

ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS COM TÉCNICAS DE ONDELETAS ESTUDO DE CASO: EMISSÕES SOLARES DECIMÉTRICAS TIPO SPIKES

**Dalton D. Meira¹, Rafael D. C. Silva¹, Maurício J. A. Bolzan², Zuleika A. L. Sodré¹,
Francisco C. R. Fernandes¹**

¹Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP, São José dos Campos, Brasil

²Universidade Federal de Goiás - UFG, Jatai – Brasil

Resumo – O objetivo deste trabalho é estudar a técnica de análise de séries temporais com ondeletas, também conhecida como transformada de *wavelet*. As transformadas de ondeletas podem ser vistas como mecanismos para decompor ou quebrar sinais nas suas partes constituintes, permitindo analisar os dados em diferentes domínios de frequência, com a resolução de cada componente amarrada à suas escalas. Com a finalidade de validar a aplicação desta técnica de ondeleta em séries temporais de registro de rádio-emissões solares, foi feita uma análise de emissões tipo *spikes* registradas pelo *Brazilian Solar Spectroscope* (BSS), na faixa de frequência decimétrica (1000-2500 MHz). Os resultados preliminares, aqui apresentados, mostram um período de intermitência médio dos *clusters* de *spikes* da ordem de 16 segundos. A técnica de ondeletas será também aplicada aos dados de outras emissões solares já selecionados e futuramente aos dados do espectrógrafo CALLISTO-BR, para a análise de seu comportamento espectro-temporal.

Palavras-chave: Ondeleta, séries temporais, rádio-emissão solar, *spikes* decimétricos

Área do Conhecimento: Física Solar

Introdução

Fenômenos intermitentes são importantes para que um sistema geomagnético se reorganize, isto é, para que o sistema possa retornar a um estado estacionário após troca de energia, por exemplo. Entretanto, a pergunta é “de que maneira esta reorganização ocorre?” e, “como se dão as trocas de energia entre as diversas escalas do sistema?”.

Para tal análise, usamos as transformações de ondeletas (ou em inglês *wavelets*) para decompor a série temporal nos domínios do tempo e da frequência. Isto nos permite estudar os sinais não-estacionários.

Essas transformadas podem ser vistas como mecanismos para decompor ou quebrar sinais nas suas partes constituintes, permitindo analisar os dados em diferentes domínios de frequência com a resolução de cada componente amarrada à suas escalas. Além disso, em sua análise, podemos usar funções que estão contidas em regiões finitas, tornando-se convenientes na aproximação de dados com descontinuidades.

As ondeletas constituem uma ferramenta matemática para decompor funções hierarquicamente, permitindo que uma função seja descrita em termos de uma forma grosseira, mais outra forma que apresenta detalhes que vão desde os menos delicados aos mais finos.

Por causa de suas propriedades únicas, são usadas, por exemplo, em análise funcional, em matemática, como reconhecimento de padrões.

Neste trabalho, apresentamos uma análise de emissões tipo *spikes* registradas pelo *Brazilian Solar Spectroscope* (BSS), em 24 de junho de 1999 (no intervalo de 16:53-16:56 UT), com alta resolução temporal (10-100 ms) e alta resolução espectral (5-10 MHz), na faixa de frequência decimétrica (1250-1750 MHz), aplicando a técnica de ondeleta.

O evento apresenta vários grupos (*clusters*) distintos de *spikes* com comportamento intermitente (característica aparentemente periódica).

Metodologia - Ondeletas

De acordo com Morettin (1999), a transformação ondeleta quebra um sinal nas componentes formadas pelas versões dilatada e deslocada de uma ondeleta original, chamada ondeleta-mãe. Dada uma ondeleta-mãe $\psi(t)$, as ondeletas filhas são dilatadas e deslocadas. Ela é representada matematicamente na equação (1):

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

O coeficiente $a > 0$ é o fator de escala que controla a dilatação da ondeleta-mãe e b é o parâmetro de translação determinando o deslocamento. O fator de escala está diretamente

relacionado à frequência ou período. Os coeficientes para a transformada são representados pela equação (2):

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} H(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

Na presente análise, foi escolhida uma ondefeita-mãe do tipo Gaussiana dada pela seguinte equação (3):

$$\Psi(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2}, \quad (3)$$

em que ω_0 é o parâmetro de frequência que permite o deslocamento do intervalo de frequência para as investigações.

A implementação da equação da transformada de ondefeitas ocorre através de um algoritmo desenvolvido na linguagem proprietária MATLAB, está sendo estudada a possibilidade de migrar para outra linguagem chamada IDL (*Interactive Data Language*).

