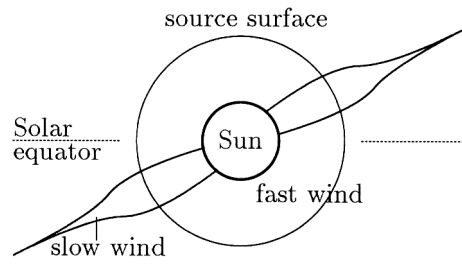
sa vyznačuje rýchlosťami 250 až 400 km/s, vyššou hustotou (8 iónov/cm<sup>3</sup> vo vzdialenosti 1 AU) a hustota toku je asi dvakrát vyššia ako v prípade rýchleho slnečného vetru. V čase slnečného minima sa vyskytuje v oblastiach tzv. prúdovej vrstvy (current sheet) pri heliomagnetickom rovníku, v blízkosti slnečného maxima nad aktívnymi oblasťami [4, str. 110]. Na Obr. 2.4 je znázornená závislosť rýchlosti slnečného vetra na heliografickej šírke.



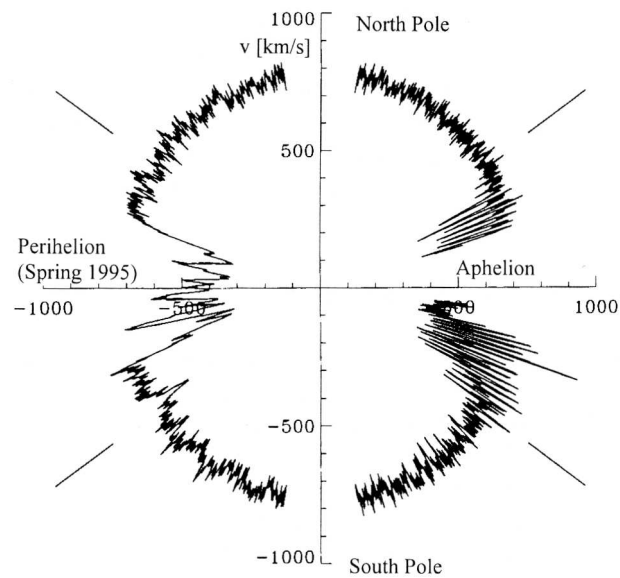
Obrázok 2.2: Štruktúry v koróne (načrtnuté podľa úplného zatmenia v júli 1991, prevzaté z [10]).

### 2.2.1 Slnečné erupcie a výrony koronálnej hmoty

Slnečné erupcie (solar flares) a výrony koronálnej hmoty (CME) sú prudkými prejavmi slnečnej aktivity. Pri slnečných erupciách sa v chromosfére a koróne v priebehu pár minút uvoľní obrovské množstvo energie (až  $10^{25}$  J) do okolitého priestoru. Erupciou sa rozumie najmä prejav v širokom spektre elektromagnetického žiarenia (od dlhých rádiových vln až po krátke gamma žiarenie), ale je spájaná aj so sprevádzanou emisiou energetických častíc a obrovskými plazmovými oblakmi (CME). Slnečné erupcie pozorovateľné aj vo viditeľnom svetle sú však zriedkavé, pretože aj pri najintenzívnejších erupciách zjasnenie tvorí len 1% z celkového jasú Slnka. To sa však podarilo Carringtonovi už v roku 1859, keď pozoroval prudké zjasnenie slnečnej



Obrázok 2.3: Oblasti rýchleho a pomalého slnečného vetra v koróne, prevzaté z [4, str. 108].



Obrázok 2.4: Polárny graf závislosti rýchlosti slnečného vetra na heliografickej šírke. Dáta boli získané počas letu družice Ulysses vo fáze letu mimo ekliptiku. Prevzaté z [11].

