

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS OBSERVACIONAIS DE RADIOEMIÇÃO SOLAR TIPO II REGISTRADA PELO CALLISTO-BR

Rafael D. C. Silva, Francisco C. R. Fernandes, Caius L. Selhorst

Universidade do Vale do Paraíba / IP&D, Avenida Shishima Hifumi, 2911,
Urbanova, São José dos Campos, SP, Brasil.
rafdouglas@univap.br

Resumo - Este artigo apresenta os resultados da aplicação de um método pelo qual são determinados, via sub-rotinas em linguagem IDL (*Interactive Data Language*), os principais parâmetros observacionais de emissões solares tipo II registradas pelo espectrógrafo CALLISTO-BR (*Compound Astronomical Low frequency Low cost Instrument for Spectroscopy and Transportable Observatory*) na faixa de frequência de 45-870 MHz. As sub-rotinas, desenvolvidas no presente trabalho, são implementadas na análise de uma emissão tipo II com banda dividida (variante tipo II), registrada em 03 de novembro de 2010 (~10:17:14 UT). Os critérios adotados e os resultados obtidos para o protótipo da análise são apresentados e discutidos. A determinação destes parâmetros fornece os dados necessários à segunda etapa da análise de emissões tipo II: a determinação de parâmetros físicos da fonte emissora e de sua região. Atribuídas a ondas de choque MHD e ejeções de plasmóide (*outflow*), as emissões tipo II não são ainda bem compreendidas, havendo muitas incertezas a respeito de sua origem, mecanismo de emissão e sua associação com *flares* solares e CMEs (ejeções de massa coronal).

Palavras-chave: emissão solar tipo II, onda de choque MHD, *flare* solar, CME.

Área do Conhecimento: Ciências Exatas e da Terra.

Introdução

As emissões solares tipo II são atribuídas a ondas de choque e ejeções de plasmóide (*outflow*) (RAMESH et al., 2010), caracterizando-se como ondas eletromagnéticas que, ao serem geradas a partir de oscilações de plasma, no processo de emissão de plasma (GINZBURG & ZHELEZ-NYAKOV, 1958), escapam das imediações do choque (CLIVER et al., 2005). Entre suas características, as emissões tipo II apresentam duração de alguns minutos, baixa frequência de corte e uma taxa de deriva em frequência lenta (~0,1-1,5 MHz s⁻¹), rumo a frequências mais baixas (MCLEAN, 1985; AGUILAR-RODRIGUEZ et al., 2005).

A primeira evidência de aceleração de partículas por choque na coroa solar veio com as observações de emissões tipo II, que estão associadas ao movimento ascendente de matéria, com velocidades da ordem de 200 a 2000 km s⁻¹ (NELSON & MELROSE, 1985; ASCHWANDEN, 2005).

As emissões tipo II são geralmente acompanhantes de *flares* solares impulsivos e precursoras de CMEs (VOURLIDAS, 2004; BENZ et al., 2009). Sua deriva em frequência é interpretada como a assinatura de uma onda de choque MHD (magneto-hidrodinâmico) propagando-se em direção externa à coroa solar (CLASSEN & AURASS, 2002; SHANMUGARAJU et al., 2009). A problemática da origem das emissões tipo II é saber, no entanto, quando é que suas ondas de choque são acionadas

por *flares* solares ou por CMEs (PRAKASH et al., 2010; NINDOS et al., 2011). Segundo Vourlidas (2004), a interpretação física das emissões tipo II encontra-se incompleta.

É neste contexto, que a determinação de parâmetros observacionais destas emissões solares com dados recentes, fornecidos pelo CALLISTO-BR (SILVA et al., 2010), mostra-se oportuna, pois ao viabilizar a determinação de parâmetros físicos de sua fonte emissora, ela pode dar suporte a modelos existentes ou, até mesmo, sugerir novas interpretações.

Metodologia

A seleção dos espectros dinâmicos fornecidos pelo CALLISTO-BR na faixa de frequência de 45-870 MHz que apresentam aspectos morfológicos compatíveis com emissões tipo II é feita em duas etapas. Inicialmente, são identificados os espectros dinâmicos que apresentam possível assinatura de algum evento explosivo solar, e, em seguida, é feita uma classificação morfológica preliminar destas possíveis assinaturas.

