

MODELO DE ENTROPIA GENERALIZADA APLICADO À ANÁLISE DA INTERMITÊNCIA NO SUBDOMÍNIO INERCIAL DA TURBULÊNCIA DESENVOLVIDA

Maurício José Alves Bolzan*, Leonardo Deane de Abreu Sá, Fernando Manuel Ramos,
Camilo Rodrigues Neto, Reinaldo Roberto Rosa
DCM - LAC / INPE, São José dos Campos, São Paulo, Brazil.

ABSTRACT

We apply a method based on the Wavelet Transform to separate fast response turbulent signals in two parts: coherent and background ones. We used a statistical model to study the distribution of increments of wind velocity data measured in the Pantanal atmospheric surface layer, during the IPE-2 (Integrated Pantanal Experiment) dry season campaign. The data were measured by 3D Campbell sonic anemometers located at a height of 24 m, at a sampling rate of 60 Hz. The goal of this investigation is to determine the statistical characteristics in both signals, original and filtered ones. To do this we calculate the probability density function (PDF) for wind velocity differences $V_r(x) = V(x) - V(x+r)$ at different increments, r . Some preliminary results show different statistical characteristics for the original part and filtered one of the signal. We show that the filtered part of the signal agrees very well with the model proposed by Ramos et al. (1999). We present some discussion concerning these results.

RESUMO

Neste trabalho é aplicado um método baseado na transformada em ondas para separar sinais turbulentos de resposta rápida em duas partes: coerente e filtrado. Foi utilizado um modelo estatístico para estudar a distribuição dos incrementos de velocidade do vento medidos na camada limite superficial na região do Pantanal, em uma torre micrometeorológica durante o IPE-2 (Experimento Integrado do Pantanal), na estação seca. Os dados foram medidos com um anemômetro sônico colocado em uma altura de 24 metros, a uma taxa de amostragem de 60 Hz. A meta deste trabalho é determinar as características estatísticas de ambos os sinais, original e filtrado. Para isto, foram calculadas as funções densidade de probabilidade (PDFs) para diferenças de velocidade do vento $V_r(x) = V(x) - V(x+r)$ obtidos para diferentes incrementos r . Resultados preliminares mostram diferentes características estatísticas para a parte original e residual do sinal. A parte residual do sinal concorda bem com o modelo proposto por Ramos et al. (1999). Mas isto não é verdade para a parte somente intermitente da turbulência. Apresenta-se discussão sobre os resultados obtidos.

INTRODUÇÃO

A turbulência desenvolvida é aquela verificada em escoamentos que apresentam elevados números de Reynolds. Nestes, o espectro turbulento projetado em gráfico log-log mostra uma região linear apresentando declividade de $-5/3$. Kolmogorov foi um dos primeiros a estudar as características estatísticas do espectro nesta região e seus trabalhos se concentraram em duas abordagens gerais as quais convencionalmente são referidas como sendo as Teorias K-41 e K-62 (Frisch, 1995). Pela Teoria K-41, o escoamento é considerado estacionário e a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta por unidade de massa, ϵ , é considerada constante. Pela Teoria K-62, admite-se que ϵ possua distribuição lognormal e leva-se em conta o caráter intermitente do escoamento na pequena escala. A existência da intermitência e a influência que ela exerce na estatística das flutuações turbulentas ainda é tema controverso, razão pela qual muita pesquisa tem sido feita para definir as características da turbulência nas pequenas escalas do escoamento (Lumley, 1992; Nelkin, 1992; Frisch, 1995; Sreenivasan e Antonia, 1997). Uma das abordagens estatísticas utilizadas para este fim é a de investigar as distribuições de incrementos das grandezas turbulentas no subdomínio inercial através da análise das funções densidade de probabilidade (PDFs) das mesmas.

* E-Mail do Autor: maurício@met.inpe.br, bolsista da CAPES

As PDFs são calculadas através da estatística das diferenças de velocidades $v_r(x) = v(x) - v(x+r)$ (ou outras grandezas turbulentas) para diversos incrementos, r .