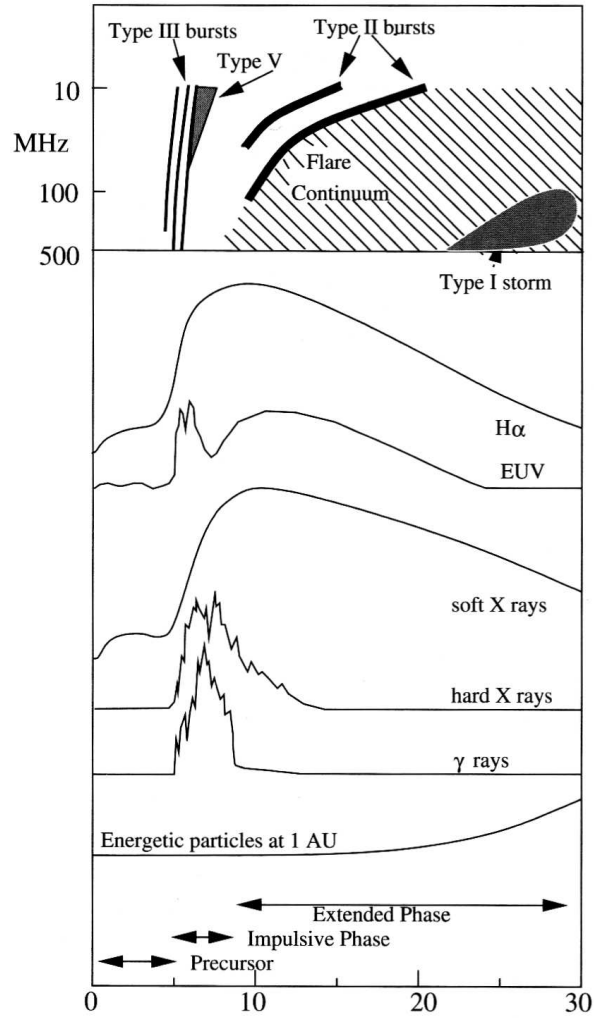
škvrny v bielom svetle. Išlo o prvé pozorovanie slnečnej erupcie vôbec. Deň na to nasledovala silná geomagnetická búrka sprevádzaná polárnymi žiarami [4, str. 131].

Časový priebeh elektromagnetického žiarenia v rôznych frekvenčných oblastiach pri erupciách vykazuje typické profily. To umožňuje definovať rôzne fázy erupcie, počas ktorých prebiehajú rôzne fyzikálne procesy. Z tohto pohľadu priebeh slnečnej erupcie pozostáva z prekurzora, impulzívnej fázy (fáza vzplanutia) a nasledúcej rozšírenej fázy (Obr. 2.5).

Prekurzor sa pozoruje len pri obrovských erupciách a prejavuje sa slabým zjasnením v oblasti mäkkého RTG žiarenia a  $H\alpha$ . Trvá pár minút a odzrkadľuje zahrievanie oblasti začínajúcej erupcie. Počas impulzívnej fázy je uvoľnená väčšina energie a to najmä vo forme tvrdého RTG a  $\gamma$ -žiarenia. Súvisí zrejme s rekonekciou vnútri uzavretých kriviek magnetického poľa v koróne. Koronálna plazma sa zahrieva a častice sa urýchľujú. Táto fáza trvá pár minút a môže byť nasledovaná poslednou, postupnou rozšírenou fázou, počas ktorej sa emisie pozorujú hlavne v  $H\alpha$  a mäkkej RTG oblasti, ale pokračujú aj emisie v mikrovlnnej a rádiovnej časti spektra. Trvať môže aj desiatky minút, výnimočne niekoľko hodín. Podobne ako prekurzor je pozorovaná len vo veľkých erupciách. Väčšinou sú totiž erupcie malé a pozostávajúce len z impulzívnej časti.

