



Análise espectral usando a transformada contínua de wavelet para pulsações magnéticas Pc5 em áreas magneticamente conjugadas

Camacho E. ¹, Benyosef L. ¹ e Mendes O. ²

¹ Observatório Nacional/ON

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/INPE

Copyright 2019, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 19-22 August 2019.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

A análise espectral em tempo-frequência para as pulsações geomagnéticas Pc5 (2 – 7)mHz, mostram uma considerável similaridade e simultaneidade entre as áreas geomagneticamente conjugadas. Os resultados sugerem que a faixa de (2 - 4)mHz corresponda à oscilações de ressonância na linha do campo geomagnético geradas por forças externas como a Instabilidade de Kelvin-Helmholtz. Os dados utilizados neste estudo foram obtidos de observatórios situados em áreas conjugadas considerando a tempestade magnética de 25/outubro/2016. A análise foi realizada utilizando a transformada wavelet contínua e a coerência, nos registros da componente geomagnética horizontal (H).

Introdução

As pulsações geomagnéticas Pc5, correspondem à períodos entre (150 - 600 seg) e são ondas ULF (*Ultra Low Frequency*) que estão constantemente presentes na magnetosfera perturbada. Este tipo de pulsação tem sido estudada utilizando dados de estações terrestres (PILIPENKO V. et al. 2010; OBANA Y. et al. 2005; HUDSON M.K. et al. 2004) e de satélites (TAKAHASHI & ANDERSON, 1992; BALASIS G. et al., 2015). Considera-se que as pulsações Pc5 estejam associadas com a Instabilidade de Kelvin-Helmholtz (IKH) na fronteira magnetosférica, sendo arrastadas pelo vento solar (BELAKHOVSKY e PILIPENKO, 2011; CAHILL L. e WINCKLER L., 1992). Estas Pc5 também podem estar associadas com as variações SSC (storm sudden commencement) e com os impulsos súbitos SI (sudden impulses) (OLIVA D. et al., 2014; SAITO T. et al., 1976). Em geral, o período de pulsação pode ser encurtado ou alongado devido à compressão ou expansão da magnetosfera durante a SSC ou pelos SI negativos, mostrando comportamentos similares em pontos conjugados (NAGATA, T 1967; IWABUCHI M. et al., 1980; KATO K. 1994; KOZYREVA O. et al., 2006).

As pulsações Pc5 são controladas não apenas pela energia dos fenômenos gerados na magnetosfera, mas também pelas condições ionosféricas. (OBANA, Y. et al.,

2005). A ionosfera pode exibir influências sob as pulsações geomagnéticas, ou seja, o sinal observado não corresponde à onda original, mas sim a uma onda eletromagnética irradiada por correntes induzidas na ionosfera, que sofrem uma significativa redução de amplitude e uma rotação de 90° no eixo maior de polarização em relação ao sinal original (RESENDE A, 2018; KIVELSON, M. e RUSSELL, 1995).

Dois pontos na terra são “geomagneticamente conjugados” se estiverem em extremidades opostas de uma área geométrica de mesmo tubo de fluxo de campo geomagnético, estando cada extremidade nos hemisférios opostos, norte e sul (WESCOTT E. 1966). A componente horizontal (H) do campo mostra-se mais susceptível às correlações e variações sob a influência de tempestades em postos conjugados (WESCOTT E., 1961).

Neste artigo apresentamos um estudo comparativo das pulsações magnéticas Pc5 detectadas simultaneamente em pontos conjugados, localizados em latitudes semelhantes sob influência de tempestade magnética com SSC. Foi utilizada a técnica da transformada wavelet para a análise espectral no domínio tempo-frequência.