Neste trabalho, foi utilizada uma metodologia baseada em Katul et al. (1994) segundo a qual são separadas as partes intermitentes do sinal daquelas residuais (de fundo). Isto é desenvolvido aplicando-se conjuntamente as técnicas da transformada em ondeletas e da amostragem condicional aos dados turbulentos. Uma vez gerados os sinais derivados, foram realizadas análises de PDFs de diferenças entre grandezas turbulentas separadas por uma distância r , tanto para o sinal filtrado como para o não filtrado. O estudo foi baseado na Teoria da Entropia Generalizada (TEG) de Tsallis (1988) e no modelo desenvolvido por Ramos et al. (1999).

TEORIA

A transformada em ondeletas constitui instrumento matemático através do qual é possível projetar o sinal em diversas escalas (Daubechies, 1992). Há diversos tipos ondeletas tais como as contínuas e as discretas. Com base em característica de ortonormalidade da transformada em ondeletas discretas, Katul et al. (1994) e Benzi et al. (1999) puderam identificar estruturas coerentes no subdomínio inercial da turbulência desenvolvida e assim, estudar o seu papel no problema da geração de intermitência na pequena escala do escoamento turbulento. Katul et al. (1994) utilizaram a transformada em ondeletas de Haar (útil para situações em que há variações abruptas nos sinais) para decompor o sinal em escala e aplicaram uma função indicadora para separar o sinal intermitente do sinal de fundo (Gaussiano).

Neste trabalho, embora se utilize basicamente a metodologia de Katul et al. (1994) e também aplique a transformada em ondeleta de Haar aos dados, foi empregado o procedimento de mais fácil implementação proposto por Hagelberg e Gamage (1994) para separar o sinal por escala e para identificar os fenômenos coerentes que possuíssem variância igual ou superior a 20 % da máxima variância em uma escala. Assim, a partir de um único sinal inicial (original), obtiveram-se dois sinais derivados: um contendo somente fenômenos coerentes e outro residual (filtrado), com características próximas da gaussianidade. Os dois sinais, filtrado e não filtrado (original) serviram para a determinação das PDFs (Ramos et al., 1999), baseadas na Teoria da Entropia Generalizada (TEG).

Ramos et al. (1999) basearam-se na teoria TEG proposta por Tsallis (1988) e propuseram a seguinte expressão para a PDF dos incrementos de velocidade:

$$p_q(x) = \left[1 - \mathbf{b} (1 - q) v_r^2 \right]^{1/(1-q)} / Z_q \quad (1)$$

onde $v_r = v(x+r) - v(x)$ e com

$$Z_q \equiv \left[\frac{\mathbf{b}(q-1)}{\mathbf{p}} \right]^{1/2} \frac{\mathbf{G}(1/(q-1))}{\mathbf{G}((3-q)/2(q-1))}$$

Ramos et al. (1999) mostraram que no contexto da turbulência plenamente desenvolvida, a equação (1) fornece um modelo simples e preciso para modelar a PDF de V_r . A partir da equação (1), pode-se obter o segundo momento

$$\langle v_r^2 \rangle = \frac{1}{\beta(5-3q)}, \quad (2)$$

e o coeficiente de achatamento:

$$K_r = \frac{3(5-3q)}{(7-5q)} \quad (3)$$

Este parâmetro, segundo Frisch (1995), pode ser considerada como uma "assinatura" da intermitência e assim, é muito útil para quantificar a intermitência.

DADOS EXPERIMENTAIS

Os dados experimentais foram obtidos em setembro de 1999, no Pantanal Matogrossense, durante a estação seca, em torre micrometeorológica instalada na Base de Estudos da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul em Corumbá, MS. As medidas foram realizadas com instrumentos de resposta rápida a uma altura de 24 m acima da superfície. As medidas do vento foram efetuadas com um anemômetro sônico tridimensional CSA-T3 (Campbell Scientific Inc) e as de temperatura, com um termômetro CA27 (Campbell Scientific Inc). Todos os dados utilizados neste estudo foram amostrados a uma frequência de 60 Hz, suficientemente elevada para as pesquisas de PDFs nas escalas pequenas do escoamento.

