

ANÁLISE DO RUÍDO DAS SÉRIES TEMPORAIS GNSS

José Nuno LIMA¹

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Núcleo de Geodesia Aplicada

Resumo: Grande parte dos estudos que utilizam o GNSS para a monitorização de deslocamentos de estruturas de engenharia civil ou de fenómenos naturais limitam-se a estimar a tendência linear das séries temporais para obter taxas ou velocidades. Recorrendo, por norma, ao estimador da regressão linear obtido pelo método dos mínimos quadrados que pressupõe que os seus erros tenham uma distribuição normal (gaussiana) e que não estejam temporalmente correlacionados (ruído branco). No entanto, é frequente encontrar nas séries temporais GNSS sinais ou ruído com correlação temporal que, em certos casos, podem originar erros significativos na tendência linear. Através da densidade espectral de potência é possível caracterizar o tipo de ruído (colorido ou branco) e identificar eventuais sinais na série temporal. Neste trabalho aplica-se esta metodologia a várias séries temporais GNSS.

Palavras-chave: GNSS / Séries Temporais / Densidade Espectral / ruído branco / ruído colorido

1. INTRODUÇÃO

A larga utilização do GNSS para monitorizar deslocamentos de estruturas de engenharia civil ou de fenómenos naturais tem originado muitos artigos e comunicações científicas. Williams (2004) conclui que até duma forma mais geral, isto é, no sentido mais lato, é costume ajustar as séries temporais geodésicas e geofísicas (GNSS, marégrafos, etc.) à tendência linear da repetição das observações de cada série e obter as taxas e as velocidades da estrutura que se pretende monitorizar. Para isso, recorre-se ao estimador da regressão linear obtido pelo método dos mínimos quadrados que pressupõe que os seus erros tenham uma distribuição normal (gaussiana) e que não estejam temporalmente correlacionados (caracterizados por serem ruído branco). Mas frequentemente as séries temporais GNSS contêm sinais e estão afectadas por ruído colorido pondo em causa a “legitimidade” de se utilizar a tendência linear da série para estimar as suas taxas e velocidades. Neste trabalho procura-se caracterizar o ruído de séries temporais GNSS através da função de densidade espectral de energia, utilizando as transformadas rápidas de Fourier.

O Projecto SUBSIn – Utilização do InSAR na detecção e caracterização de subsidência e deslizamentos de solos na região de Lisboa (PTDC/CTE-GEX/6521/2006) – propunha monitorizar a deformação do solo da zona de Lisboa com InSAR. Alguns destes resultados obtidos com InSAR foram confrontados com medições de estações GNSS permanentes e de nivelamento geométrico de precisão (Lima et al., 2009, Henriques e Lima, 2011). As estações GNSS permanentes utilizadas neste projecto pertencem a várias instituições nacionais e os seus dados são públicos, mais detalhes sobre estas estações poderão ser consultadas em Henriques e Lima (2011).

Por vezes não é clara a distinção entre sinal e ruído, independentemente do tipo deste último. No entanto, Brown e Hwang (1992) definem simplesmente ruído por tudo aquilo que normalmente não é pretendido. Assim, depreende-se que o sinal será o que normalmente se pretende estimar. Balizando a problemática desta distinção, na presença exclusiva de ruído branco parece difícil, se não impossível, retirar algum sinal da série temporal que não seja a tendência linear. Por outro lado, a existência de ruído colorido não permite concluir a existência de sinal: na observação há muitos erros correlacionados com o tempo e estes não sendo bem modelados ou corrigidos originam ruído colorido. Por último, diz o físico Rolf Landauer “the noise is your signal” (IBM, 2008), esta frase que poderá lançar ainda mais ruído na distinção entre sinal e ruído, está inserida num contexto bem diferente. De facto, segundo a explicação desta frase, à nanoescala nada nos servirá ter o ruído

na mesma ordem de grandeza do sinal pois assim não se podem separar um do outro. O que vai corroborar a afirmação anterior, sobre a possibilidade de extrair qualquer sinal a partir do ruído branco.