Metodologia

Neste estudo, analisamos as pulsações magnéticas Pc5 de um par de observatórios magnéticos da rede *INTERMAGNET (Real-time Magnetic Observatory Network)* que estão geomagneticamente conjugados. As coordenadas geodésicas para esses observatórios estão apresentadas na tabela 1.

| Observatórios | País | Coordenadas geográficas | | Coord. de pontos conjugados | |
|---------------|-----------|-------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | | Lat[°] | Lon[°] | Lat[°] | Lon[°] |
| Kanoya (KNY) | Japão | 31,4 | 130,8 | -15,8 | 130,8 |
| Kakadu (KDU) | Austrália | -12,6 | 132,4 | 28,2 | 132,5 |

Tabela 1: Coordenadas geocêntricas dos observatórios magnéticos e seus pontos conjugados (para o ano 2016).

As coordenadas dos pontos conjugados foram calculadas empregando o modelo AACGM (*Altitude adjusted corrected geomagnetic*), que utiliza o IGRF-12 (*Internal Geomagnetic Reference Field*) para definir traços das

linhas do campo magnético de um hemisfério a outro (Shepherd, S. G., 2014). O ponto conjugado do Kakadu (KDU) esta localizado a 3,5° da direção sudeste do Kanoya (KNY), ver figura 1. Deve-se observar que os pontos conjugados estão sujeitos a deslocamentos sob efeito de tempestades magnéticas, entretanto a área de coerência conjugada (usando parâmetros ionosféricos) é circular e de raio cerca de 700 km (WESCOTT et al., 1966). O raio de coerência que estamos considerando para este trabalho é de 5° (figura 1).

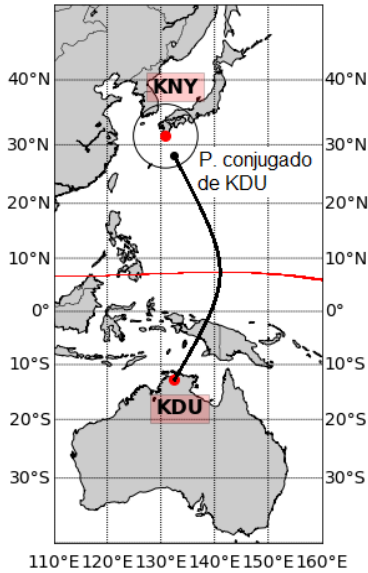


Figura 1: Mapa geográfico mostrando a localização dos observatórios e seus conjugados (pontos vermelhos e preto). A área de coerência (círculo preto) e o equador magnético (linha vermelha).

Os dados usados neste estudo correspondem a registros da componente H do campo nos observatórios KNY e KDU, com período de um minuto e registrados no dia 25 de outubro 2016. Este dia foi escolhido porque apresentou uma tempestade com índice magnético planetário considerável ($K_p = 7$) e um início súbito da tempestade acontecido às 09:22 UT (figura 2).

Para selecionar as pulsações Pc5, os dados originais foram filtrados usando um filtro digital passa-faixa de resposta ao impulso infinita (IIR, *Infinite Impulse Response*). As propriedades das pulsações Pc5 em KNY-KDU foram comparadas em termos da densidade espectral usando a análise da transformada wavelet contínua (CWT) e a coerência do sinal. A CWT de um sinal $x(t)$ é definida por (MUSAFAR L.M. 2014; DOMINGUES, 2016)

$$W(b, a) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) x(t) dt$$

O parâmetro “ a ” se refere à escala e “ b ” à translação da função *wavelet* analisadora ψ^* . A função de Morlet ($\gamma = 3$, TimeBandwidth = 60) tem sido usada como a *wavelet* mãe, ψ_0 que se escreve:

$$\psi_0(t) = \pi^{-1/4} \exp(i\omega_0 t) \exp(-t^2/2)$$

Onde t descreve o tempo e ω_0 é a frequência que representa o número de oscilações dentro a própria *wavelet* (DOMINGUES, 2016; MALLAT, 1999)

A transformada *wavelet* decompõe uma onda em suas componentes com base na frequência especificada por escalas *wavelet*. Isto permite monitorar quantitativamente a evolução dos sinais, decompondo uma série temporal em espaço de tempo-frequência. A potência da *wavelet* é determinada pelos coeficientes *wavelet*. Neste caso, a potência máxima das pulsações magnéticas Pc5 em um segmento horário pode ser representada pelo máximo do espectro total de energia para todas as escalas *wavelet* (MUSAFAR L.M. 2014; OLIVA D. et al., 2014).

