

ESTRUTURAS FINAS NA RÁDIO EMISSÃO SOLAR EM ONDAS DECIMÉTRICAS: PARÂMETROS E CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ACELERAÇÃO

José Augusto S. S. Dutra, Fernando L. Guarnieri e Francisco C. R. Fernandes

Universidade do Vale do Paraíba / Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento – IP&D
São José dos Campos- SP, jassd9@hotmail.com

Resumo- Neste trabalho são apresentadas observações de estruturas finas presentes nos espectros dinâmicos de rádio emissões solares, registradas pelo rádio espectrógrafo "Brazilian Solar Spectroscope" (BSS), na faixa de frequências decimétricas (1000 – 2500 MHz). Entre as estruturas finas estão emissões tipo III (normal e "reverse slope - RS"), emissões tipo U e tipo J. Essas emissões representam um diagnóstico da presença de feixes de elétrons acelerados durante os "flares" solares e permitem a caracterização dos parâmetros e da geometria dos arcos magnéticos. É apresentada a metodologia de análise para determinação de parâmetros da região emissora, que foi aplicada a uma emissão tipo U-invertido, observada pelo BSS em 25 de outubro de 2001 (15:13:20 UT), no intervalo de frequência de 1940-2060 MHz. Os resultados preliminares mostraram que a emissão apresentou frequência de retorno em 1940 MHz, com taxa de deriva em frequência para os ramos ascendente e descendente de ~47 MHz/s e ~60 MHz/s, respectivamente. A temperatura estimada para o topo do arco coronal foi da ordem de 9×10^6 K e o limite inferior para a intensidade do campo magnético estimado na região é 20 G.

Palavras-chave: Sol, explosões solares, emissão tipo U, ondas decimétricas, região de aceleração.

Área do Conhecimento: Astronomia – Física Solar

Introdução

Os "flares" solares são fenômenos explosivos que liberam grandes quantidades de energia, da ordem de 10^{29} - 10^{33} ergs. O processo mais aceito para produzir a liberação de grandes quantidades de energia é a conversão da energia magnética das regiões ativas, por aniquilação e reconexão das linhas de campo dos arcos magnéticos (MELROSE, 1993), resultando no aquecimento do plasma ambiente e aceleração de partículas, preferencialmente elétrons, no topo (HOLMAN, 1985; MASUDA e TSUNETTA, 1995) ou dentro dos arcos magnéticos, em zonas conhecidas por regiões de aceleração.

As partículas aceleradas propagam-se com velocidades da ordem de 0,1-0,3 c (sendo c a velocidade da luz no vácuo) ao longo das linhas abertas de campo magnético, em direção à alta coroa, ou ao longo das linhas de campo fechadas rumo aos pés dos arcos magnéticos. A interação dos feixes de elétrons acelerados com o plasma da coroa e cromosfera solar produz rádio emissões em diversas faixas de frequência, dependendo da densidade da região de emissão.

Observações e análise de estruturas finas na rádio emissão em ondas decimétricas representam diagnóstico de feixes de elétrons se deslocando e emissão não térmica e são de fundamental importância para o estudo da localização da emissão de rádio e da caracterização de parâmetros da configuração (estrutura), ou morfologia magnética das regiões de aceleração (ASCHWANDEN et al., 1994).

Portanto, a morfologia das rádio emissões, identificada a partir dos espectros dinâmicos em registrados pelo BSS, pode revelar características da geometria magnética e localização das regiões de aceleração (FERNANDES et al., 2000), conforme apresentado neste trabalho.

Estruturas finas na rádio emissão decimétrica

Explosões tipo III, U e J têm sido interpretados como emissão de plasma gerado por elétrons acelerados ao longo de campos magnéticos (arcos), na cromosfera solar e baixa coroa.

Emissões tipo III representam as rádio emissões mais estudadas em ondas métricas. São emissões não-térmicas e diretamente associadas a feixes de elétrons energéticos se propagando em direção à alta coroa. Na faixa de frequências decimétricas apresentam geralmente taxa de deriva em frequência inversa ("reverse slope" - RS), na direção da fotosfera solar (SAWANT et al., 1994; MELÉNDEZ et al., 1999; CECATTO et al., 2003; MÉSZÁROSOVÁ et al., 2008).

