



Análise do espectro temporal de ondas de gravidade por meio de keogramas

Vargas, F. A.; Kattab, C. T. B.; Gobbi, D.; Takahashi, H.; Brum, C. G. M. (INPE – BRAZIL – fabio@laser.inpe.br)

Copyright 2005, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility 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

O objetivo deste trabalho é o estudo do espectro observável da frequência temporal de ondas de gravidade utilizando para tal os keogramas gerados a partir de imagens da emissão do OH da aeroluminescência. As imagens utilizadas foram obtidas em Cachoeira Paulista entre Junho de 2004 e março de 2005 por meio de um imageador CCD *all-sky* adquirido recentemente pelo grupo LUME do INPE. Através da análise dos keogramas, foi possível verificar que o espectro das ondas de gravidade comporta-se segundo uma lei de potência, apresentando um valor absoluto do índice espectral de 1,72 com desvio padrão de 0,04 para o conjunto de dados como um todo. Este valor concorda muito bem com dados experimentais de outras localidades, que mostram que o espectro de frequência, em geral, apresenta índice espectral entre 1,66–2, calculado por medidas de diferentes instrumentos. Este estudo apresenta uma nova técnica de determinação do espectro em frequência temporal utilizando imagens da aeroluminescência.

Introdução

O espectro de ondas de gravidade, em relação a perturbações no vento, na densidade e na temperatura é observado através de diferentes instrumentos e técnicas ao longo dos últimos 20 anos (Gardner e Taylor, 1998). Este espectro é devido a flutuações randômicas nos campos atmosféricos, onde uma combinação de pacotes de ondas estão presentes, sendo compostos por ondas monocromáticas de diversas escalas e frequências, geradas por diversas fontes.

O espectro de potência das ondas de gravidade comporta-se segundo uma lei de potência $F(\omega) \sim \omega^p$, que é explicado como resultado de processos de saturação de ondas ao longo da sua trajetória de propagação. A descrição teórica do espectro observado é feita com base na teoria da filtragem de modos característicos (Gardner *et al.*, 1996 ; Staquet e Sommeria, 2002).

Muitos dos esforços teóricos tentam explicar a forma universal do espectro do número de onda vertical no regime de saturação. No entanto, desenvolvimentos teóricos em relação ao espectro de frequência ainda não foi realizados de maneira satisfatória (Gardner *et al.* 1993).

A forma aparentemente universal do espectro de ondas atmosféricas também é evidente para ondas internas em

qualquer fluido. No estudo dos processos de instabilidades e turbulência realizado por Staquet e Sommeria (2002), é apresentado diversos resultados mostrando a distribuição de energia das ondas em fluidos atmosféricos, oceânicos e laboratoriais. Estas curvas mostram claramente um comportamento universal. Simulações numéricas do espectro também confirmam esta tendência, para flutuações em diversos campos (Alexander, 1996; Carnevale, 2001). O comportamento universal característico foi observado com dados de diversos equipamentos, tanto em número de onda como em frequência (Gardner *et al.*, 1993; Gardner, 1996).

VanZandt (1982) apresentou um trabalho pioneiro na tentativa de explicar a forma do espectro atmosférico. Ele baseou-se no trabalho de Garrett e Munk (1979), que selecionaram várias medidas do espectro de ondas internas oceânicas em um modelo relativamente simples. A contribuição de VanZandt (1982) foi adaptar o modelo espectral de Garrett e Munk (1979) para ondas na atmosfera, dentro do intervalo de frequência $f < \omega < N$, onde f é a frequência inercial e a N frequência de Brunt-Vaisala, respectivamente.

VanZandt (1982) mostrou que o espectro de potência da flutuação do vento médio horizontal (tanto em número de onda vertical, horizontal e frequência) podia ser descrito em termos de um espectro universal de ondas de gravidade. A Figura 1(a) mostra um resultado observado por VanZandt (1982), onde a curva espectral mostra claramente um comportamento universal no espectro do número de onda horizontal da flutuação do vento horizontal.

Analogamente, Balsley e Carter (1982) mostraram que o espectro de frequência do vento horizontal, medido pelo radar MST (Mesosphere, Stratosphere and Troposphere) Poker Flat, no Alaska, era ajustado de forma consistente segundo a lei de potência $F_u(\omega) \sim \omega^p$, com $p=1,66$ determinado na ocasião para os ventos da troposfera e da mesosfera (Figura 1(b)). Os dados observacionais mostraram também que o espectro é independente da altura, das condições meteorológicas e da época do ano (espectro canônico).