Os parâmetros observacionais das emissões tipo II são determinados essencialmente a partir da análise de seus perfis temporais e espectrais via sub-rotinas desenvolvidas em IDL. Os dois principais critérios de representatividade foram a largura à meia potência e a moda. A Figura 1 ilustra alguns destes parâmetros.

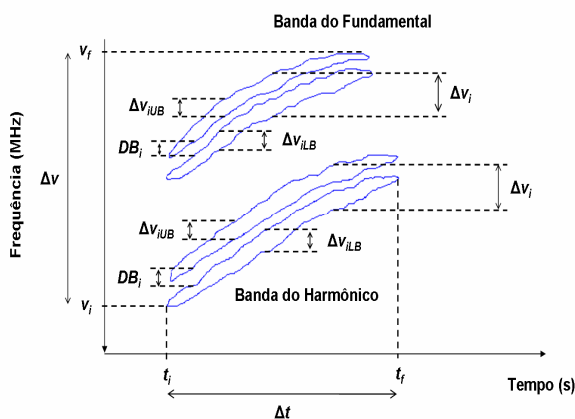


Figura 1 - Espectro dinâmico esquematizado de uma emissão tipo II com ambas as bandas (fundamental e harmônico) divididas, no qual são ilustrados alguns dos parâmetros observacionais de emissões tipo II determinados no presente estudo: tempo inicial (t_i); tempo final (t_f); duração (Δt); frequência inicial (v_i); frequência final (v_f); banda total de frequência (Δv); largura de banda instantânea (Δv_i) (para cada banda e para seus ramos superior (UB) e inferior (LB)) e divisão de banda instantânea (DB_i).

Análise e Resultados

Dentre os 6 possíveis eventos tipo II registrados pelo CALLISTO-BR entre 20 de janeiro de 2010 (16:12 UT) e 03 de maio de 2011 (20:00 UT), encontra-se o evento de 03 de novembro de 2010 (~10:17:14 UT), analisado neste artigo (Figura 2).

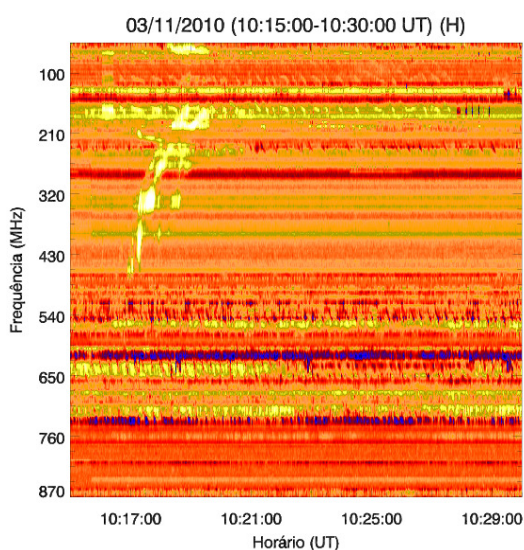


Figura 2 - Espectro dinâmico de emissão solar tipo II registrada pelo CALLISTO-BR (receptor horizontal) em 03 de novembro de 2010 (~10:17:14 UT).

A presença de dois ramos principais no espectro dinâmico do evento de 03 de novembro de 2010 (~10:17:14 UT) sugere inicialmente a ocorrência das duas bandas de frequência (fundamental e harmônico). Entretanto, a proximidade observada entre os ramos superior (UB) e o ramo inferior (LB) ($LB/UB \ll 2$) não é compatível com esta interpretação, visto que $v_f/v_i \approx 2$ (VRSNAK et al., 2001), indicando-os como ramos de uma mesma banda (fundamental ou harmônico). Tendo em vista que sua alta frequência inicial (~339,9 MHz) não se encontra extremamente acima daquela relatada na literatura para a banda do fundamental, no caso particular de emissões tipo II com alta frequência inicial (VRSNAK et al., 2002, REINER et al., 2003, CLIVER et al., 2005), foram consideradas, a princípio, as duas possibilidades (fundamental ou harmônico).

A fim de identificar os máximos em intensidade para os dois ramos, foi desenvolvida e implementada uma sub-rotina em IDL, a qual, ao fazer a varredura do perfil temporal para cada canal de frequência, lista os picos de intensidade (identificados mediante a análise conjunta de máximos locais e do sinal da derivada primeira). A Figura 3 mostra os perfis temporais (alisados) de 25 canais de frequência (870-45 MHz) para o espectro dinâmico do evento de 03 de novembro de 2010 (~10:17:14 UT).