Mäkké RTG žiarenie je emitované zahrievanou plazmou. Urýchľované elektróny generujú mikrovlnné žiarenie, vo vrchoch slučiek generujú tvrdé RTG žiarenie a v základni slučiek tvrdé RTG,  $\gamma$ -žiarenie, UV a časť  $H\alpha$ . Tok elektrónov takisto generuje aj rádiové emisie. Tie potom poskytujú informácie o urýchľovaní a šírení častíc urýchlených slnečnou erupciou [4, str. 131].

Elektróny šíriace sa koronálnou plazmou vyvolávajú Langmuirove oscilácie. Solárny rádiový šum sa nachádza v metrovej oblasti vlnových dĺžok, rádiový šum v medziplanetárnom priestore je kilometrových vlnových dĺžok. Podľa driftu vo frekvencii klasifikujeme slnečný rádiový šum na typy I až V. Rádiový šum typu I predstavuje normálne spojité rádiové emisie zo Slnka, ktoré sú výraznejšie počas poslednej fázy erupcií. Ostatné štyri typy môžeme rozdeliť na emisie s rýchlym a pomalým driftom. Búrky rádiových emisií často trvajú dlhšie ako perióda rotácie Slnka a pozostávajú zo státisícov driftujúcich emisií väčšinou malej intenzity a s ohraničenou šírkou pásma. Množstvo výskytu rádiových emisií a ich driftové rýchlosti závisia na heliografickej dĺžke a obe dosahujú maximum v blízkosti CMP (central meridian passage – prechod aktívnej oblasti meridiánom, ktorý prechádza stredom slnečného disku). Výrazná závislosť driftovej rýchlosti súvisí s dobou, ktorú potrebuje



Obrázok 2.5: Frekvenčné spektrum slnečných rádiových emisií jednotlivých typov a elektromagnetické žiarenie rôznych vlnových dĺžok v rôznych fázach slnečnej erupcie. Prevzaté z [4, str. 132].

rádiová emisia na to, aby sa dostala z miesta vzniku k pozorovateľovi [12].

Rádiová emisia typu III začína hneď s nástupom impulzívnej fázy a vyznačuje sa rýchlym driftom k nízkym frekvenciám. Keďže frekvencia  $\omega_{pe}$  Langmuirových oscilácií

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (2.1)$$

(kde  $n_e$  je hustota elektrónov,  $m_e$  ich hmotnosť a  $e$  elementárny elektrický náboj) závisí na hustote plazmy  $n_e$ , z frekvenčného driftu je možné na základe modelu hustoty koróny určiť radiálnu rýchlosť rádiového zdroja. Rýchlosť emisie typu III je približne  $c/3$  a tá je interpretovaná ako prúd elektrónov šíriacich sa pozdĺž otvorených magnetických čiar do medziplanetárneho priestoru. Impulzívne píky v tvrdej RTG oblasti odpovedajú jednotlivým uvoľneniam energie. Výnimočne sa pozoruje zmena znamienka frekvenčného driftu, čo odpovedá zachyteniu elektrónov v poli s uzatvorenými magnetickými čiarami. Pri vzdľahovaní sa elektrónov od Slnka frekvencia klesá a potom, čo sledujúc uzatvorené magnetické čiary sa otočia a začnú sa vracat k Slnku, frekvencia začne stúpať.

Metrové rádiové emisie typu II majú frekvenčný drift značne menší, čo indikuje radiálnu rýchlosť zdroja okolo 1000 km/s a interpretuje sa ako rázová vlna šíriaca sa korónou. V skutočnosti to nie je samotná rázová vlna, ktoré generuje rádiové emisie typu II, ale elektróny urýchlené rázovou vlnou. A ako tieto elektróny unikajú, generujú malé štruktúry podobné emisiám typu III, čo v grafe frekvencia verzus čas pripomína tvar rybích kostí— v prípade typu II chrbticu a v prípade typu III rybiu kosť. Rádiové emisie typu II sú rozdelené na dve paralelné frekvenčné pásma interpretované ako dopredná a spätná rázová vlna.