Para complementar nosso estudo calculamos a coerência quadrada de *wavelet* das Pc5. A coerência *wavelet* é uma estatística que pode ser usada para examinar e quantificar a relação entre dois sinais ou conjuntos de dados (MALLAT, 1999). A coerência *wavelet* de duas séries temporais x e y é:

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1}W_n^{xy}(s))^2|^2}{S(s^{-1}|W_n^x(s)|^2) \cdot S(s^{-1}|W_n^y(s)|^2)}$$

Onde S é um operador de suavização no tempo e na escala. Observe que essa definição se assemelha ao de um coeficiente de correlação tradicional. A coerência *wavelet* fornece um estimador qualitativo da evolução temporal do grau de linearidade da interação entre duas séries temporais numa dada escala. O valor um significa uma relação linear entre os sinais (DOMINGUES et al., 2016). Escreva o operador de suavização S como:

$$S(W) = S_{escala}(S_{tempo}W_n(s))$$

Onde S_{escala} denota o alisamento ao longo do eixo da escala *wavelet* e S_{tempo} a suavização no tempo (GRINSTED et al., 2004; MALLAT, 1999).

Resultados

A figura 2 mostra a variação diurna da componente horizontal, dos observatórios KNY e KDU.

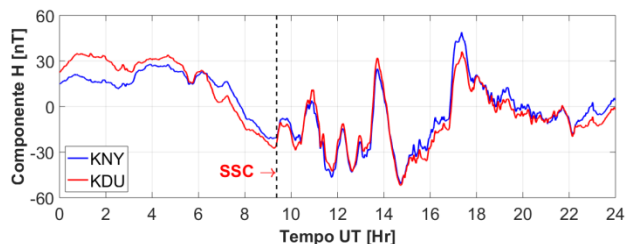


Figura 2: Variação diurna da componente H dos observatórios conjugados KNY-KDU (25/Out/2016).

As curvas de variações de H nos observatórios mostram um comportamento similar. Este comportamento é mais semelhante depois da presença da SSC (09:22 UT). Esta semelhança, em forma e amplitude, sugere que as duas áreas estão interligadas pelas linhas do campo magnético, confirmando a área de coerência conjugada escolhida. Semelhança das curvas do campo magnético em áreas conjugadas tem sido encontrada em trabalhos anteriores (WESCOTT, E. 1961, NAGATA, T. 1967)

As pulsações Pc5 obtidas nos pontos conjugados depois de filtrar as componentes H são apresentadas na figura 3. Para ter mais detalhes da resposta do campo durante a tempestade magnética e a SSC, foi seccionado um intervalo entre 10:00 e 20:00 UT.

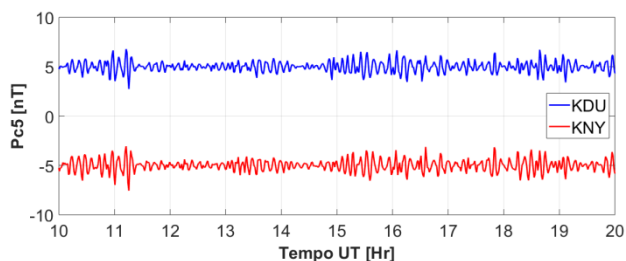


Figura 3: Dados filtrados mostrando pulsações magnéticas Pc5 registradas nos dados dos observatórios conjugados KNY-KDU (25/Out/2016).

