

Cálculo de parâmetros de ondas de gravidade de grande escala através de imagens de aeroluminescência

I. Paulino¹, H. Takahashi¹, C. M. Wrasse², D. Gobbi¹, A. F. Medeiros³ and R. A. Buriti³.

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, SP/Brasil.

²Universidade do Vale do Paraíba, SP/Brasil.

³Universidade Federal de Campina Grande, PB/Brasil.

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, held in Salvador, Brazil, November 24-28 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th 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

In this paper we present a computational algorithm to calculate the large scale mesospheric gravity waves parameters. This method consist in to extract north-sul and east-oest slices in original airglow images and to build new images in temporal sequences of the slices. In the new images is done Fourier analysis, in regions of interest, to calculate the period. With the periodo is calculated the phase velocity in each component by the displacement of the oscillatory structure in differents parts of the images. The last step is to determine the wavelength with each velocity component and to calculate the propagation direction for the wave.

Introdução

Já é bem conhecido que ondas de gravidade transportam energia e momentum da atmosfera inferior para região da mesosfera e baixa termosfera (MBT). Esses efeitos são capazes de modificar a estrutura termodinâmica, fotoquímica e a circulação geral dessa região (mais detalhes sobre os efeitos de ondas de ondas de gravidade na região da MBT pode ser encontrado Fritts e Alexander, 2003).

Para estudar um onda é preciso conhecer seus parâmetros físicos (e.g. período, velocidade e direção de propagação, comprimento de onda, etc.). Uma técnica muito utilizada para obter os parâmetros de uma onda de gravidade é o imageamento da aeroluminescência, com o qual é possível determinar o comprimento de onda horizontal, o período, a velocidade de fase e a direção de propagação [e.g. Garcia et al., 1997; Taylor, 1997; Wrasse et al., 2006; Medeiros et al., 2007 e outros].

Nos trabalhos mencionados acima usa-se o método de análise de Fourier bidimensional para determinar os parâmetros das ondas. Essa técnica é bastante eficiente para períodos inferiores a uma hora e comprimentos de ondas da ordem de algumas dezenas de quilômetros. Porém, não é tão eficiente para obter comprimentos de ondas superiores a 100 quilômetros.

Nesse trabalho é apresentado um método alternativo para calcular parâmetros de ondas de gravidade com comprimentos de onda maiores que os comprimentos de ondas usuais que são calculados pela técnica de imageamento da aeroluminescência. Esse método consiste em fazer cortes zenitais nas direções norte-sul e leste-oeste nas imagens e dispô-los em seqüência temporal em duas novas imagens. Nas secções posteriores será apresentado de forma mais detalhada esse método.

Instrumentação

Desde setembro de 2000 são feitas observações da aeroluminescência usando um imageador "all sky" em São João do Cariri (7,4°S;36,5°W). O imageador consiste basicamente de uma sistema óptico, uma câmera CCD e um microcomputador (responsável pelo controle do sistema, processamento e armazenamento de dados). Com esse instrumento é registrado imagens noturnas das emissões de OH (infravermelho próximo), 01557,7 nm, 01630 nm e O₂. A seleção dessas emissões é feita por uma roda de filtros projetados para cada emissão.

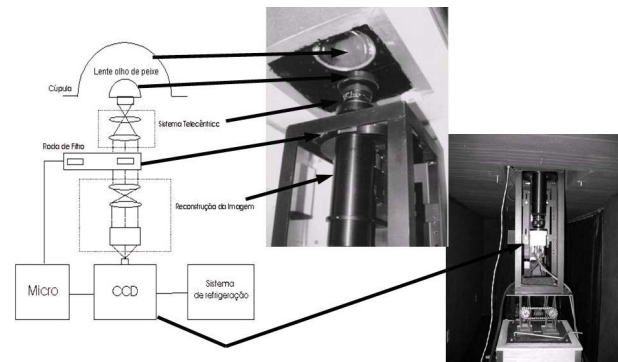


Figure 1: Na esquerda, esquema do imageador all sky e na direita, fotografias do Imageador de São João do Cariri. Adaptado: Medeiros (2001)

A câmera CCD (do inglês "Charge-Coupled Devices") possui uma área de 6,45 cm² e uma resolução de 1024 × 1024 pixels com tamanhos de 14 bits. Tem uma alta eficiência quântica (80% para luz visível), baixa corrente escura (0,5 elétrons/pixel/s), baixo ruído de leitura (15 elétrons rms) e alta linearidade (0,05%) que permite determinar quantitativamente as emissões de aeroluminescência. O sistema óptico opera com uma lente olho de peixe (f/4) e um sistema telescópico projetado para aumentar a razão sinal-ruído. O tempo de aquisição

de imagens da emissão de OH é aproximadamente 15 segundo, enquanto que para outras emissões ($OI557,7\text{ nm}$, $OI630\text{ nm}$ e O_2) o tempo de aquisição é de cerca de 90 segundos. A imagem final é ajustada para uma resolução de 512×512 pixels para aumentar a relação sinal-ruído [mais informações sobre o imageador em Medeiros et al., 2007 e Medeiros (2001)].