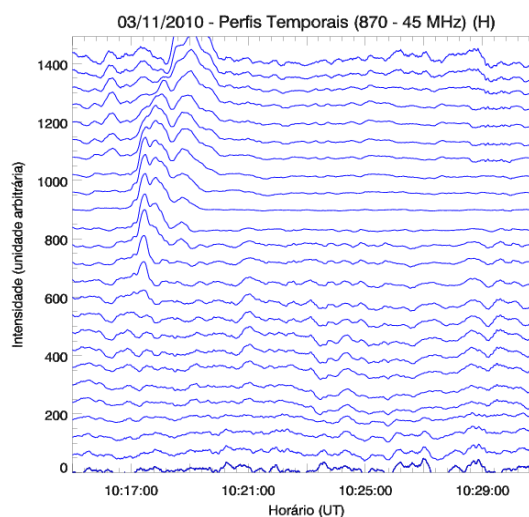


Figura 3 - Perfis temporais de 25 canais de frequência (870-45 MHz) para o espectro dinâmico de 03 de novembro de 2010 (~10:17:14 UT).

A identificação dos ramos superior e inferior da banda (Figura 4) foi realizada mediante a ordenação dos picos de intensidade obtidos via varredura dos perfis temporais.

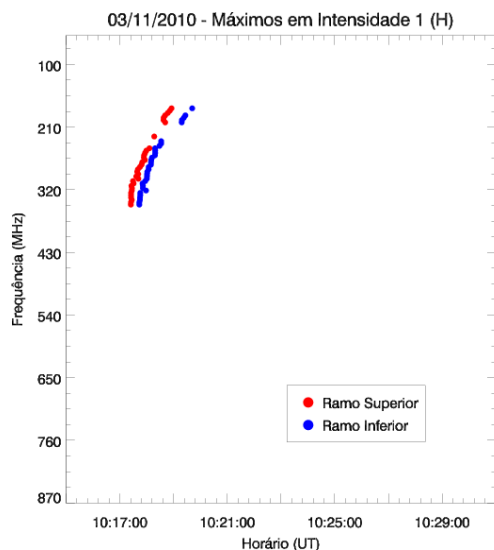


Figura 4 - Máximos em intensidade (identificados via varredura dos perfis temporais) para os ramos superior e inferior observados no espectro dinâmico do evento de 03 de novembro de 2010 (~10:17:14 UT).

A taxa de deriva em frequência (dv/dt) para os ramos superior e inferior foi estimada por meio de dois métodos: aproximação da derivada primeira (método 1) e ajuste linear (método dos mínimos quadrados) (método 2). Ambos os métodos foram aplicados via implementação de uma sub-rotina em IDL.

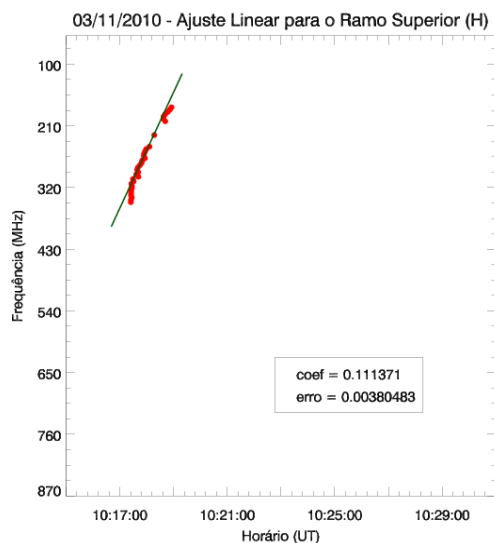


Figura 5 - Ajuste linear efetuado para o ramo superior presente no espectro dinâmico do evento de 03 de novembro de 2010 (~10:17:14 UT).