2. CARACTERIZAÇÃO DO RUÍDO ATRAVÉS DA DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA

A função densidade espectral de potência para um processo aleatório $X(t)$ está definida em muitos trabalhos, e.g. Brown e Hwang (1992) ou Priestley (1981), podendo ser calculada através das transformadas rápidas de Fourier.

Para Brown e Hwang (1992) o ruído branco é definido como sendo um processo aleatório estacionário tendo uma função densidade espectral de potência constante. O termo “branco” vem, aliás, do facto da luz branca conter todas as frequências visíveis.

Segundo Agnew (1992) a densidade espectral de potência, P , de muitos fenómenos geofísicos pode ser aproximada por uma lei de potência (*power law*), função da frequência f , da seguinte forma:

$$P(f) = P_0 f^{-\alpha} \quad (1)$$

em que α é o índice espectral e P_0 é uma constante. Quanto maior for o valor de α mais correlacionada temporalmente e com mais energia em baixas frequências será a série temporal. Segundo Mao et al. (1999) ruído branco (*white noise*) tem um índice espectral igual a 0, ruído do tipo flicker (*flicker noise*) tem um índice espectral igual a 1 e ruído browniano (*random walk noise*) tem um índice espectral igual a 2.

Mas Agnew (1992) refere que os índices espectrais não são necessariamente valores inteiros. Assim, sinais e ruído com índices espectrais de valor fraccionário no intervalo $1 < \alpha < 3$ são designados por “*fractal random walk*”, e no intervalo $-1 < \alpha < 1$ são designados por “*fractal white noise*”. E, ainda, que as séries temporais cujo ruído tenha um índice espectral compreendido no intervalo $-1 < \alpha < 1$ são consideradas como sendo estacionárias (média e variância invariantes no tempo), nos restantes casos são consideradas não estacionárias.

Será importante referir, ainda, que o espectro de uma série temporal de observações pode ser modelado como a soma de ruído branco com ruído colorido (Langbein e Johnson, 1997).

Uma estimativa do erro para a taxa estimada pela regressão linear da série temporal (σ_r) pode ser dada para o caso do ruído branco (Zhang et al., 1997):

$$(\sigma_r)_w \cong \frac{2\sqrt{3}\sigma_w}{N^{1/2}T} = \frac{2\sqrt{3}\sigma_w}{f_s^{1/2}T^{3/2}}, \quad N \gg 1 \quad (2)$$

E para o caso do ruído browniano por:

$$(\sigma_r)_{rw} \cong \frac{\sigma_{rw}}{T^{1/2}}, \quad N \gg 1 \quad (3)$$

onde T é o tempo da duração da série temporal, f_s é a frequência de amostragem, σ_w e σ_{rw} são os desvio padrão do ruído branco e do ruído browniano, respectivamente.

Para o caso geral do ruído, Mao et al. (1999) apresenta a seguinte estimativa para o erro da taxa estimada por regressão linear:

$$\sigma_r \cong \left(\frac{12\sigma_w^2}{gT^3} + \frac{a\sigma_f^2}{g^b T^2} + \frac{\sigma_{rw}^2}{T} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Onde g é o número de medições por ano, T é o tempo da duração da série temporal expresso em anos, σ_w e σ_f são respectivamente os valores do ruído branco e do ruído do tipo flicker expressos em mm, σ_{rw} é o valor do ruído browniano expresso em mm/ano, a e b são valores empíricos deduzidos por Mao et al. (1999).

3. AS SÉRIES TEMPORAIS ANALISADAS

Do projecto SUBSIn consideraram-se os vectores IST1 – FCUL, CASC – FCUL e CASC – PARC, cujo processamento com o *software* BERNESE (Lima et al., 2009 e Henriques e Lima, 2011) originaram as séries

temporais que se apresentam na Figura 1 (IST1 – FCUL), na Figura 2 (CASC – FCUL) e na Figura 3 (CASC – PARC).