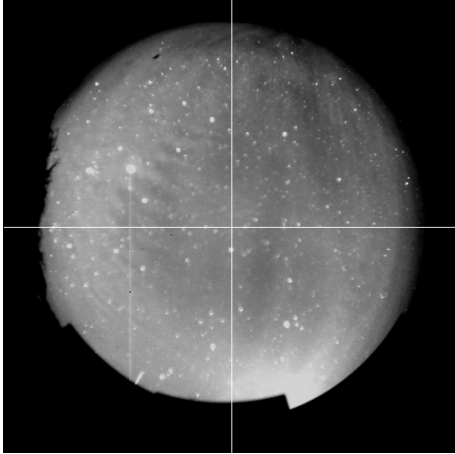


Figure 2: Exemplo de uma imagem da emissão de OH mesosférico registrado em São João do Cariri no dia 03/10/2005.

Na Figura 1 é mostrado um esquema (lado direito) e fotografias do imageador de São João do Cariri (lado esquerdo). É possível ver a estrutura física do equipamento e a localização da lente olho de peixe, do sistema óptico, da roda de filtros e da CCD.

Em imagens individuais de aeroluminescência é possível observar diversos tipos de estruturas de ondas de gravidade bem como determinar alguns de seus parâmetros. Os eventos mais estudados são as bandas (e.g. Clairemidi et al., 1985), os ripples (e.g. Peterson, 1979; Medeiros et. al., 2007), as pororocas (e.g. Taylor et al., 1995; Smith et al., 2003; Fehine et al., 2005) e outras. Na Figura 2 é possível ver estruturas de ripples no centro da imagem (um pouco para o lado esquerdo) e bandas mais para o lado direito. As bandas possuem dimensões maiores e, em geral, comprimentos de ondas bem maiores que os ripples.

Método de Cálculo dos Parâmetros

Para calcular os parâmetros de ondas de gravidade de grande escala é preciso fazer a construção de novas imagens que consistem numa disposição sequencial no tempo de cortes feitos nas imagens originais. É muito usual que esses cortes sejam feitos de forma a cruzar o zênite da imagem, um corte na direção norte-sul e outro na direção leste-oeste em cada imagem. As linhas brancas na Figura 2 indicam o local dos cortes.

Na Figura 3 são mostrados os cortes sequenciais na direção norte-sul (na parte superior) e na direção leste-oeste (no painel inferior). No eixo horizontal tem-se a hora universal (HU) e no eixo vertical a distância com relação ao zênite das imagens. Nessa figura é possível ver estruturas de ondas de várias dimensões, por exemplo, entre aproximadamente às 03:00 e 05:00 HU. Por outro

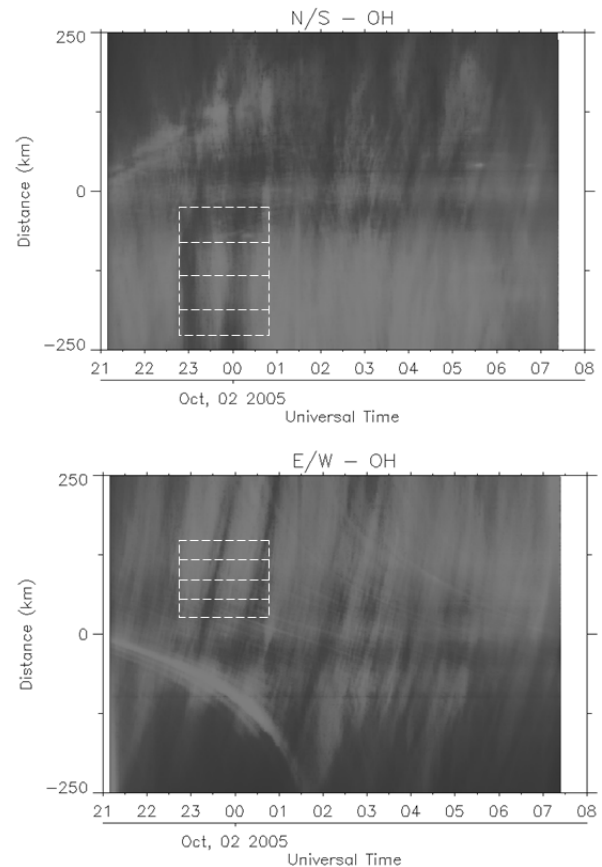


Figure 3: Cortes norte-sul (painel superior) e leste-oeste (painel inferior) de imagens de OH obtidas em São João do Cariri no dia 01/10/2005.

lado, entre às 23:00 e 01:00 HU tem-se uma estrutura oscilatória de grandes dimensões que pode ser vista em ambos os cortes. As caixas brancas pontilhadas delimitam a região que será estudada, para cada linha horizontal é plotado um gráfico que são mostrados na Figura 4. Devido as dimensões dessa estrutura é bastante difícil determinar seus parâmetros pelo método tradicional de transformadas de Fourier bidimensional. Será usado essa estrutura para exemplificar a descrição do método proposto nesse trabalho.