Desde então, diversos modelos foram desenvolvidos, invocando uma série de mecanismos físicos para descrever o espectro observado. Em geral, pode-se observar que processos não lineares estão envolvidos na saturação da amplitude das ondas de gravidade. Estes mecanismos ocasionam a quebra de ondas, seguido de dissipação do excesso de energia da onda, limitando desta forma o crescimento da sua amplitude a um valor limite.

Os mecanismos de saturação de ondas que podem estar envolvidos neste processo podem ser: - instabilidades convectivas e de cisalhamento; cascadeamento turbulento; difusão por ondas; interação não linear com o campo de ondas e espalhamento Doppler do espectro

por ventos induzidos por ondas. Todos estes processos levam a uma forma geral do espectro para o número de onda vertical $F_{\xi(m)}$ para flutuações no parâmetro ξ , que pode ser o campo de vento, a densidade, a temperatura ou a pressão atmosférica

Com base no espectro canônico do número de onda vertical, alguns modelos foram propostos levando em conta diferentes mecanismos de saturação das ondas observadas e dissipação de energia do espectro (Dewan e Good, 1986; Gardner, 1994). Todos os modelos assumem que o espectro de frequência temporal é proporcional a ω^{-p} , onde $p=1,66$ ou 2 , associados a medidas experimentais (geralmente feitas por radares).

Em geral, imagens individuais da aeroluminescência podem revelar aspectos de ondas de gravidade, como os parâmetros de uma onda monocromática (comprimentos de onda horizontal), a direção de propagação. A análise de um grupo de imagens subsequentes para um dado evento de onda de gravidade pode revelar o período ou a velocidade de fase da onda. No entanto, a análise espectral de keogramas pode revelar o comportamento espectral com relação à frequência de ondas de gravidade, que representa um parâmetro de entrada crucial em diversos modelos de espectro de ondas de gravidade. Este trabalho foi desenvolvido com base neste objetivo.

Método

Definição de Keogramas:

A palavra keograma vem de *keoitt*, uma antiga palavra da língua esquimó e significa aurora boreal. Os keogramas foram primeiramente empregados extensivamente para estudar o fenômeno da aurora em altas latitudes. Nos dias atuais muitas outras áreas utilizam essa ferramenta, inclusive a da aeroluminescência.

Os keogramas são gerados ao extrair-se colunas (eixo sul-norte) ou linhas (eixo oeste-leste) de imagens das emissões da aeroluminescência obtidas ao longo de uma noite de observação por imageadores. As linhas verticais ou horizontais extraídas contêm o zênite da imagem e são organizadas lado a lado numa matriz. A posição relativa de cada linha ou coluna nesta matriz, em relação ao eixo horizontal, está relacionado com o horário em que a imagem foi gravada. O eixo vertical do keograma está relacionado à latitude ou a longitude. O zênite corresponde ao centro do keograma em relação ao eixo vertical tanto no keograma sul-norte como no oeste-leste. A técnica de construção de um keograma está esquematizada na Figura 2.

Cada keograma equivale a uma noite inteira de observação e mostra a variação temporal da luminosidade noturna devido a uma dada linha de emissão da aeroluminescência em função da latitude (ou longitude). Além disto, os keogramas fornecem outras informações, tais como: - do tempo de observação de uma dada noite; do horário inicial e final de observação; da presença de intervalos sem dados ao longo da noite (os chamados *gaps*); da presença de ruído luminoso devido ao aparecimento de nuvens esporádicas ou de outras fontes externas de luz que não a

aeroluminescência; da presença de ondas de gravidade de longo período e da assinatura característica de bolhas de plasma nas imagens da emissão da linha vermelha do oxigênio atômico, do qual se pode calcular a velocidade média.

O Conteúdo Espectral de Keogramas:

Basicamente, o objeto de estudo deste trabalho é a análise do conteúdo espectral (espectro de potência) de ondas de gravidade de período entre ~5 minutos a ~6 horas, presentes em keogramas. Para compor estes keogramas, selecionamos imagens referentes à emissão do OH adquiridas desde junho de 2004 a março de 2005 em Cachoeira Paulista pelo novo imageador do LUME.