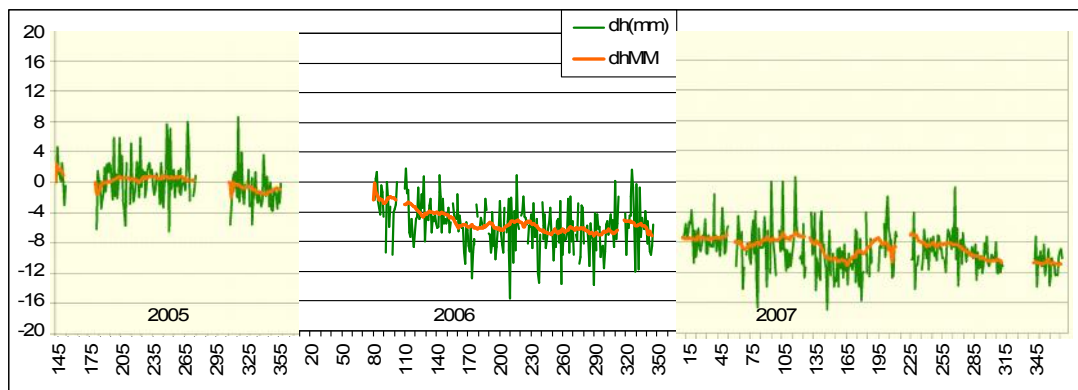


Figura 1 – Série temporal da variação na componente dh do vector IST1 – FCUL e sua respectiva média móvel de 30 dias (dhMM, a laranja e traço mais largo). As ordenadas estão expressas em mm e as abcissas em dias do ano, para os anos de 2005, 2006 e 2007.

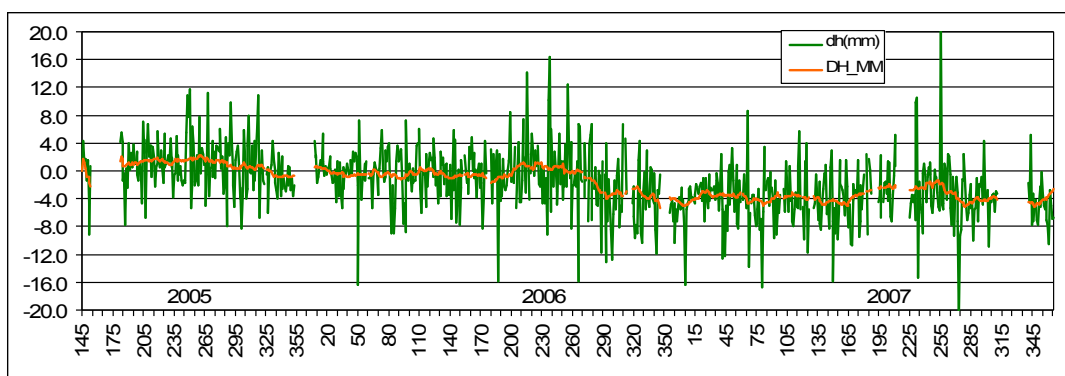


Figura 2 – Série temporal da variação na componente dh do vector CASC – FCUL e sua respectiva média móvel de 30 dias (DH_MM, a laranja e traço mais largo). As ordenadas estão expressas em mm e as abcissas em dias do ano, para os anos de 2005, 2006 e 2007.