O sítio experimental caracterizou-se pela existência de condições de pista (fetch) bastante peculiares e variaram consideravelmente com a direção do vento dominante. Ao sul da torre encontram-se um extenso cinturão de mata ciliar e paradisais, distante aproximadamente 500m daquela. Ao norte e a oeste a vegetação apresenta arbustos e árvores de médio porte esporádicos, situados em região com extensas áreas de gramíneas. A leste, as gramíneas são predominantes (campos limpos).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram utilizados dados da componente longitudinal da velocidade do vento, u , para período de uma hora de duração, obtido durante situação fortemente convectiva. Foram calculadas as PDFs das diferenças de velocidade longitudinal do sinal filtrado e não filtrado, $\Delta u_r = u(x) - u(x+r)$, entre duas localizações na série temporal, x e $x+r$, onde r é dado por $r = \overline{U} \Delta t$, sendo $\Delta t = 0.2, 2, 20, 200$ s. Assumiu-se a validade da Hipótese de Taylor sobre a turbulência congelada (Gledzer, 1997), a qual, apesar de algumas vezes contestada (Kaimal et al., 1972; Srenivasan e Antonia, 1997), é possivelmente válida nas escalas correspondentes ao subdomínio inercial da turbulência desenvolvida (Katul et al. 1994).

Foi aplicado o método de separação dos fenômenos coerentes daqueles do sinal de fundo ao conjunto de dados. O resultado, ou seja, os dois sinais separados, são apresentados na Figura 1. Uma vez realizada esta separação, é possível examinar cada parte do sinal independentemente. Foi efetuado o seguinte procedimento: Foram obtidas as PDFs (normalizadas pela suas respectivas variâncias) e também, o momento de quarta ordem (coeficiente de achatamento) da componente horizontal da velocidade do vento, u , para o sinal original e filtrado. Os valores do coeficiente de achatamento para os dois sinais são mostrados na tabela 1. A partir das equações (1)-(3), foi determinada a distribuição de Tsallis correspondente para cada incremento de velocidade Δu mencionado acima.

Na figura 2 são apresentadas as PDFs para os resultados experimentais e os do modelo TEG para o sinal não filtrado (original). Observa-se uma boa concordância entre os resultados experimentais e os do modelo.

Para a parte filtrada do sinal, espera-se que haja uma melhor concordância com relação ao modelo teórico. Isto já foi estudado por Katul et al. (1994), que utilizaram dados amostrados a 21 Hz medidos acima de vegetação e encontraram discrepâncias entre os valores das curtoses previstos pela teoria e os resultantes de seus dados experimentais quando analisaram a parte intermitente dos sinais. Eles pesquisaram a influência da intermitência e de eventos contendo energia fortemente localizada em sinais turbulentos e mostraram que estes efeitos podem ser responsáveis pela não Gaussianidade verificada nas distribuições das variáveis meteorológicas no subdomínio inercial do espectro turbulento.

Efetivamente, as PDFs baseadas na aplicação do modelo TEG ao sinal filtrado, livre de fenômenos coerentes obtido no Pantanal concordaram melhor com os resultados experimentais, como mostrado na figura 3. Para tentar explicar fisicamente estes resultados, será necessário compreender os mecanismos que geram a intermitência e que "distorcem" as distribuições estatísticas. Isto, ao menos em parte, pode ser atribuído à ação de estruturas coerentes no escoamento (Frisch, 1995), que para o sinal filtrado, tais estruturas coerentes foram retiradas pela amostragem condicional. Mas, como existem vários padrões destas estruturas (Robinson, 1991), e como sua intensidade depende ao menos indiretamente, das condições de estabilidade atmosférica (Bolzan, 1998; Sá et al., 1999), é possível sugerir que

difícilmente exista um padrão universal de intermitência, particularmente acima de superfícies complexas. Constitui uma próxima tarefa de pesquisa investigar a relação existente entre a classe de estrutura coerente e o padrão de intermitência encontrado.

Outro resultado interessante a mencionar é a diferença verificada no valor do coeficiente de achatamento nas escalas (Tabela 1) tanto para o sinal original (não filtrado) como para o sinal filtrado. Todavia, estes resultados têm um caráter preliminar, pois resultam da análise de dados de u para um período de 1 hora. Estudos devem ser desenvolvidos no sentido de verificar se estes resultados estão relacionados com a turbulência propriamente dita ou se se referem a problemas instrumentais. Outro problema a pesquisar é o da eventual influência da ondeleta utilizada nos resultados. Ademais, mais dados experimentais, referentes a diferentes condições de estabilidade e a outras variáveis micrometeorológicas também deverão ser investigados, a fim de que se possa determinar o caráter geral dos mesmos.