As curvas das pulsações Pc5 no KNY e KDU mostram um padrão de propagação consistente, isto é, pacotes de ondas Pc5 simultâneas no tempo e com amplitudes similares (3 nT), especialmente, ao redor das 11:00 UT e entre às 15:00-16:30 UT. Estudos prévios também mostraram comportamento similar das Pc5 em pontos conjugados (OBANA et al., 2005; TONEGAWA et al., 1984)

A figura 4 mostra os espectros de potência de wavelet para os dois observatórios e a coerência wavelet entre

eles. Nos espectrogramas de KNY e KDU (figura 4) pode-se verificar que a principal contribuição para a potência espectral está localizada na faixa de frequências de 2,2mHz a 4mHz, ou de 250 a 450s, que pertence à zona de frequência contendo o limite inferior das pulsações Pc5. Também foi verificado que os máximos valores da transformada, ao redor das 11:00 UT, assumem valores muito parecidos em ambos gráficos da wavelet. Os resultados destas indicam que o evento da tempestade foi simétrico para os observatórios, especialmente ao redor das 11:00 UT.

No gráfico da coerência das wavelet, a cor amarela indica a máxima coerência verificada entre os espectrogramas da wavelet (KNY-KDU), que corresponde a 1. Este gráfico mostra uma grande coerência entre as Pc5 nos pontos conjugados, a maioria da área do gráfico contém o máximo valor da coerência.

Foi verificado que a máxima coerência entre os observatórios acontece ao redor de 10:00 e 11:30 UT e entre as frequências de 2 a 4 mHz. O gráfico da coerência quadrado de wavelet mostra outro evento considerável ocorrido ao redor das 15:30 e 16:30 UT. A alta coerência pode indicar a geração das Pc5 em presença da tempestade, e como ela pode influenciar simultaneamente nos pontos conjugados através das linhas de força associada.

As pulsações Pc5 em KDU e KDU mostraram características espectrais similares em: amplitude, período, intensidade, forma das ondas e estrutura da wavelet (Figura 2, 3, 4). Isso pode indicar, especificamente que depois do início súbito da tempestade, entre as 10:00-11:30 UT, que a fonte das pulsações estava localizada no plano equatorial da magnetopausa, e as ondas propaga-se através as linhas de fluxos até os pontos conjugados. Em contra partida, as pequenas diferenças mostradas nos gráficos wavelet, ex: entre as 15:30 e 16:30 UT, podem estar associadas à diferenças ionosféricas locais e possíveis reflexões das ondas Pc5 na parte superior da ionosfera

Conclusões

Pelos resultados foi verificado que as áreas conjugadas dos observatórios KNY e KDU, as curvas das variações da componente horizontal e as pulsações geomagnéticas Pc5 são semelhantes em amplitude, estrutura de onda e duração. Além disso, os escalogramas de wavelets mostraram que as potências espectrais tem padrões similares e simultâneos no tempo, e sua coerência wavelet é máxima ao redor das 11:00 UT. Pelos resultados obtidos, pode-se concluir também que existe uma boa correlação entre a atividade magnética nestas áreas conjugadas. Esta correspondência indica que as Pc5 se propagaram através das linhas de indução do campo até suas extremidades opostas, sendo observadas simultaneamente nos pontos conjugados.