Metrové rádiové emisie typu IV (typu V) sú spojené emisie, ktoré hneď nasledujú emisie typu II (typu III). Emisie typu IV sú tvorené gyrosynchrotrónovými emisiami elektrónov s energiami okolo 100 keV. Pozostávajú z dvoch častí: z nedriftujúcej časti generovanej elektrónmi zachytenými v uzavretých magnetických slučkách nízko v koróne, a z pohybujúcej sa časti generovanej elektrónmi pohybujúcimi sa vo vysokej koróne.

S emisiami typu V to je podobné, akurát nasledujú emisie typu III a sú stacionárne—nevykazujú žiaden drift vo frekvencii.

Kilometrové rádiové emisie medziplanetárneho priestoru sa klasifikujú a vysvetľujú podobným spôsobom—emisie typu III vykazujú veľký frekvenčný drift, čo odpovedá elektrónom šíriacim sa pozdĺž magnetických čiar. V prípade, že je známe miesto zdroja emisií, kilometrové emisie typu III môžu

byť použité na určenie tvaru medziplanetárnych magnetických čiar. Rádiové emisie typu II zasa prezrádzajú prítomnosť rázovej vlny šíriacej sa medziplanetárnym priestorom [4, str. 135].



# Kapitola 3

## Cieľ práce

Cieľom prvej časti tejto práce je podať stručný prehľad odbornej knižnej a časopiseckej literatúry týkajúcej sa problematiky šírenia rádiových vĺn v Slnčnej sústave, ich klasifikácie a príčin vzniku. Konkrétne S burstov—dekametrových rádiových emisií vznikajúcich v joviánskej magnetosfére v špeciálnej geometrickej konfigurácii s mesiacom Io—a ďalej rádiových emisií vznikajúcich pri slnečných erupciách.

Cieľom druhej časti je spracovať pozorovanie S burstov vykonané pozemským rádioteleskopom. Meranie bolo vykonané na observatóriu Lustbühel pri Grazi dvoma na seba kolmo polarizovanými anténami so šírkou pásma 12,5 MHz a stredom v 20,577 MHz. Poskytnuté dáta majú podobu vlnovej formy.

Východiskom pri spracovaní je existujúci program v IDL pôvodne určený na spracovanie emisií typu chorus v magnetosfére Zeme. Program je potrebné upraviť pre emisie vyšších frekvencií.

# Kapitola 4

## Experiment

### 4.1 Spracovanie a vizualizácia pozorovania S burstov rádioteleskopom na observatóriu v Grazi

Dáta, ktoré sme mali k dispozícii, boli namerané Inštitútom vesmírneho výskumu (IWF) Rakúskej akadémie vied (ÖAW) v Grazi rádioteleskopom na Lustbühel observatóriu 17. februára 2004. Rádioteleskop pozostával z dvoch na seba kolmo polarizovaných logaritmických antén vzdialených 40 m. Pozorovanie bolo vykonané na frekvenciách so stredom na 20,577 MHz a so šírkou pásma 12,5 MHz. Dvojkanálový signál bol ďalej zdigitalizovaný 12 bitovým AD prevodníkom so vzorkovacou frekvenciou 50 MHz, takže výsledne každý z kanálov bol vzorkovaný s frekvenciou 25 MHz, čo dáva Nyquistovu frekvenciu 12,5 MHz. Na spracovanie boli vybrané úseky obsahujúce S bursty. Ukážka dynamického spektra pozorovania je na Obr. 4.1.