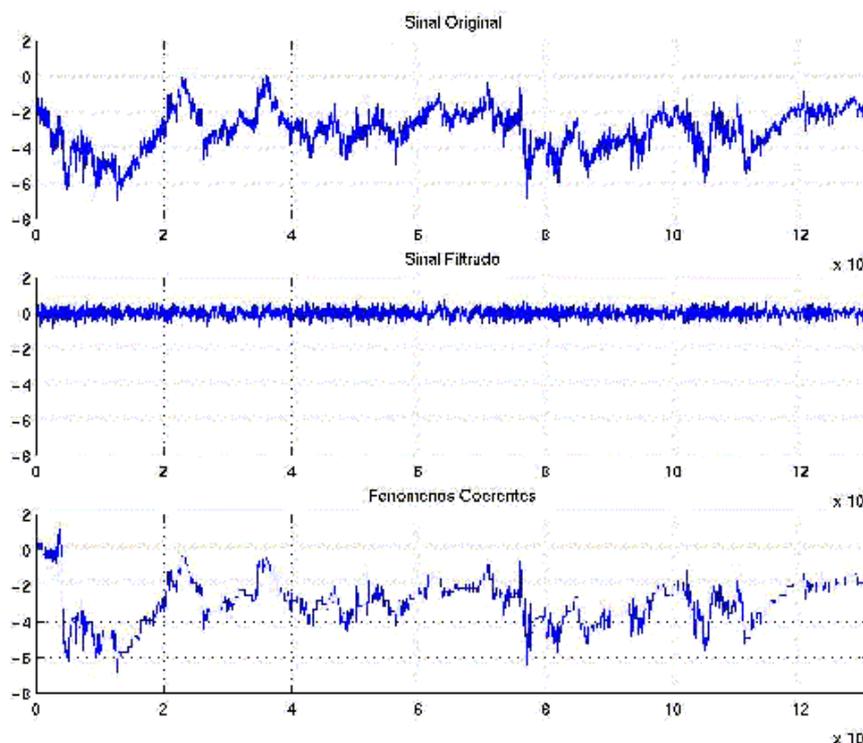


Figura 1: Decomposição de sinal da componente horizontal da velocidade do vento, u , medido durante o período diurno: (i) sinal original (acima); (ii) sinal filtrado; (iii) sinal representando a parte intermitente (abaixo).

Componente u		$\Delta t = 0.2 \text{ s}$	$\Delta t = 2 \text{ s}$	$\Delta t = 20 \text{ s}$	$\Delta t = 200 \text{ s}$
Original	Coef. Achatam.	8.1732	5.4531	4.9527	3.2200
Filtrado	Coef. Achatam.	4.3848	3.0464	3.1097	2.9884

Tabela 1: Valores do coeficiente de achatamento obtidos com o mesmo sinal de u apresentado na fig. 1, calculados para diferentes incrementos temporais Δt .