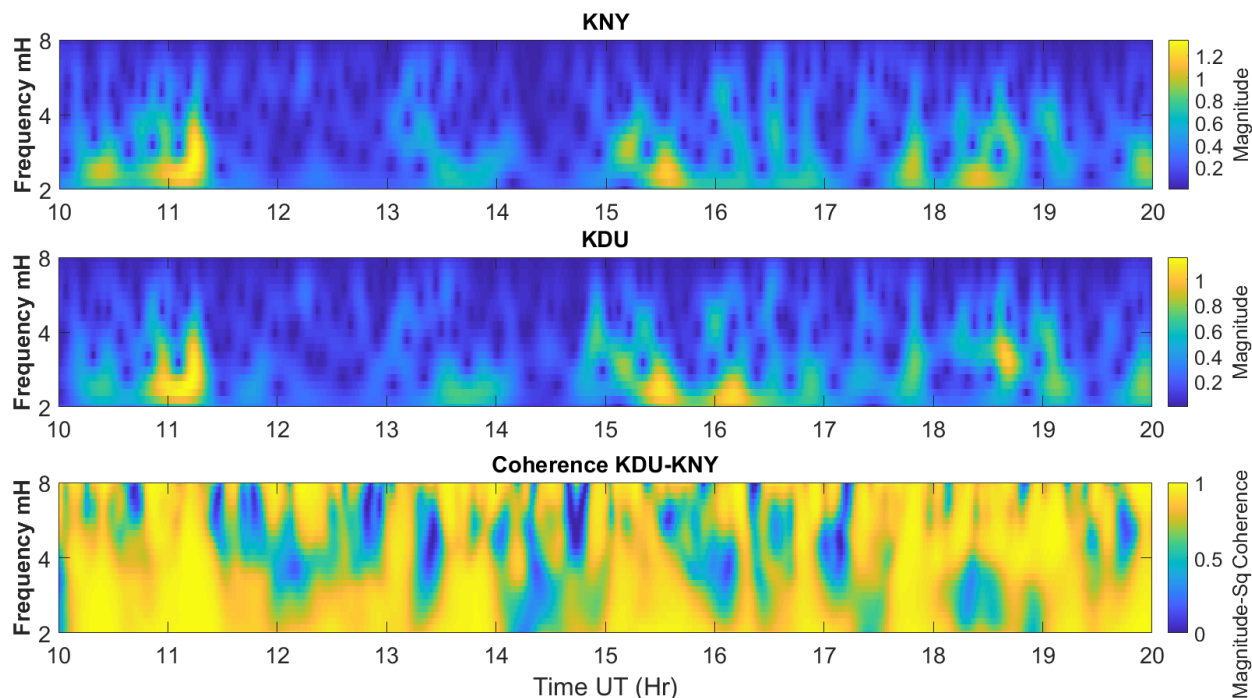


Figura 4: Escalogramas de wavelet no KNY e KDU, e a coerência entre eles.

Nós sugerimos que a instabilidade de Kelvin-Helmholtz esta relacionada com o mecanismo de geração das Pc5 nas latitudes verificadas. Outro fato importante de destacar são as pequenas diferenças nos escalogramas de wavelets, que são resultados da interação das Pc5 com a ionosfera de cada área conjugada. A ionosfera de cada ponto conjugado têm características desiguais, que pode variar para latitudes diferentes.

Estamos conscientes de que é consideravelmente limitado realizar um estudo sobre o comportamento das pulsações em pontos conjugados usando registros de apenas um par de observatórios. Apesar desta limitação mostramos que informações importantes puderam ser extraídas processando unicamente os dados desse par conjugado. A inclusão de mais observatórios será considerada para futuros estudos.

Agradecimentos

Agradecemos a INTERMAGNET pelos dados dos observatórios usados neste estudo. Também a CAPES pela bolsa de doutorado.

Referencias

BALASIS, G., et al. "Multi-satellite study of the excitation of Pc3 and Pc4-5 ULF waves and their penetration across the plasmopause during the 2003 Halloween superstorm." *Annales Geophysicae*. Vol. 33. No. 10. Copernicus GmbH, 2015.

BELAKHOVSKY, V., PILIPENKO, V. "Generation of magnetic eld Pc5 pulsations and particle fluxes during the recovery phase of a magnetic storm on October 31, 2003", *Geomagnetism and Aeronomy*, v. 51, n. 5, pp. 599. 2011.

CAHILL, L., WINCKLER, J., "Periodic magnetopause oscillations observed with the GOES satellites on March 24, 1991", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 97, n. A6, pp. 8239-8243. 1992.