Emissões tipo U são observadas principalmente a baixa frequência, em ondas métricas e decamétricas (ver Stone e Faimberg, 1971; Karlický e Tlamička, 1976). Raramente explosões tipo-U na faixa de frequências decimétricas são observadas e esperadas, mesmo considerando a grande ocorrência de campos magnéticos fechados em baixas altitudes na atmosfera solar.

Acima de 1 GHz, observações de tipo-U foram relatadas por Güdel e Benz (1988); Yao et al.

(1997); Cecatto et al. (2002) e Fernandes et al., (2008). A mais alta frequência de tipo-U relatada na literatura é 2,6-3,8 GHz (WANG et al., 2001).

Instrumentação

O Espectroscópio Solar Brasileiro – BSS (do inglês Brazilian Solar Spectroscope), é o único espectrógrafo dedicado às observações solares na faixa decimétrica, com alta resolução e alta sensibilidade em operação no hemisfério sul. O BSS opera em 1000-2500 MHz em conjunto a uma antena parabólica de 9 metros de diâmetro (FERNANDES, 1997; SAWANT et al., 2001). A Tabela 1 apresenta as principais características do instrumento. O BSS tem capacidade para gravar finas estruturas em rádio emissão decimétrica (FERNANDES et al., 2000). Desde então, já foram registradas mais de 400 explosões solares (ver catálogos publicados por FERNANDES, 2003).

Tabela 1- Principais características do BSS

Diâmetro da antena	9 metros
Montagem	polar
Alimentador	log-periódico
Frequência	1000-2500 MHz
Resolução temporal	10 – 1000 ms
Resolução espectral	3 MHz
Número de canais	até 100
Sensibilidade	~3 s.f.u.
Tempo de observação	11 – 16 UT

Observações

As rádio emissões apresentadas foram registradas pelo BSS entre 1999 e 2001, durante o período de máximo do ciclo solar #23. Foram selecionadas estruturas finas com morfologia na rádio emissão do tipo III e III-RS (que apresentam frequência de início mensurável dentro da faixa de observação), tipo U e tipo J. As Figuras 1, 2, 3 e 4 mostram exemplos de espectro dinâmico das estruturas finas com estas morfologias.

Análise de dados

Aplicamos uma metodologia para determinação de parâmetros da fonte emissora à emissão tipo U registrada pelo BSS em 25 de outubro de 2001, às 15:13:20 UT, associada a um "flare" de intensidade X1.3 em raios-X (GOES), com pico às 15:02 UT. As principais características observacionais da emissão tipo U medidas são:

- banda de frequência: 1940-2060 MHz;
- frequência de retorno: 1940 MHz;
- duração total: 4,4 s;
- taxa de deriva em frequência: ~4.7 MHz/s (ascendente) e ~60 MHz/s (descendente).

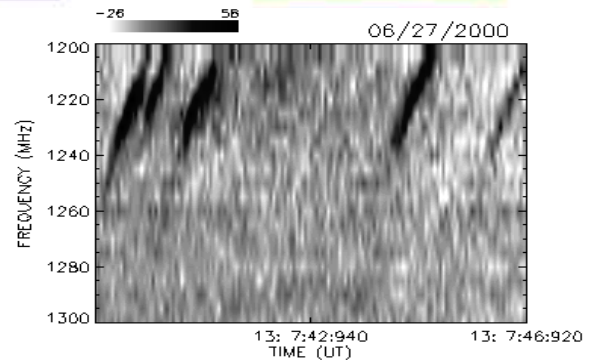


Figura 1– Espectro dinâmico de emissões tipo III (normal) registrado em 27/jun/2000 (~13:07 UT).

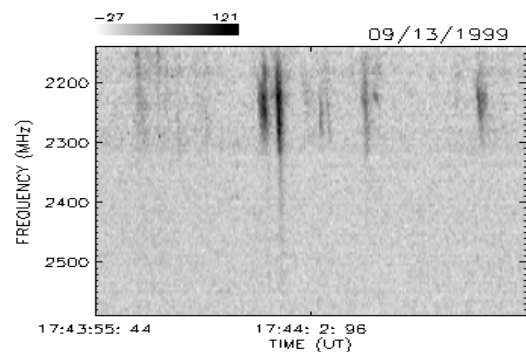


Figura 2– Espectro dinâmico de emissões tipo III-RS registrado em 13/set/1999 (~17:44 UT).