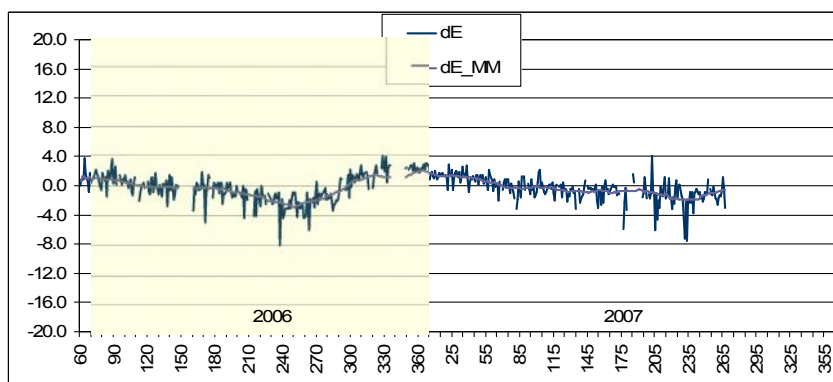


Figura 3 – Série temporal da variação na componente dE do vector CASC – PARC e sua respectiva média móvel de 30 dias (dE_MM, a azul mais claro e traço mais largo). As ordenadas estão expressas em mm e as abcissas em dias do ano, para os anos de 2006 e 2007.

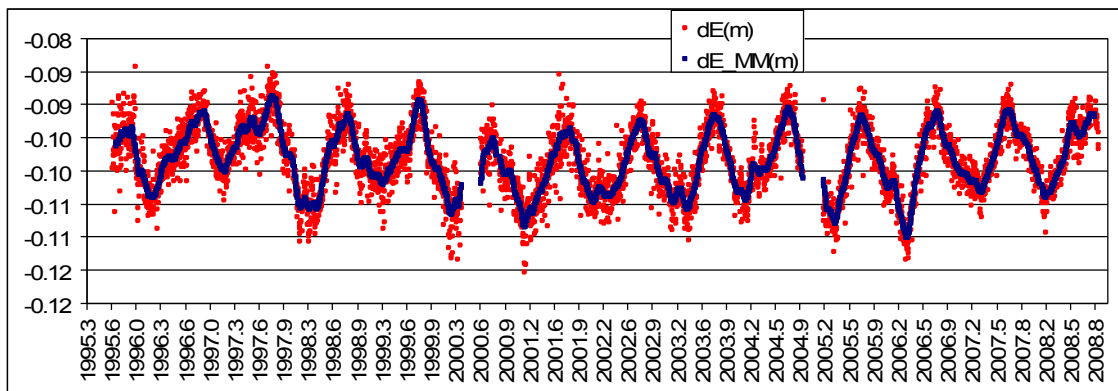


Figura 4 – Série temporal da variação na componente dE da estação DAM2 da barragem de Pacoima (EUA) e sua respectiva média móvel de 30 dias (dE_MM, a azul e traço mais largo). As ordenadas estão expressas em m e as abcissas em dias do ano, para os anos de 1995 a 2008.

Também se apresenta a série temporal GNSS (Figura 4) duma estação colocada no meio do coroamento da barragem de abóbada de Pacoima (Estados Unidos da América, Califórnia), na componente Este, depois de se ter retirado a tendência linear da série, correspondente à velocidade anual da placa tectónica (<http://www.sopac.ucsd.edu/cgu-bin/refinedjavatimeseries.cgi>). Das séries temporais GNSS apresentadas foram calculadas as respectivas médias móveis de ordem 30 (médias de 30 dias) e traçadas nas Figuras 1 a 4.

4. CÁLCULO DO ÍNDICE ESPECTRAL

Para o cálculo do índice espectral foi utilizado o programa de análise de séries temporais Tsoft (Van Camp e Vauterin, 2005) para calcular para cada série temporal GNSS a função densidade espectral de potência (expressa em mm^2 , nas ordenadas, e em ciclos por dia, nas abcissas). Os valores destas funções podem ser exportados para ficheiros em ascii. Através do programa Excel da Microsoft, converteram-se os valores destas funções expressas $\text{mm}^2/\text{ciclos por ano}$, nas ordenadas, e ciclos por ano , nas abcissas. Por último, estimou-se a lei de potência que melhor se ajusta a cada uma das funções de densidade espectral de potência. As Figuras 5 a 8 apresentam a função de densidade espectral e respectiva lei de potência de cada série temporal referida atrás.