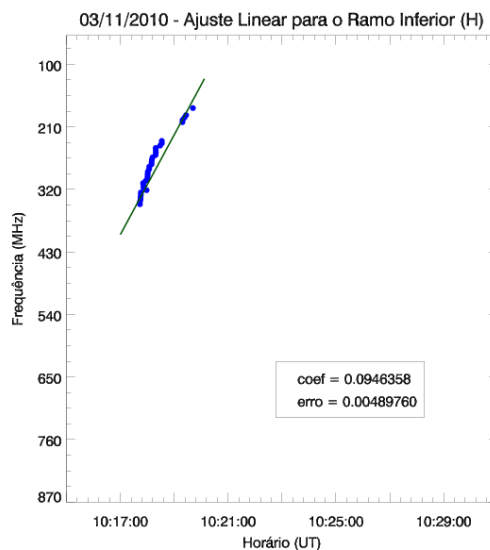


Figura 5 - Ajuste linear efetuado para o ramo inferior presente no espectro dinâmico do evento de 03 de novembro de 2010 (~10:17:14 - 10:19:39 UT).

A Tabela 1 apresenta os instantes inicial e final do evento de 03 de novembro de 2010, determinados com referência aos máximos em intensidade identificados via varredura dos perfis temporais.

Tabela 1 - Instantes inicial e final - 03/11/2010.

t_i (UT)	t_f (UT)	Δt (s)
10:17:14	10:19:39	144

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para a taxa de deriva em frequência para os ramos superior (UB) e inferior (LB) observados no espectro dinâmico do evento de 03 de novembro de 2010 (~10:17:14 UT).

Tabela 2 - Taxa de deriva em frequência - 03/11/2010.

Método	dv/dt (MHz s ⁻¹)	
	UB	LB
1	- 1,585 ± 0,031	- 1,109 ± 0,031
2	- 1,838 ± 0,098	- 1,561 ± 0,055

O segundo conjunto de parâmetros observacionais para o evento de 03 de novembro de 2010 foi obtido a partir dos máximos em intensidade

identificados via varredura dos perfis espectrais instantâneos (Figura 6).

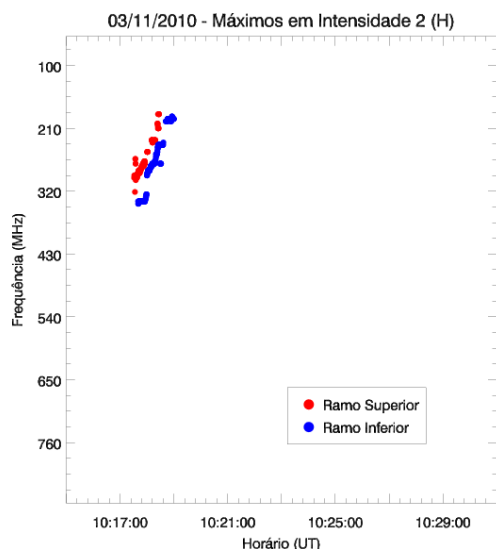


Figura 6 - Máximos em intensidade (identificados via varredura dos perfis espectrais) para os ramos superior e inferior observados no espectro dinâmico do evento de 03 de novembro de 2010 (~10:17:14 UT).

A Tabela 3 apresenta as frequências inicial e final para o evento de 03 de novembro de 2010 (~10:17:14 UT), determinados com referência aos máximos em intensidade identificados via varredura dos perfis espectrais.

Tabela 3 - Frequências inicial e final - 03/11/2010.

ν_i (MHz)	ν_f (MHz)	$\Delta\nu$ (MHz)
339,9	187,3	- 152,6

A largura de banda instantânea ($\Delta\nu_i$) foi determinada inicialmente para os ramos superior e inferior, tendo como critério a adoção da largura à meia potência dos máximos em intensidade identificados nos perfis espectrais e da moda destas medidas como valor representante para o respectivo ramo. Em seguida, com a determinação da divisão de banda instantânea (DB_i), foi estimada a largura de banda instantânea para toda a banda. Para a determinação da largura de banda instantânea relativa ($\Delta\nu/\nu$), adotou-se o mesmo critério.

A Tabela 4 apresenta os valores para a largura de banda instantânea (absoluta e relativa) obtidos

para os ramos superior (UB) e inferior (LB) e para a banda presentes no espectro dinâmico do evento de 03 de novembro de 2010 (~10:17:14 UT).

Tabela 4 - Largura de banda instantânea - 03/11/2010.

Componente	$\Delta\nu_i$ (MHz)	$\Delta\nu_i/\nu$
UB	24,750	0,072
LB	28,875	0,084
Banda	74,250	0,217

Para a determinação da divisão de banda instantânea (DB_i), foi necessário identificar, via uma sub-rotina em IDL, os máximos em intensidade que ocorriam simultaneamente para os ramos superior e inferior (Figura 7). Deste modo, a amostra de máximos em intensidade para os dois ramos foi reduzida.