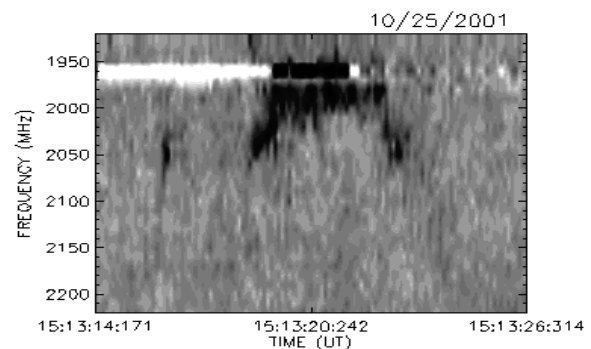


Figura 3– Espectro dinâmico de emissão tipo U-invertido registrada em 25/out/2001 (~15:13 UT).

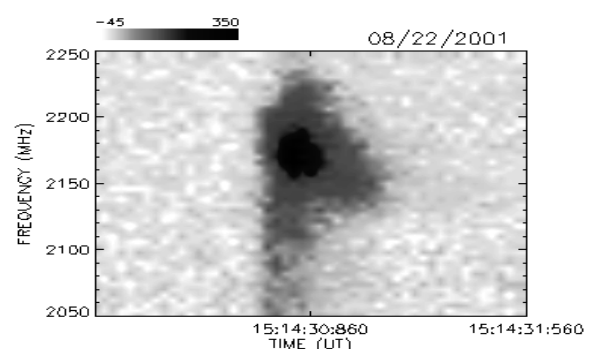


Figura 4– Espectro dinâmico de emissão tipo J registrada em 22/ago/2001 (~15:14 UT).

A partir das características da emissão tipo U medidas através do espectro dinâmico foram determinados os principais parâmetros da fonte emissora.

Densidade Eletrônica

Considerando que uma explosão tipo U é gerada pelo mecanismo de emissão de plasma, a frequência de plasma (f_p) está relacionada com a densidade eletrônica (n_e) pela equação

$$f_p \text{ (Hz)} = s \cdot 9 \times 10^3 n_e^{1/2}, \quad (1)$$

onde s é o parâmetro harmônico ($s = 1$ ou $s = 2$ para emissão fundamental ou segundo harmônico). A densidade eletrônica média será $n_e(2) = 1.3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Tempo de Vida dos Feixes de Elétrons

Na faixa decimétrica, os feixes de elétrons se propagam através de um meio relativamente denso, podendo ser rapidamente termalizados por colisões coulombianas. O tempo de colisão (t_D) é dado por (BOYD E SANDERSON, 1969):

$$t_D = 3,45 \times 10^{-20} v_b^3 / n_e, \quad (2)$$

onde n_e é a densidade eletrônica e v_b é a velocidade do feixe. O tempo de vida da emissão tipo U corresponde à duração total de 4,4 s.

Velocidade do Feixe de Elétrons

A velocidade do feixe de elétrons foi determinada pela Equação 2, considerando a duração de 4,4 s e a densidade de plasma. A velocidade obtida é $v_b = 1,26 \times 10^5 \text{ km/s}$ ($\sim 0,42 c$), (onde c é a velocidade da luz). Foi assumida emissão no segundo harmônico e considerada uma geometria semicircular para o arco magnético.

Temperatura da região

Uma relação entre temperatura (T), pressão (p) e tamanho (L) do arco é (ROSNER et al., 1978)

$$T = 1,4 \times 10^3 (pL)^{1/3} \quad (3)$$

Da lei dos gases perfeitos ($p = n_e k_b T$) também aplicável neste caso, a temperatura será dada por

$$T = 6,2 \times 10^{-4} (n_e L)^{1/2} \quad (4)$$

Foi considerada uma estrutura magnética semicircular com um raio de curvatura $r_o = 1,1 \times 10^{10} \text{ cm}$ (ASCHWANDEN et al., 1992). A extensão do arco, definida como o comprimento da estrutura semicircular, é dada por $L = (\pi/2) r_o = 1,7 \times 10^{10} \text{ cm}$. Usando a Equação 4, foi obtida, $T = 9 \times 10^6 \text{ K}$.