Portanto, a metodologia baseia-se na obtenção dos dados do BSS, feita sua análise e selecionando os melhores períodos e frequências.

Estudo de Caso – Emissões tipo spikes

O *Brazilian Solar Spectroscope* - BSS (FERNANDES, 1997, SAWANT et al., 2001) está em operação regular desde 1998, para monitoramento da atividade solar na faixa de frequências decimétricas (1000-2500 MHz), com resolução temporal de 10 a 100 ms (FERNANDES et al., 2001).

O BSS já registrou mais de 400 explosões solares, apresentando estruturas finas, durante o ciclo de atividade solar #23 (FERNANDES, 2003a; 2003b; 2003c; 2003d). Entre as rádio emissões registradas estão as explosões tipo spikes decimétricos (FERNANDES et al., 2009).

Frequentemente, os spikes ocorrem na forma de grupos (*clusters*) nos domínios espectral e temporal identificados nos espectros dinâmicos em rádio. Entretanto, geralmente, diferentes *clusters* não mostram comportamento relacionado e não ocorrem simultaneamente (BENZ, 1986).

Vários mecanismos da emissão têm sido propostos para explicar a geração dos spikes decimétricos de milissegundos: emissão maser, emissão elétron-ciclotron, emissão maser síncrotron, emissão de plasma excitado por ondas eletrostáticas e eletromagnéticas ou pela radiação de corrente guiada, de acordo com

Aschwanden e Güdel (1989) (veja revisões por WU et al., 1985 e BENZ, 1986).

Como ainda há alguma controvérsia sobre os mecanismos que geram as emissões tipo spikes, a análise destas emissões registradas com alta resolução temporal pode contribuir no melhor entendimento dos seus mecanismos de emissão.

Cinco eventos com características espectro-temporais semelhantes a de spikes foram identificados nos registrados com alta resolução temporal (10-100 ms) e alta resolução espectral (5-10 MHz) do BSS. Cada evento apresenta vários grupos (*clusters*) distintos de spikes com comportamento intermitente.

O evento observado em 24 de junho de 1999 (no intervalo de 16:53-16:56 UT) foi selecionado para testar a aplicação de técnica de ondefeita para investigação do seu comportamento espectral e temporal. A Figura 1 apresenta o espectro dinâmico deste grupo de spikes.

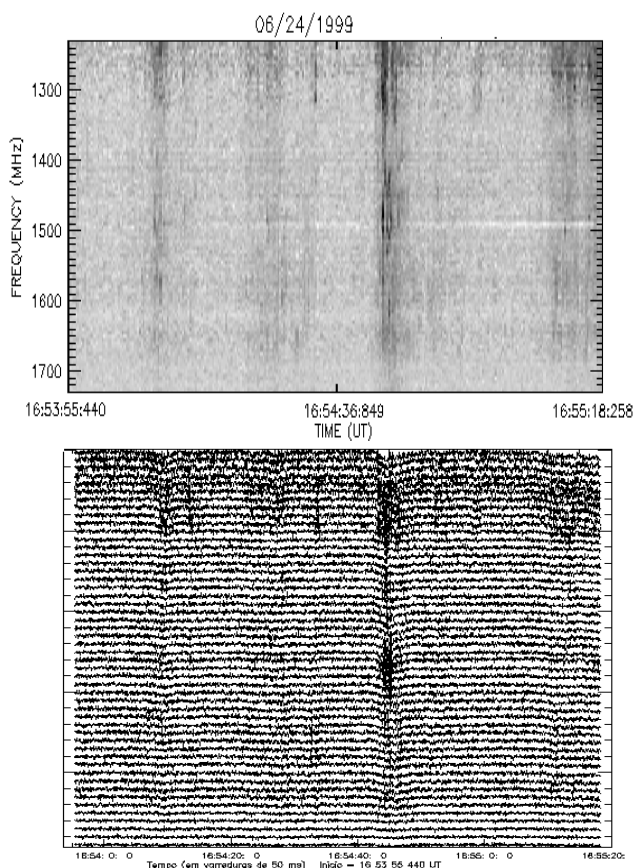


Figura 1 – (superior) Espectro dinâmico (com emissão de fundo – *background* - subtraído) da emissão tipo spike registrada em 24 de junho de 1999 (16:53-16:56 UT), na faixa de 1250-1750 MHz, apresentando *clusters* intermitentes. (inferior) Perfis temporais – registro pseudo 3D.

Foram determinados, a partir dos espectros dinâmicos, os seguintes parâmetros observacionais do evento: a duração do evento e de cada grupo, a faixa de frequência total e bandas relativas nas estruturas harmônicas.

A técnica da análise de ondeleta possibilita a determinação da cadência temporal para os vários *clusters*. Os resultados destas análises serão apresentados e discutidos na seção a seguir.