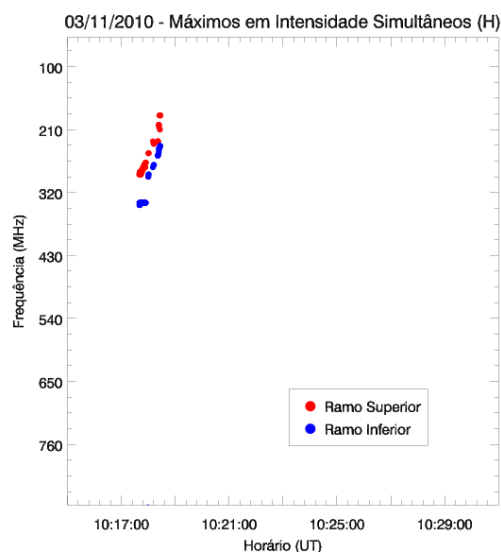


Figura 7 - Máximos em intensidade simultâneos identificados para os ramos superior e inferior presentes no espectro dinâmico do evento de 03 de novembro de 2010 (~10:17:14 UT).

Uma vez identificados os intervalos de canal de frequência correspondentes aos máximos em intensidade simultâneos, definidos como a largura à meia potência dos respectivos máximos, foi adotada como divisão de banda instantânea a diferença entre o limite inferior do intervalo correspondente ao máximo do ramo superior e o limite superior do

intervalo correspondente ao máximo do ramo inferior. Entre os valores obtidos para cada par de máximos simultâneos, foi adotada a moda como valor representante.

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos para a divisão de banda instantânea (absoluta e relativa) para a banda presente no espectro dinâmico do evento de 03 de novembro de 2010 (~10:17:14 UT).

Tabela 5 - Divisão de banda instantânea - 03/11/2010.

DB_i (MHz)	DB_i/v
20,625	0,065

Discussão

Os valores obtidos para a taxa de deriva em frequência são compatíveis com aqueles relatados na literatura para o caso de emissões tipo II com alta frequência inicial (VRSNAK et al., 2001; AGUILAR-RODRIGUEZ et al., 2005), desde que a banda de frequência no espectro dinâmico analisado seja interpretada como a do fundamental. A lei de potência para a taxa de deriva em frequência para emissões tipo II obtida por Aguilar-Rodriguez et al. (2005) é dada por:

$$-\frac{dv}{dt} = 5,50 \times 10^{-5} v_i^{1,77} \text{ [MHz s}^{-1}\text{]},$$

na qual, v_i é a frequência inicial para a banda do fundamental. Para $v_i = 339,9$ MHz, tem-se uma taxa de deriva em frequência igual a $-1,66$ MHz s^{-1} .

Os valores obtidos para a largura de banda instantânea são também compatíveis com aqueles encontrados na literatura. Segundo Mann et al. (1995), seus valores relativos estão entre 0,1 e 0,7 (para as bandas). Quanto à divisão de banda instantânea, Vrsnak et al. (2001) relataram valores relativos entre 0,05 e 0,6.

Conclusão

O presente estudo viabilizou o desenvolvimento e a implementação de sub-rotinas eficientes na determinação de parâmetros observacionais de emissões solares tipo II, as quais se revelaram válidas e consistentes, fornecendo resultados compatíveis com aqueles encontrados na literatura.

Agradecimentos

RDCS agradece à CAPES pelo suporte financeiro concedido mediante bolsa de mestrado.

As pesquisas realizadas pelo CELESTE (CEntro Latino-americano de Estudos Solares-TERrestres) são financiadas pelo CNPQ. Os autores agradecem a H. S. Sawant e equipe (INPE) pelos dados do CALLISTO-BR.