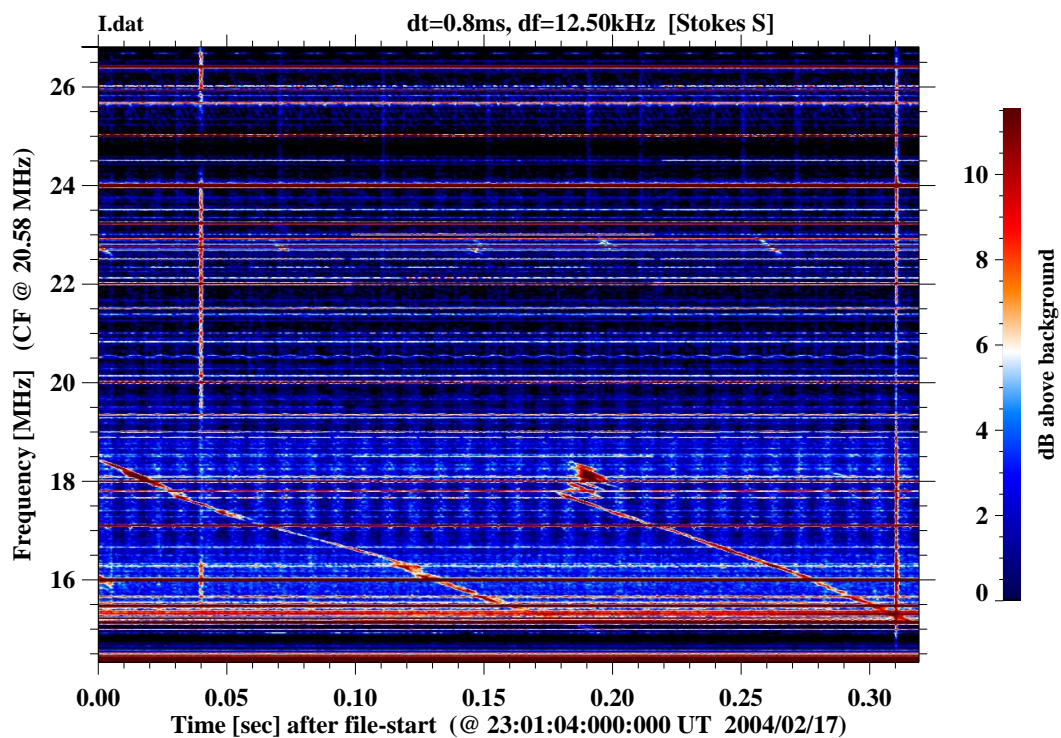
Úpravou existujúceho kódu v IDL [13], sme nafitovali vlnovú formu sínovým modelom

$$E(t, \mathbf{a}) = C + A(t) \sin [2\pi f (t - t_0) + \varphi] \quad (4.1)$$

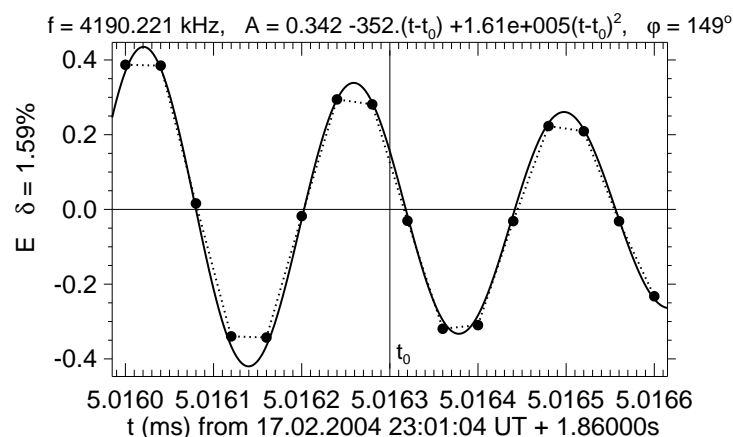
podľa [13], kde amplitúda je kvadratická

$$A(t) = A_0 + A_1(t - t_0) + A_2(t - t_0)^2. \quad (4.2)$$

Fitovanie prebieha na krátkych podintervaloch (o dĺžke približne dvojnásobku periódy vlny, približne 16 bodov vlnovej formy) s časom  $t_0$  v strede podintervalu (Obr. 4.2). Výstupom fitovania je časovo závislý vektor  $\mathbf{a} = (C, A_0, A_1, A_2, f, \varphi)$ . Samotný časový priebeh strednej hodnoty amplitúdy, frekvencie a fázy je znázornený na Obr. 4.3.