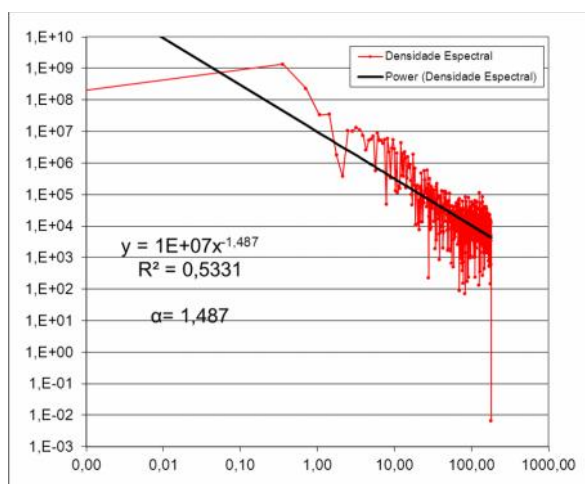


Figura 5 – Função de densidade espectral da série temporal da variação em dh do vector IST1 – FCUL (a vermelho) e respectiva lei de potência (a preto) ($\text{mm}^2/\text{ciclos por anos}$, ordenadas, e em ciclos por ano , abcissas).

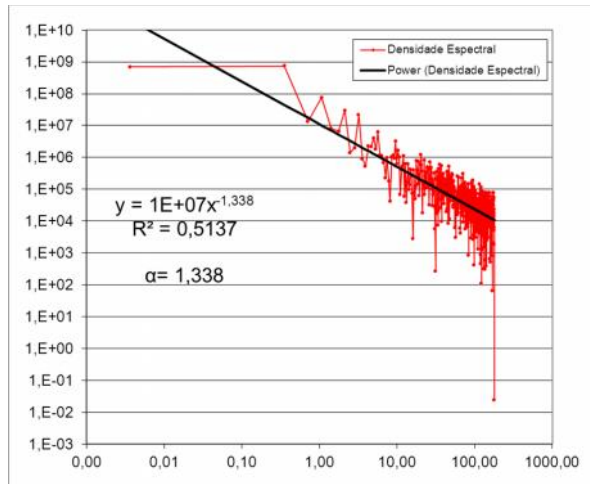


Figura 6 – Função de densidade espectral da série temporal da variação em dh do vector CASC – FCUL (a vermelho) e respectiva lei de potência (a preto) (mm²/ciclos por anos, ordenadas, e em ciclos por ano, abcissas).

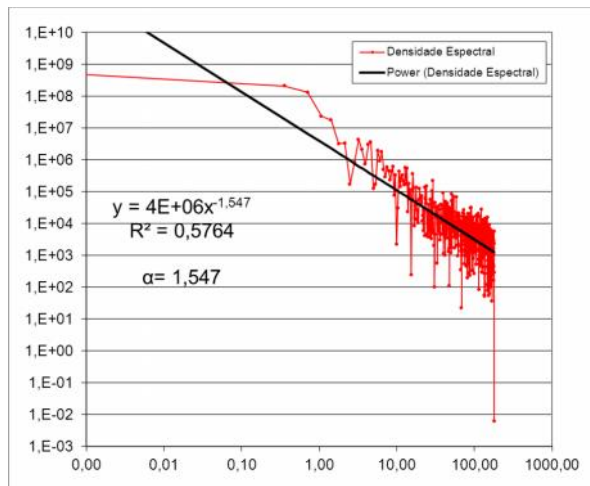


Figura 7 – Função de densidade espectral da série temporal da variação em dE do vector CASC – PARC (a vermelho) e respectiva lei de potência (a preto) (mm²/ciclos por anos, ordenadas, e em ciclos por ano, abcissas).