Resultados

Pela análise de ondeleta, considerando uma ondeleta-mãe do tipo Gaussiana (Morlet), o período da intermitência foi obtido para 3 séries temporais, referentes a 3 diferentes frequências: 1245 MHz, 1515 MHz e 1725 MHz. Os periodogramas da análise dos *spikes* de 24 de junho de 1999, mostrados na Figura 2, apontam um período de intermitência médio dos *clusters* de *spikes* de aproximadamente 16 ± 4 segundos. Períodos harmônicos de 32 e 64 segundos também são evidenciados.

Discussão

A aplicação da técnica de ondeleta nos registros de series temporais de explosões solares, em particular como apresentado neste trabalho, para emissões solares tipo *spikes* decimétricos, possibilita a identificação de padrões de intermitência ou periodicidade nas emissões. Estas evidências são importantes para estabelecimento dos mecanismos de emissão destas estruturas. Desta forma os resultados dos periodogramas obtidos, juntamente com outras análises futuras, servirão de base para a interpretação física dos *spikes* decimétricos.

As investigações das estruturas *clusters* de emissões tipo *spikes* decimétricos estão em andamento, incluindo a aplicação das técnicas de ondeleta a outros conjuntos de dados de *spikes* registrados (FERNANDES et al., 2009).

Conclusão

A mesma metodologia de análise está sendo aplicada a outros grupos de *spikes* selecionados.

Cabe ressaltar que as ferramentas computacionais para aplicação da análise por ondeleta, estão sendo adaptadas da linguagem MatLab para IDL (*Interactive Data Language*).

Pretende-se, em trabalhos futuros, utilizar o algoritmo da transformada de ondeleta para analisar os dados de frequência e tempo relativos a emissões solares registradas pelo espectrógrafo

CALLISTO-BR, na faixa de frequências métricas (45-870 MHz).

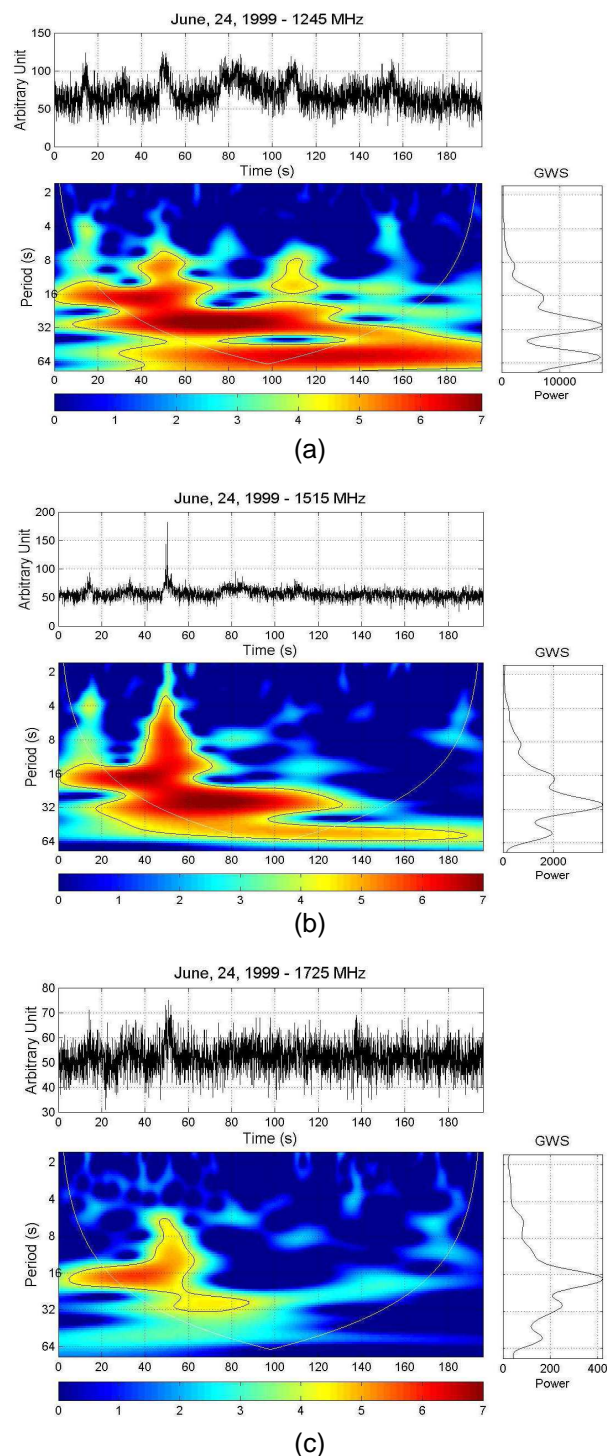


Figura 2 – O painel superior de cada imagem representa a série temporal do evento de 24 de junho de 1999: (a) nas frequências de (a) 1245 MHz; (b) 1515 MHz e (c) 1725 MHz e o painel inferior, o respectivo periodograma obtido pela transformada de ondeleta aplicada.