Intensidade do Campo Magnético

O parâmetro β (razão entre a pressão térmica e magnética), é dada por

$$\beta = 3.47 \times 10^{-15} (n_e T / B^2) \quad (5)$$

A condição para o plasma estar magnéticamente confinado, como ocorre nos "loops", é $\beta < 1$ (pressão magnética domina a pressão do gás). Para $T = 9 \times 10^6 \text{ K}$, o limite inferior para a intensidade do campo magnético será de aproximadamente 20 G.

Os principais resultados da análise da emissão tipo U são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2– Parâmetros da região emissora.

Frequência de Plasma (MHz)	Densidade Eletrônica (10^{10} cm^{-3})	Temperatura (K)	Campo Magnético (G)
975-1035 (2º. harm.)	1,3-4,9	9×10^6	> 20

Conclusão e comentários finais

Neste trabalho foram apresentadas estruturas finas presentes em rádio emissões decimétricas solares registradas pelo BSS.

A morfologia destas rádio emissões identificada nos espectros dinâmicos claramente suportam as hipóteses que são geradas a partir da interação de feixes de partículas aceleradas se propagando ao longo das estruturas magnéticas solares. Permitindo fazer conjecturas sobre a própria geometria da configuração magnética nas regiões de aceleração e emissão (Figura 5).

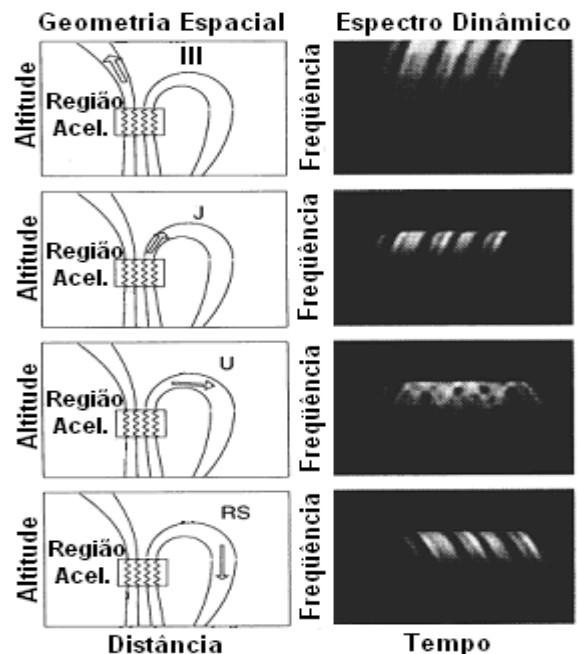


Figura 5– (Esquerda) Representação da configuração magnética de arcos interagindo nas regiões de aceleração. (Direita) respectivos espectros dinâmicos das rádio emissões geradas por feixes de elétrons acelerados nas linhas de campo magnético abertas ou fechadas (Adaptada de Aschwanden et al., 1994).

Foi apresentada a metodologia e a análise de uma emissão tipo U observada em 25 de outubro de 2001 (~15:13:22 UT) (FERNANDES et al., 2008). A partir das características observadas no espectro dinâmico foi possível determinar os principais parâmetros da fonte. Foi assumida emissão no segundo harmônico, uma vez que os valores obtidos para a velocidade do feixe (~ 0,4 c) são consistentes com Aschwanden et al. (1992) e Yao et al. (1997).

Certamente, um cenário mais realista seria adotar uma geometria para a estrutura magnética ajustando uma forma não exatamente semicircular, na qual os ramos ascendente descendente formem um ângulo entre si.

Conforme mencionado, foram identificadas diversas outras estruturas finas (tipo III, J e U) para as quais pretende-se aplicar metodologias de análise semelhantes às aplicadas aqui para melhorar a determinação dos parâmetros obtidos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Grupo de FMI – DAS/INPE pelos dados. J.A.S.S. Dutra agradece a CAPES e a UNIVAP pela bolsa de Mestrado.