Depois de gerar os keogramas para cada noite, tomou-se a média das linhas em torno do zênite do keograma sul-norte, da qual removemos o ruído de baixa frequência por suavização e anulamos a tendência de crescimento através da subtração de uma reta referente ao ajuste linear da série. A curva resultante foi submetida a análise FFT, da qual obtivemos o espectro de potência da série temporal. Para melhorar a confiabilidade da análise, removemos do espectro as frequências não realísticas por meio de filtragem. O maior período considerado na análise foi de $N_{img} \cdot \Delta t$, onde N_{img} representa o número de imagens da noite e Δt a taxa de amostragem entre cada imagem. Logo, as ondas que não completaram um ciclo durante o tempo de observação foram removidas da análise espectral. O período de Nyquist de nossos dados foi ~ 4 minutos, visto que a taxa de amostragem Δt foi ~2 minutos, em média.

O espectro de potência resultante foi submetido a um ajuste linear com base da equação de lei de potência $F(\omega) \sim \omega^{-p}$, da qual calculamos o coeficiente p , chamado de chamado de índice espectral.

Resultados

Fizemos a análise do índice espectral para cada keograma e também calculamos o índice espectral para o conteúdo total de dados, os quais mostraram boa concordância com resultados de outras localidades de observação.

Um dos resultados de nossa análise é apresentado na Figura 3. Neste gráfico observa-se a distribuição de pontos referentes à variação temporal do índice espectral calculado para cada keograma. O valor médio encontrado para o conjunto é de $1,71 \pm 0,44$. O valor máximo e mínimo desta série é de $2,61$ e $0,55$, respectivamente. O erro médio de cada ponto é de $0,14$.

Não se observa nenhuma sazonalidade nos dados, mesmo porque o período de tempo analisado é de menos de um ano. Esta afirmação concorda com outros estudos, que verificaram que o espectro de frequência das ondas de gravidade é independente da época do ano em que é observado.

A Figura 4 mostra uma análise feita de maneira global para a distribuição da potência espectral por frequência temporal. Tomou-se o espectro de todos os keogramas considerados, os quais foram plotados no mesmo gráfico

e a seguir calculou-se um ajuste linear pelo método dos mínimos quadrados para todo o conjunto, com o objetivo de encontrar o coeficiente angular da reta que representa o índice espectral da série.

O valor absoluto do índice espectral calculado foi de 1,72 com desvio padrão de 0,04. Este valor está dentro do intervalo geralmente observado, que compreende valores entre 1,66 a 2. Deve-se ressaltar que um bom resultado para a distribuição de energia em função da frequência das ondas de gravidade foi encontrado por um método relativamente novo. O valor encontrado para o índice espectral confirma o caráter turbulento do espectro, que é uma característica apresentada por fluidos em diversos meios, o qual é confirmado por simulações numéricas e por experimentos em laboratório. No entanto, novas medidas devem ser incorporadas esses resultados para que esta tendência seja confirmada efetivamente.

Conclusão

Ao longo deste trabalho, investigamos o espectro das ondas de gravidade utilizando keogramas confeccionados com imagens da emissão do OH da aeroluminescência. Analisou-se o espectro de potência e mostrou-se que ele segue uma lei de potência com índice espectral de $1,72 \pm 0,04$, que é um valor muito bem relacionado com valores medidos em outros locais de observação ao redor do mundo e por outras técnicas. No entanto, este valor deve variar um pouco quando incorporarmos aos atuais resultados aqueles provenientes de keogramas do restante de nossa base de dados, que compreende ~ 4 anos (Cachoeira Paulista). Os resultados apresentados são a primeira tentativa de implementar este método de medida do espectro de ondas de gravidade, o qual se mostrou como uma ferramenta útil neste tipo de análise em comparação com outras técnicas de observação do espectro de potência de ondas de gravidade.

Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico - CNPq, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (processo nº 04/07695-5), que forneceram suporte financeiro e logístico a esta iniciativa de pesquisa.