Obrázok 4.1: Dynamické spektrum signálu nameraného na observatóriu Lustbühel. Na obrázku vidieť dva S bursty v rozsahu frekvencií 15,5 až 18,5 MHz. Znáznorený Stokesov parameter S predstavujúci celkový výkon. Autorom kódu v IDL generujúceho spektrum je Ulrich Taubenschuss, IWF ÖAW.



Obrázok 4.2: Časť odfiltrovanvej vlnovej formy fitovanej sínovým modelom. Tučné body sú jednotlivé body digitálne odfiltrovaného signálu, plná čiara je model naitovaný metódou najmenších štvorcov.

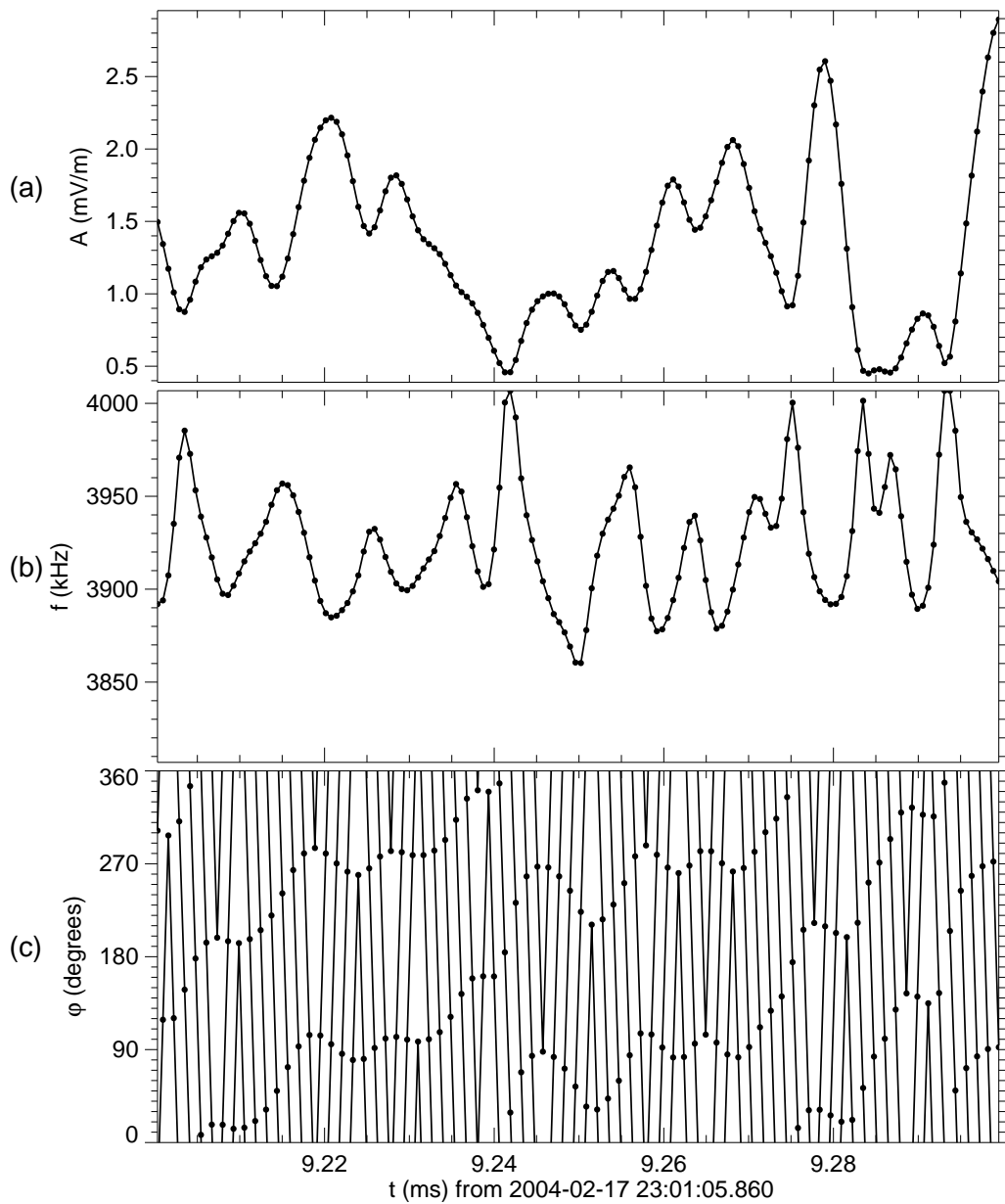
## 4.2 Projekt STEREO, návrh analýzy merania rádiových vln v slnečnom vetre