Referências

- AGUILAR-RODRIGUEZ, E.; GOPALSWAMY, N.; MACDOWALL, R.; YASHIRO, S.; KAISER, M. L. A universal characteristic of type II radio bursts. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. A9, p. A12S08, 2005.
- ASCHWANDEN, M. J. **Physics of the Solar Corona: an introduction with problems and solutions**. 2nd ed. Chichester, UK: Springer and Praxis Publishing Ltd., 2005.
- BENZ, A. O.; MONSTEIN, C.; MEYER, H.; MANOHARAN, P. K.; RAMESH, R.; ALTYNTSEV, A.; LARA, A.; PAEZ, J.; CHO, K. S. A World-Wide Net of Solar Radio Spectrometers: e-CALLISTO. **Earth Moon Planet**, v. 104, p. 277-285, 2009.
- CLASSEN, H. T.; AURASS, H. On the Association Between Type II Radio Bursts and CMEs. **Astronomy & Astrophysics**, v. 384, p. 1098-1106, 2002.
- CLIVER, E. W.; NITTA, N. V.; THOMPSON, B. J.; ZHANG, J. Coronal Shocks of November 1997 Revisited: The CME-Type II Timing Problem. **Solar Physics**, v. 225, p. 105-139, 2005.
- GINZBURG, V. L.; ZHELEZNYAKOV, V. V. On the Possible Mechanisms of Sporadic Solar Radio Emission (Radiation in an Isotropic Plasma). **Soviet Astronomy**, v. 2, p. 653, 1958.
- MANN, G.; CLASSEN, T.; AURASS, H. Characteristics of Coronal Shock Waves and Solar Type II Radio Bursts. **Astronomy & Astrophysics**, v. 295, p. 775-781, 1995.
- MCLEAN, D. J. Metrowave solar radio bursts. In: MCLEAN, D. J. & LABRUM, N. R. (Editors). **Solar Radiophysics: studies of emission from the Sun at metre wavelengths**. Cambridge and New York, Cambridge University Press, 1985.
- NELSON, G. J.; MELROSE, D. B. Type II bursts. In: MCLEAN, D. J. & LABRUM, N. R. (Editors). **Solar Radiophysics: studies of emission from the Sun at metre wavelengths**. Cambridge and New York, Cambridge University Press, 1985.

- NINDOS, A.; ALISSANDRAKIS, C. E.; HILLARIS, A.; PREKA-PAPADEMA, P. On the relationship of shock waves to flares and coronal mass ejections. **Astronomy & Astrophysics**, v. 531, n. A31, p. 12, 2011.

- PRAKASH, O.; UMAPATHY, S.; SHANMUGARAJU, A.; KALAIVANI, P. P.; VRSNAK, B. Type-II Bursts in Meter and Deca - Hectometer Wavelengths and Their Relation to Flares and CMEs: II. **Solar Physics**, v. 266, p. 135-147, 2010.

- RAMESH, R.; KATHIRAVAN, C.; KARTHA, S. S.; GOPALSWAMY, N. Radioheliograph Observations of Metric Type II Bursts and the Kinematics of Coronal Mass Ejections. **The Astrophysical Journal**, v. 712, n. 1, p. 188-193, 2010.

- REINER, M. J.; VOURLIDAS, A.; CYR, O. C. S.; BURKEPILE, J. T.; HOWARD, R. A.; KAISER, M. L.; PRESTAGE, N. P.; BOUGERET, J.-L. Constraints on Coronal Mass Ejection Dynamics from Simultaneous Radio and White-Light Observations. **The Astrophysical Journal**, v. 590, n. 1, p. 533-546, 2003.

- SHANMUGARAJU, A.; MOON, Y.-J.; VRSNAK, B. Type II Radio Bursts with High and Low Starting Frequencies. **Solar Physics**, v. 254, p. 297-310, 2009.

- SILVA, R. D. C.; SELHORST, C. L.; FERNANDES, F. C. R. O Espectrógrafo CALLISTO-BR e as Investigações de Emissões Solares em Ondas Métricas. **X EPG - Encontro Latino-Americano de Pós-Graduação**, UNIVAP, São José dos Campos, SP, 2010.

- VOURLIDAS, A. Radio observations of coronal mass ejections. In: GARY, D. E. & KELLER, C. U. (Editors). **Solar and Space Weather Radio-physics: current status and future developments**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.

- VRSNAK, B.; AURASS, H.; MAGDALENI_C, J.; GOPALSWAMY, N. Band-splitting of coronal and interplanetary type II bursts. I. Basic properties. **Astronomy & Astrophysics**, v. 377, p. 321-329, 2001.

- VRSNAK, B.; MAGDALENI_C, J.; AURASS, H.; MANN, G. Band-splitting of coronal and interplanetary type II bursts. II. Coronal magnetic field and Alfvén velocity. **Astronomy & Astrophysics**, v. 396, p. 673-682, 2002.