Referências

- Gardner, C. S.; Taylor, M. J. Observational limits for lidar, radar, and airglow imager measurements of gravity wave parameters. **J. Geophys. Res.**, v.103, n.D6, p. 6427-6437, 1998.
- Gardner, C. S.; Coble, M. R.; Papen, G. C.; Swenson, G. R. Observations of unambiguous 2-dimensional horizontal wave number spectrum of OH intensity perturbations. **Geophys. Res. Lett.**, v.23, n.25, p. 3739-3742, 1996.
- Staquet, C.; Sommeria, J. Internal gravity waves: From instabilities to turbulence. **Annu. Rev. Fluid. Mech.**, v.34, p. 559-593, 2002.
- Gardner, C. S.; Hostetler, C. A.; Franke, S. J. Gravity wave models for the horizontal wave number spectra of atmospheric velocity and density fluctuations. **J. Geophys. Res.**, v.98, n.D1, p. 1035-1049, 1993.
- Alexander, M. J. A simulated spectrum of convectively generated gravity waves: Propagation from the tropopause to the mesopause and effects on the middle atmosphere. **J. Geophys. Res.-Atmos.**, v.101, n.D1, p. 1571-1588, 1996.
- Carnevale, G. F.; Briscolini, M.; Orlandi, P. Buoyancy- to inertial-range transition in forced stratified turbulence. **J. Fluid. Mech.**, v.427, p. 205-239, JAN 25 2001.
- VanZandt, T. E. A universal spectrum of buoyancy waves in the atmosphere. **Geophys. Res. Lett.**, v.9, n.5, p. 575-578, 1982.
- Garrett, C.; Munk, W. Internal Waves in the Ocean. **Annu. Rev. Fluid. Mech.**, v.11, p. 339-369, 1979.
- Balsley, B. B.; Carter, D. A. The spectrum of atmospheric velocity fluctuations at 8 km and 89 km. **Geophys. Res. Lett.**, v.9, n.4, p. 465-468, 1982.
- Dewan, E. M.; Good, R. E. Saturation and the "universal" spectrum for vertical profiles of horizontal scalar winds in the atmosphere. **J. Geophys. Res.**, v.91, n.D2, p. 2742-2748, 1986.
- Gardner, C. S. Diffusive filtering theory of gravity wave spectra in the atmosphere. **J. Geophys. Res.**, v.99, n.D10, p. 20601-20622, 1994.

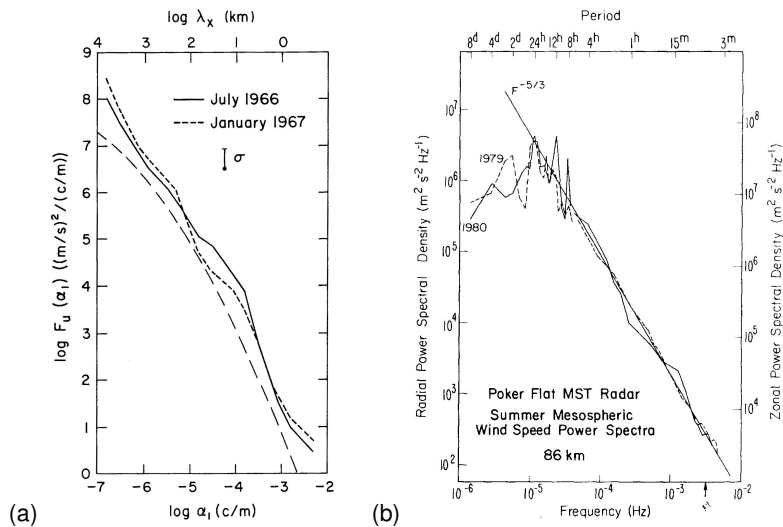


Figura 1 – (a) Espectro de potência $F_u(\alpha_1)$ do vento horizontal *versus* número de onda horizontal. O modelo de espectro é mostrado pela curva tracejada (VanZandt, 1982). (b) Espectro de potência para flutuações no vento zonal numa altura de 86 km obtida pelo radar MST Poker Flat, no Alaska. A linha reta representa um modelo que segue uma lei de potência com inclinação $-5/3$. Pode-se notar picos espectrais referentes a marés nos períodos de 8, 12 e 24 horas.