DOMINGUES, M. O., et al. "Explorando a transformada wavelet contínua." *Revista Brasileira de Ensino de Física* 38.3. 2016.

FUKUSHIMA, N., 1969, "Equivalence in Ground Magnetic Effect of Chapman-Vestines and Birkeland-Alfven's Electric Current-Systems for Polar Magnetic Storms", *Rept. Jonos. Space Res. Japan*, v. 23, pp. 219-227, 1969.

- GRINSTED, ASLAK, JOHN C. MOORE, and SVETLANA JEVREJEVA. "Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series." *Nonlinear processes in geophysics* 11.5/6. 2004.
- HUDSON, M. K., et al. "A study of Pc-5 ULF oscillations." *Annales Geophysicae*. Vol. 22. No. 1. 2004.
- IWABUCHI, M., FUKUNISHI H., and SATO N. "Spectral and Polarization Characteristics of Pc 3-5 Magnetic Pulsations Observed at the Syowa Station-Iceland Conjugate Pair (ULF Waves in the Magnetosphere)(Proceedings of the Second Symposium on Coordinated Observations of the Ionosphere and Magnetosphere in the Polar Regions: Part I)". 1980.
- KATO, KEN-ICHI, NATSUO SATO, and YUTAKA TONEGAWA. "Estimation of Geomagnetic Conjugate Points Using Pc5 Geomagnetic Pulsation." *Journal of geomagnetism and geoelectricity* 46.5. 1994
- KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. "Introduction to space physics". Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- KOZYREVA, O. V., et al. "Long-period geomagnetic pulsations in the quasi-conjugate arctic and antarctic regions during the magnetic storm of April 16–17, 1999." *Geomagnetism and Aeronomy* 46.5. 2006.
- MALLAT, STÉPHANE. "A wavelet tour of signal processing". Elsevier, 1999.
- MUSAFAR, L. MUHAMMAD K., et al. "Pc5 magnetic pulsations during the outer electron radiation belt." *International Journal of Technology* 5.3, 269-276, 2014.
- MCPHERRON, R. L., "Magnetic pulsations: their sources and relation to solar wind and geomagnetic activity", *Surveys in Geophysics*, v. 26, n. 5, pp. 545-592, 2005.
- NAGATA, T. "Geomagnetic Conjugacy between the Antarctic and the Arctic." 65-80, 1967.
- OBANA, Y. et al. "North-south asymmetry of the amplitude of high-latitude Pc 3–5 pulsations: Observations at conjugate stations." *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 110.A10, 2005.
- RESENDE A. "análise de pulsações magnéticas pc3 e pc4 na região da anomalia magnética do atlântico sul". Teses de mestrado, INPE, 2018.
- OLIVA, DAVID, MARCELA C. MEIRELLES, and ANDRÉS RR PAPA. "A Study of Pc4-5 Geomagnetic Pulsations in the Brazilian Sector." *arXiv preprint arXiv:1404.4321*, 2014.
- PILIPENKO, V., et al. "Generation of magnetic and particle Pc5 pulsations during the recovery phase of strong magnetic storms." *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 466.2123, 2010.
- SAITO, T. and MATSUSHITA, S. "Geomagnetic Pulsations Associated with SSC and SI" *Planetary Space Sci.* 15, p.573. 1967.
- TAKAHASHI, K., and R. L. McPherron (1982), Harmonic structure of Pc 3– 4 pulsations, *J. Geophys. Res.*, 87, 1504.
- TONEGAWA, Y., and H. FUKUNISHI. "Harmonic structure of Pc 3–5 magnetic pulsations observed at the Syowa-Husafell conjugate pair." *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 89.A8, 1984.
- WESCOTT, E. "Magnetconjugate phenomena." *Space Science Reviews* 5.4, 1966.
- WESCOTT, E. "Magnetic variations at conjugate points." *Journal of Geophysical Research* 66.6, 1961.