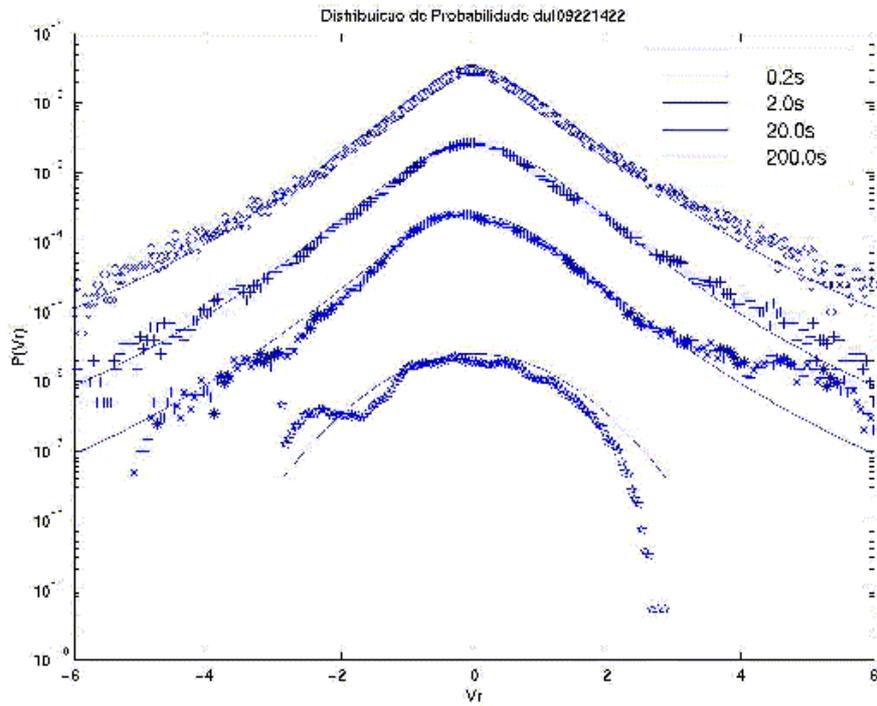


Figura 1: Função de densidade de probabilidade para cada incremento para a componente u, com dados medidos à partir das 14:22 horas. Dados experimentais (símbolos) e curvas teóricas (linhas).

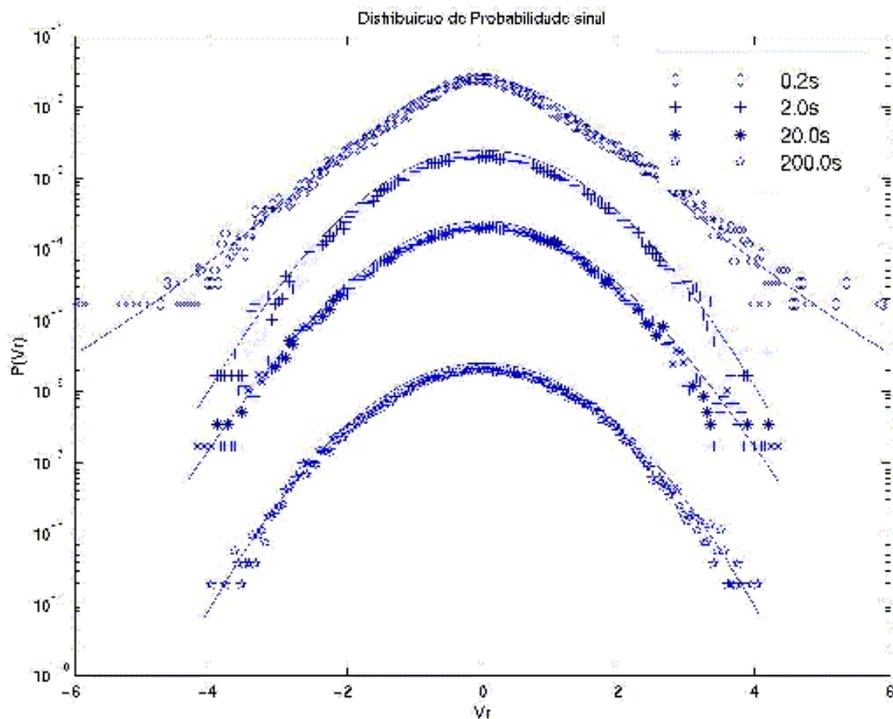


Figura 2: Sinal filtrado: Função de distribuição de probabilidade de diferenças de velocidade, para diversos incrementos r . Os dados experimentais são representados por símbolos e as curvas teóricas por linhas.

CONCLUSÕES

Foram calculadas as funções de densidade de probabilidade para a componente u da velocidade do vento, nas escalas temporais $\Delta t = 0.2, 2, 20, 200$ s, tanto para o sinal original (não filtrado) como para o sinal filtrado.

Para o sinal filtrado, os resultados das funções de densidade de probabilidade mostraram uma boa concordância com o modelo TEG.

Uma característica notada em ambos os sinais é a diferença nos valores dos coeficientes de achatamento para todas as escalas, indicando que houve uma boa separação de estruturas coerentes do sinal original. Isto indica que o método de separação de estruturas coerentes do sinal turbulento baseado na transformada em ondeleta de Haar funciona muito bem, de modo que os valores dos coeficientes de achatamento em cada escala do sinal de fundo se aproximam dos valores previstos em K-41.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Processos 98/00105-5 e 98/11246-9) e a CAPES (bolsa do aluno Maurício J. A. Bolzan) pelos auxílios. Também são gratos à Universidade Federal do Mato Grosso do Sul e a todos os participantes da Campanha IPE-2.