Referências

- ASCHWANDEN, M.J.; BASTIAN, T.S.; BENZ, A.O.; BROSIUS, J.W. Decimetric solar type bursts: VLA and PHOENIX observations. **ApJ.**, V.391, p.380-392, 1992.
- ASCHWANDEN, M.J.; BENZ, A.O.; MONTELLO, M.L., **ApJ.**, V.431, n.1, p.432-449, 1994.
- BOYD, T.J.M.; SANDERSON, J.J. Plasma Dynamics, London, 1969.
- CECATTO, J.R.; SAWANT, H.S.; FERNANDES, F.C.R. et al. Decimetric Reverse Drift and U-Type Bursts in the April 9, 2001 Flare. **COSPAR Colloquia Series**, V.13, p.313, 2002.
- CECATTO, J.R.; SAWANT, H.S.; FERNANDES, F.C.R.; KRISHAN, V.; NERI, J.A.C.F.; MORAES FILHO, J.C., **Adv. Space Res.**, V.32, n.12, p.2533-2537, 2003.
- FERNANDES, F.C.R. Tese (de Doutorado em Astrofísica) INPE, São José dos Campos. 1997.
- FERNANDES, F.C.R., Catálogo de espectros dinâmicos de explosões solares decimétricas registradas pelo Brazilian Solar Spectroscope (BSS): 1999, 2000, 2001 e 2002. INPE, 2003.
- FERNANDES, F.C.R.; CECATTO, J.R.; NERI, J. A.C.F. et al., O Brazilian Solar Spectroscope

(BSS) e os problemas atuais da física solar. **Bol. Soc. Astron. Brás.**, V.20, n.2, p.33-43, 2000.

- FERNANDES, F.C.R.; DUTRA, J.A.S.S.; CECATTO, J.R.; MÉSZÁROSOVÁ, H., SAWANT, H.S. Source parameters estimated from decimetric type-U solar bursts recorded by Brazilian Solar Spectroscope, **Sol. Phys.**, 2008 (submetido).
- GÜDEL, M., BENZ, A.O. A catalogue of decimetric solar flare radio emission. **A&A Suppl. Ser.**, V.75, p.243-259, 1988.
- HOLMAN, G.D. Acceleration of runaway electrons and joules heating in solar flares, **ApJ**, V.293, n.2, p.584-594, 1985.
- KARLICKÝ, M., TLAMICHA, A. The trajectories of U-type solar radio bursts. **Astron. Inst. Czech. Bull.**, V.27, n.4, p. 223-226, 1976.
- MASUDA, S.; TSUNETA, S., **Pub. Astron. Soc. Japan**, V.47, p.677, 1995.
- MELENDEZ, J.L., SAWANT H.S.; FERNANDES, F.C.R.; Benz, A.O., **Solar Phys.**, V.187, p.77-88, 1999.
- MELROSE, D. Solar flares - Current dissipation or magnetic annihilation? **Austr. J. Phys.**, V.46, n.1, p. 167-193, 1993.
- MÉSZÁROSOVÁ, H., KARLICKÝ, M., SAWANT, H.S., FERNANDES; F.C.R.; CECATTO; J.R.; ANDRADE, M.C. **A&A**, V.484, p.529-536, 2008.
- ROSNER, R., TUCKER, W.H, VIANA, G.S. Dynamics of the quiescent solar corona. **ApJ.**, V. 220, p. 643, 1978.
- SAWANT, H.S.; FERNANDES, F.C.R., NERI, J.A.C.F. **Ap.J. Supp. Ser.**, V.90, p.689-681, 1994.
- SAWANT, H.S.; SUBRAMANIAN, K.R.; FARIA, C. et al., Brazilian Solar Spectroscope (BSS). **Solar Phys.**, V. 200, n.1-2, p.167-176, 2001.
- STONE, R.G., FAINBERG, J. A U-Type Solar Radio Burst Originating in the Outer Corona. **Solar Phys.**, V.20, p.106-111, 1971.
- WANG, M., FU, Q.J., XIE, R.X., HUANG, G.L., DUAN, C.C. Observations of Microwave Type-U Bursts. **Solar Phys.**, V.199, p.157-164, 2001.
- YAO, J.; YU, X; TLAMICHA, A.; WEI, F. A solar type U bursts in the decimetric range. **Adv. Space Res.**, V. 20, n.12, p.2351, 1997.