25. októbra 2006 štartovala z Floridy dvojica takmer identických sond (A-ahead a B-behind) s názvom misie STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory) patriacej do STP (Solar Terrestrial Probes) programu NASA. Sondy sa počas misie od seba vzdialia, čo umožní (vôbec prvé v histórii) stereoskopické pozorovanie Slnka a šírenia hmoty a energie od Slnka k Zemi. Ďalšou úlohou je sledovať a upozorňovať na výrony koronálnej hmoty smerujúce k Zemi, čo je dôležité pri ochrane astronautov, kozmických sond, ale aj techniky na Zemi.

### 4.2.1 Ciele misie

Dvojročná misia je zameraná na

- pochopenie príčin a mechanizmu vzniku CME
- charakterizovanie šírenia CME heliosférou
- objavenie miesta a mechnizmu vzniku urýchľovania energetických častíc v spodnej koróne a medziplanetárnom priestore



Obrázok 4.3: Časová závislosť parametrov fitu apmlitúdy, frekvencie a fázy.

- objasnenie štruktúry okolitého slnečného vetra.

Prístroje umiestnené na sonde:

- Sun Earth Connection and Heliospheric Investigation (SECCHI)–3D sledovanie vzniku a vývoju CME od Slnečného povrchu až po dráhu Zeme
- STEREO/WAVES (SWAVES)–sledovanie vzniku a šírenia rádiových emisií od Slnka po dráhu Zeme
- In-situ Measurements of Particles and CME Transients (IMPACT)–charakteristika plazmy pomocou energetických častíc zo Slnka a lokálneho vektora magnetického poľa
- PLASMA and SupraThermal Ion Composition (PLASTIC)–charakteristika plazmy pomocou protónov,  $\alpha$ -častíc a ťažkých iónov.

#### 4.2.2 Sonda

Sondy sú napájané solárnymi panelmi, umožňujú stabilizáciu orientácie v priestore v troch osiach. Základná charakteristika:

hmotnosť:	620 kg
rozmery:	1,14 m 1,22 m (pri štarte) resp. 6,47 m (so solár. panelmi) 2,03 m
príkon:	475 W
dátový tok:	720 kbps
pamäť:	1 GB
natočenie (navádzanie):	7 arcsec
natočenie (zistenie):	0.1 arcsec

# Kapitola 5

## Výsledky a diskusia

Prvým výsledkom je software—kód v IDL—na získavanie parametrov sínového modelu (4.1) v závislosti na čase a na grafické zobrazenie týchto výsledkov. Výstupom programov je súbor parametrov a ich grafické zobrazenie, a to nafitovaná vlnová forma (Obr. 4.2) a časová závislosť parametrov—amplitúdy, frekvencie a fázy (Obr. 4.3).