REFERÊNCIAS

Baerentsen, J. H. e Berkowicz, R. Monte Carlo Simulation of Plume Dispersion in the Convective Boundary Layer, **Atmospheric Environment**, 18, 4: 701-712, 1984.

Benzi, R.; Biferale, L.; Ruiz-Chavarria, G.; Ciliberto, S.; Toschi, F. Multiscale velocity correlation in turbulence: Experiments, numerical simulations, synthetic signals. **Physica of Fluids**, v. 11, n. 8, p. 2215-2224, Aug. 1999.

Bolzan, M. J. A. **Estudo da Influência das Estruturas Coerentes e da Rugosidade na Estimativa de Fluxos Turbulentos sobre o Pantanal**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia - INPE, 1998.

Camussi, R.; Guj, G. Orthonormal wavelet decomposition of turbulent flows: Intermittency and coherent structures. **Journal of Fluid Mech.**, v. 348, p. 177-199, 1997.

Daubechies, I. **Ten Lectures on Wavelets**. Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia, Pennsylvania, p. 357, 1992.

Frisch, U. **Turbulence**, Cambridge-University-Press, 296 pp., Cambridge, 1995.

Gledzer, E. On the Taylor hypothesis corrections for measured energy spectra of turbulence, **Physica D**, 104, 163-183, 1997.

Hagelberg, C. R.; Gamage, N. K. K. **Applications of structure preserving wavelet decompositions to intermittent turbulence: A case study**, In: Wavelets in Geophysics. E. Foufoula-Georgiou and P. Kumar Ed., San Diego: Academic Press, 1994, p. 45-80.

Kaimal, J. C.; Wyngaard, J. C.; Izumi, Y. e Coté, O. R. Spectral Characteristics of surface layer turbulence, **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 98, 417: 563-589, July, 1972.

Katul, G. G.; Parlange, M. B. e Chu, C. R. Intermittency, local isotropy, and non-Gaussian statistics in atmospheric surface layer turbulence, **Physics of Fluids**, 6, 7: 2480-2492, July, 1994.

- Kolmogorov, A. N. A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at high Reynolds number, **Journal of Fluid Mechanics**, 13, 82-85, 1962.
- Kraichnan, R. H. On Kolmogorov's inertial-range theories, **Journal of Fluid Mechanics**, 62 (part. 2), 305-330, 1974.
- Lumley, J. L. Some Comments on Turbulence, **Physics of Fluids**, A4, 2: 203-211, February, 1992.
- Monin, A. S.; Yaglom, A. M. **Statistical fluid mechanics**. Cambridge, MIT Press, v. 1, p. 769, 1971.
- Nelkin, M. In what sense is turbulence an unsolved problem? **Science**, v. 255, p. 566-569, 1992.
- Ramos, F. M.; Neto, C. R.; Rosa, R. R. Generalized Thermostatistical description of intermittency and non-extensivity in turbulence and financial markets. submetido à **Physical Letters A**, 1999.
- Sá, L. D. A.; Bolzan, M. J. A.; Prasad, G. S. S. D. Percentagem do fluxo turbulento associado à ocorrência de estruturas coerentes e sua variação em função da instabilidade atmosférica acima do Pantanal (Estação seca). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. n. 1, p. 87-96, 1999.
- Sreenivasan, K. R.; Antonia, R. A. The phenomenology of small-scale turbulence. **Annu. Rev. Fluid Mech.**, v. 29, p. 435-472, 1997.
- Tennekes, H.; Lumley, J. L. **A first course in turbulence**. MIT Press, Massachusetts, p. 300, 1972.
- Tsallis, C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics. **Journal of Statistical Physics**, 52, 1-2, 1988.
- Vergassola, M.; Benzi, R.; Biferale, L.; Pisarenko, D. Wavelet analysis of a Gaussian Kolmogorov signal. **J. Phys. A: Math. Gen.**, v. 26, p. 6093-6099, 1993.