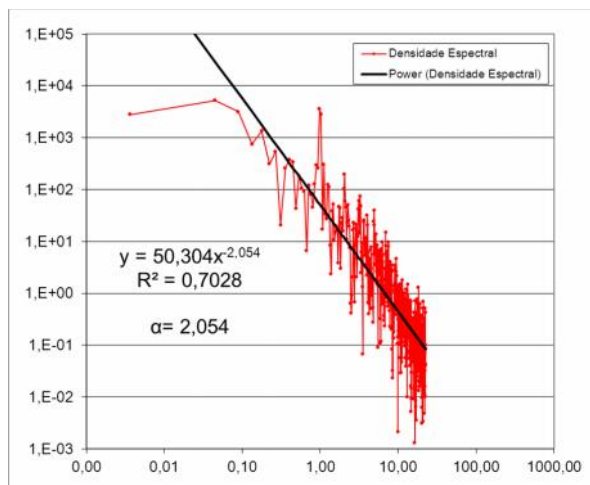


Figura 8 – Função de densidade espectral da série temporal da variação em dE da estação DAM2 de Pacoima (a vermelho) e respectiva lei de potência (a preto) (mm²/ciclos por anos, ordenadas, e em ciclos por ano, abcissas).

5. CONCLUSÕES

Todas as séries temporais GNSS apresentadas neste trabalho apresentam sinais e/ou ruído colorido, não sendo, assim, aconselhável estimar as velocidades através da regressão linear. As Figuras 5 a 8 mostram que os índices espectrais (α) variam entre 1,3 e 2. O valor mais elevado do índice espectral corresponde ao caso da barragem de Pacoima: trata-se de ruído browniano com um sinal mais energético com periodicidade anual que será devido à variação térmica anual.

Referências

- Agnew, D. (1992). The time-domain behaviour of power-law noises. *Geophys Res Lett* 19: 333-336.
- Brown, R.G. e Hwang, P.Y.C. (1992). *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*. John Wiley and Sons, 2nd Edition, New York.
- Henriques, M.J. e Lima, J.N. (2011). SUBSIn – Utilização do InSAR na Detecção e Caracterização de Subsidência e Deslizamentos do Solo na Região de Lisboa. LNEC, Lisboa, Relatório 198/2011 – DBB/NGA.
- IBM (2008). IBM Scientists “Quiet” Unruly Electrons in Atomic Layers of Graphite, at URL: <http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/23648.wss> (consultado em 2012.07.16).
- Langbein, J.O. e Johnson, H. (1997). Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation. *J Geophys Res* 102: 591-603.
- Lima, J.N., Henriques, M.J., Heleno, S.I., Fonseca, J. e Falcão, A.P. (2009). A Moitorização Altimétrica da Zona de Lisboa com GNSS e Nivelamento Geométrico. VI Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia. Actas da Conferência – Cartografia e Geodesia 2009, LIDEL, 15, p. 370-377.
- Mao, A., Harrison, C.G.A., Dixon, T.H. (1999). Noise in GPS coordinate time series. *J Geophys Res* 104:2797-2816.
- Priestley, M.B. (1981). *Spectral Analysis and Time Series*. Academic Press, London.
- Van Camp, M. e Vauterin, P. (2005). Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides. *Computers & Geosciences*, 31 (5) 631-640.
- Williams, S.D.P. (2003). The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series. *Journal of Geodesy* 76: 483-494. DOI 10.1007/s00190-002-0283-4.
- Zhang, J., Bock, Y., Johnson, H., Fang, P., Genrich, J.F., Williams, S., Wdowinski, S., Behr, J. (1997). Southern California permanent GPS geodetic array: error analysis of daily position estimates and site velocities. *J Geophys Res* 102: 18035-18055.

Contactos

José Nuno LIMA

jnplima@lneec.pt

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Núcleo de Geodesia Aplicada.

www.LNEC.pt

Portugal