Agradecimentos

D.D. Meira agradece ao INCT-A / CNPq, pela bolsa de Iniciação científica concedida. R.D.C. Silva e Z.A.L. Sodré agradece m à CAPES pelas bolsas de Mestrado. Os autores agradecem o grupo de física solar do INPE, pelos dados de emissões tipo *spikes* decimétricas do BSS. A pesquisa teve o suporte do CNPq, por meio do Processo: 480045/2008-9.

Referências

- ASCHWANDEN, M.J.; G DEL, M. The Time Scale of Radio Millisecond Spikes: Theory Versus Observations. **Bulletin of the American Astronomical Society**, Vol. 21, p.847, 1989.
- BENZ, A.O. Millisecond radio spikes. *Solar Physics*, 104, 99, 1986.
- FERNANDES, F.C.R., BOLZAN, M.J.A., ROSA, R.R., DUTRA, J.A.S.S., - M'ESZ'AROSOV'A, H., SAWANT, H.S., 2009. **Proceedings IAU Symposium, Cambridge - University Press**. Vol. 264, 83.
- FERNANDES, F.C.R. Espectrógrafo Digital Decim trico de banda larga e investiga es de flares solares em rádio e raios-X. Tese (Doutorado em Astrofísica) INPE, São José dos Campos. INPE-6396-TDI/612, 1997.
- FERNANDES, F.C.R. Catálogo de espectros dinâmicos de explosões solares decimétricas registradas pelo Brazilian Solar Spectroscopy (BSS): 1999. INPE-9654-RPQ/740, INPE, 2003a.
- FERNANDES, F.C.R. Catálogo de espectros dinâmicos de explosões solares decimétricas registradas pelo Brazilian Solar Spectroscopy (BSS): 2000. INPE-9653-RPQ/739, INPE, 2003b.
- FERNANDES, F.C.R. Catálogo de espectros dinâmicos de explosões solares decimétricas registradas pelo Brazilian Solar Spectroscopy (BSS): 2001. INPE-9652-RPQ/738, INPE, 2003c.
- FERNANDES, F.C.R. Catálogo de espectros dinâmicos de explosões solares decimétricas registradas pelo Brazilian Solar Spectroscopy (BSS): 2002. INPE-9881-RPQ/742, INPE, 2003d.
- FERNANDES, F.C.R.: CECATTO, J. R.: NERI, J. A.C.F.: SILVA, M.J.B.: ROSA, R.R.: FARIA, C.: ANDRADE, M.C.: ALONSO, E.M B, MARTINON, A.R.F., DOBROWOLSKI, K.M., BARBOSA, T.M., FREITAS, D.C., NASCIMENTO, V.F., REIS, A.L.,

SAWANT, H.S. Observa es espectroscópicas inéditas de explosões solares decimétricas com 20 ms. **Boletim da Sociedade Astron mica Brasileira**, v.21, p.49 - 53, 2001.

- FERNANDES, F.C.R.; BOLZAN, M.J.A.; ROSA, R.R.; DUTRA, J.A.S.S.; CECATTO, J.R.; M'ESZ'AROSOV'A, H.; SAWANT, H.S. Semi-harmonic and intermittent solar decimetric spikes In: IAU Symposium No. 264 - Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets, 2009, Rio de Janeiro. **Proceedings of IAU Symposium No. 264**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. v.264. p.81 - 83.
- MORETTIN, P.A. **Ondas e ondaletas: da análise de Fourier a análise de ondaletas**, EdUSP, São Paulo, 1999.
- SAWANT, H.S.; SUBRAMANIAN, K.R.; FARIA, C.; FERNANDES, F.C.R.; SOBRAL, J.H.A.; CECATTO, J.R.; ROSA, R.R.; VATS, H.O.; NERI, J.A.C.F.; ALONSO, E.M.B.; MESQUITA, F.P.V.; PORTEZANI, V.A.; MARTINON, A. R. F. Brazilian Solar Spectroscopy (BSS). *Solar Physics*, v. 200, n.1-2, p.167-176, 2001.
- WU, D.J.: HUANG, J.: TANG, J.F.: YAN, Y.H. Solar Microwave Drifting Spikes and Solitary Kinetic Alfvén Waves. **Astrophysical Journal**, 665, L171, 2007.