Druhým výsledkom sú predbežné poznatky o chovaní vlnových balíkov S burstov. V grafoch závislostí amplitúdy, frekvencie a fázy na čase (asi stovka intervalov ako na Obr. 4.3) sme pozorovali rôzne typy vlnových balíkov:

- Najčastejšie sa vyskytujúcim prípadom je splynutie lokálneho minima amplitúdy s lokálnym maximom frekvencie a lokálneho maxima amplitúdy s lokálnym minimom frekvencie. So vzrastajúcou amplitúdou teda frekvencia klesá a opačne.
- Druhý, avšak oveľa zriedkavejší, je opačný prípad, keď amplitúda rastie súčasne s frekvenciou a opačne.
- Ďalší pozorovaný prípad je klesajúca resp. stúpajúca frekvencia počas celého priebehu.

Na Obr. 4.3 sú takmer všetky balíky prvého typu, v strede intervalu sa nachádzajú dva balíky posledného typu. Predpokladám, že vlnové balíky nesymetrického a nepravidelného tvaru mohli vzniknúť superpozíciou viacerých prekrývajúcich sa balíkov. Napovedá tomu príslušný priebeh frekvencie, keď nepravidelnému vlnovému balíku prislúcha priebeh frekvencie napr. s dvoma minimami (na Obr. 4.3 dvakrát). Na tomto obrázku sa však vyskytuje aj jeden nepravidelný balík, ktorému odpovedá len jedno minimum frekvencie (prvý balík zľava).

# Kapitola 6

## Záver

Výsledkom práce je v prvom rade stručný prehľad literatúry týkajúcej sa problematikoy šírenia rádiových vln v Slnčnej sústave, konkrétne S burstov—rádiových emisií vznikajúcich v magnetosfére Jupitera v špeciálnej konfigurácii s mesiacom Io—a rádiových vln vznikajúcich pri slnečných erupciách.

Praktickým výsledkom práce je software—kód v IDL—s grafickým výstupom na získanie parametrov sínového modelu S burstov v rádiovom signále z magnetosféry Jupitera a predbežné spracovanie týchto výsledkov.



# Literatúra

- [1] Carr, T. D., F. Reyes (1999): Microstructure of Jovian decametric S bursts. *Journal of Geophysical Research*, **104**, 25,127–25,141
- [2] Burke, B. F., K. L. Franklin (1955): Observation of a Variable Radio Source Associated with the Planet Jupiter. *Journal of Geophysical Research*, **60**, 213–217
- [3] Wu, C. S., L. C. Lee (1979): A theory of the terrestrial kilometric radiation. *Astrophysical Journal*, **230**, 621–626
- [4] Kallenrode May-Britt (2001): *Space Physics*, druhé vydanie, Springer-Verlang, Berlin
- [5] Biermann, L. (1951): Kometenschweife und solare Korpuskularstrahlung. *Zeitschrift für Astrophysik*, **29**, 274
- [6] Biermann, L. (1957): Solar corpuscular radiation and the interplanetary gas. *The Observatory*, **77**, 109–110
- [7] Chapman, S. (1957): Notes on the Solar Corona and the Terrestrial Ionosphere. *Smithsonian Contribution to Astrophysics*, **2**, 1
- [8] Chapman, S. (1959): Interplanetary Space and the Earth's Outermost Atmosphere. *Proceedings of the Royal Society of London*, **A253**, 462–481
- [9] Parker, E. N. (1965): Dynamical Theory of the Solar Wind. *Space Science Reviews*, **4**, 666–708
- [10] Lang, K. (1995): *Sun, earth and sky*, Springer, Berlin

- [11] McComas, D. J., P. Riley, J. T. Gosling, A. Balogh, R. Forsyth (1998): Ulysses' rapid crossing of the polar coronal hole boundary. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 14655–14656
- [12] Fainberg, J., R. G. Stone (1970): Type III Solar Radio Burst Storms Observed at Low Frequencies. III: Streamer Density, Inhomogenities, and Solar Wind Speed. *Solar Physics*, **17**, 392-401
- [13] Santolík, O., D. A. Gurnett, J. S. Pickett, M. Parrot, N. Cornilleau-Wehrlin (2003): Spatio-temporal structure of storm-time chorus. *Journal of Geophysical Research*, **108**, SMP 7-1