FONTE: (a) VanZandt (1982, p. 575); (b) Balsley e Carter (1982, p.466)

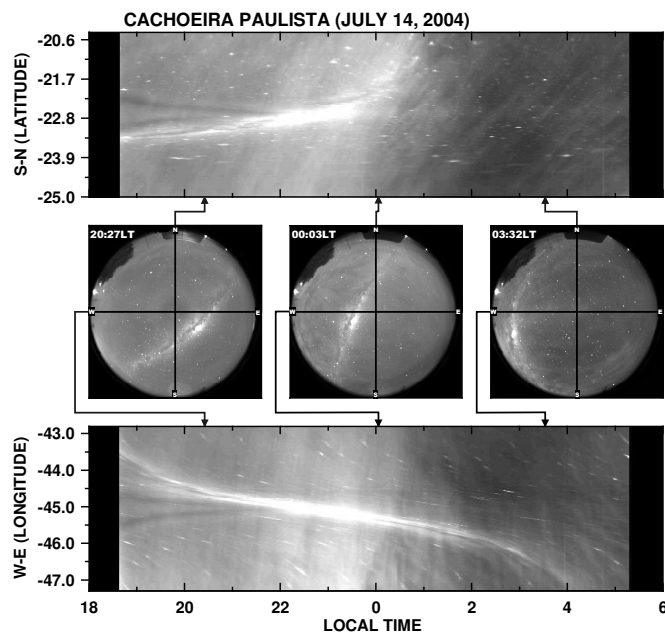


Figura 2 – Esquema de confecção de um keograma. São mostradas 3 imagens de aeroluminescência no centro da figura gravadas em 14 de julho de 2004, adquiridas em instantes diferentes ao longo da noite de observação. O keograma sul-norte (acima) é composto pela coluna vertical de cada imagem, enquanto a linha horizontal é usada para compor o keograma oeste-leste (abaixo). Pode-se notar que o ponto zenital (centro de cada imagem) pertence a ambos os keogramas.

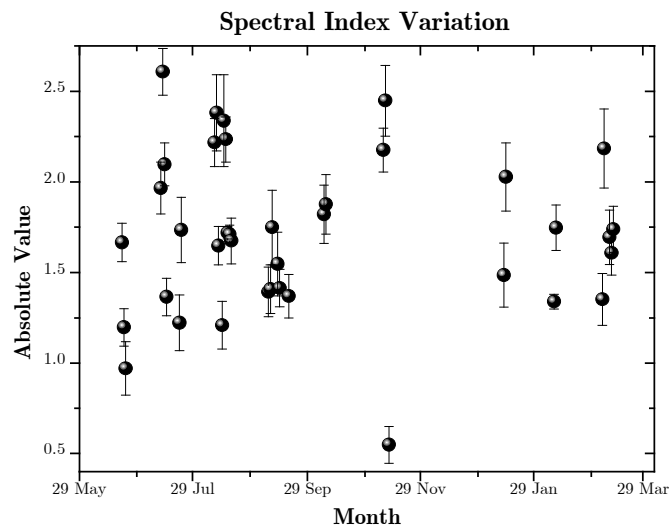


Figura 3 – Variação do índice espectral calculado para os keogramas gerados com as imagens de aeroluminescência (Cachoeira Paulista; junho/2004 a março/2005). O valor absoluto máximo é de 2.61 e o mínimo é de 0.55, com um erro médio em cada ponto de 0.14. O valor médio foi de 1.71 ± 0.44 .

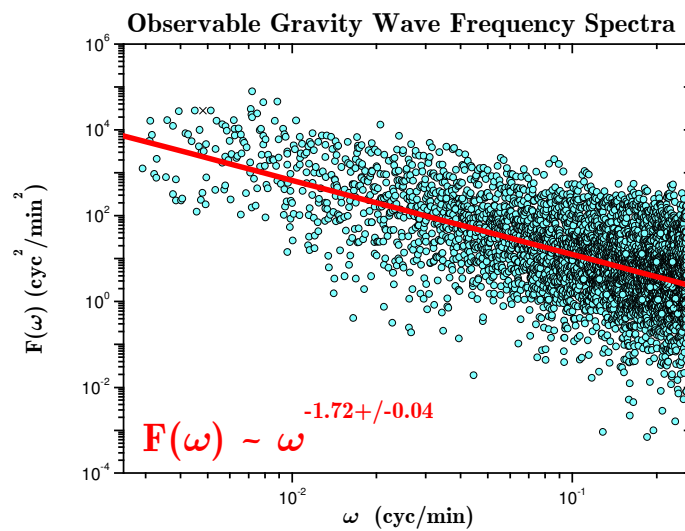


Figura 4 – Gráfico do espectro de potência para todos os keogramas gerados. O valor absoluto do índice espectral para este conjunto de dados foi de 1.72 ± 0.04 . O período máximo considerado foi de 5.7 horas e o período mínimo foi em torno de 4 minutos.