O primeiro passo consiste em fazer análise de Fourier para estabelecer um período aproximado para a oscilação. A periodicidade deve ser a mesma para as duas componentes (norte-sul e leste-oeste). Para isso, é escolhido áreas (subimagens) na duas componentes que envolva de forma conveniente a estrutura. As sub-imagens foram extraídas em tempos bem próximos para ter certeza de que se trata do mesmo evento.

Na Figura 4 é mostrado as variações das intensidades das linhas das subimagens e um cosseno sobreposto em cada gráfico (linha contínua mais clara). Esse foi o melhor ajuste encontrado para essa estrutura considerando as duas componentes. O período da onda é aproximado pelo período do cosseno sobreposto nos gráficos. Cada curva cosseno possui a seguinte estrutura matemática:

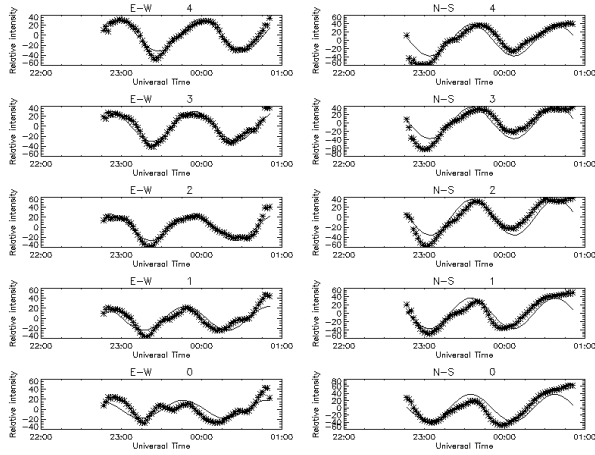


Figure 4: No lado esquerdo são mostrados quatro gráficos de linhas igualmente espaçadas da subimagem da direção leste-oeste. Nesses gráficos tem-se a variação da intensidade com relação ao tempo e o ajuste de um cosseno (linha contínua). No lado direito, são mostrados os mesmos gráficos para a subimagem da componente norte-sul.

$$y(t) = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right), \quad (1)$$

em que T é o período, φ é a fase e A é a amplitude da oscilação.

Com os valores das fases φ é possível calcular a componente da velocidade de fase em cada direção. Para isso foi construído os gráficos da Figura 5 em que é mostrado a variação da fase com respeito as distâncias entre as linhas horizontais escolhidas ao longo da caixa branca da Figura 3. No lado esquerdo é mostrado o comportamento para a componente leste-oeste e no lado direito para componente norte-sul. A linha contínua nos gráficos constitui o ajuste de mínimos quadrados para esses valores de fases e distâncias.

As velocidades de fases das componentes da estrutura estudadas é aproximada pelo ajuste de mínimos quadrados dos pontos referentes as fases e as distâncias para cada componente. Matematicamente pode-se escrever:

$$\begin{cases} d_{NS} = a_0 + a_1 \varphi_{NS} \\ d_{EW} = b_0 + b_1 \varphi_{EW} \end{cases} \quad (2)$$

nesse caso, d representa as distâncias, φ as fases, o índice NS refere-se a componente norte-sul e o índice EW a componente leste-oeste. O coeficiente $a_1 = v_{NS}$ será a velocidade para a componente norte-sul e $b_1 = v_{EW}$ a velocidade para a componente leste-oeste.

De posse do período da oscilação e das componentes da velocidade nas duas direções é possível determinar as componentes norte-sul e leste-oeste do comprimento de onda em questão pelas seguintes expressões

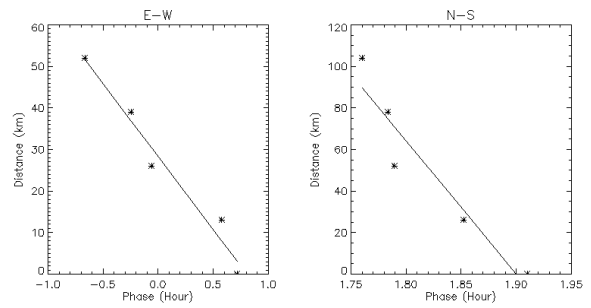


Figure 5: Perfis das fases para o conjunto de curvas mostrado na Figura 4. No lado esquerdo é mostrado o gráfico para a componente leste-oeste e no lado direito o gráfico é para a componente norte-sul. A linha contínua sobreplotada representa o ajuste de mínimos quadrados para esses dados.

$$\begin{cases} \lambda_{NS} = v_{NS}T \\ \lambda_{EW} = v_{EW}T \end{cases} \quad (3)$$

em que λ representa o comprimento de onda.

Na Figura 6 pode ser visto o esquema de uma oscilação sendo dividida nas duas componentes (norte-sul e leste-oeste). Observando a geometria da Figura 6 se pode deduzir a expressão matemática para o cálculo do comprimento de onda horizontal da oscilação, ou seja:

$$\lambda = \frac{\lambda_{NS}\lambda_{EW}}{\sqrt{\lambda_{NS}^2 + \lambda_{EW}^2}}. \quad (4)$$

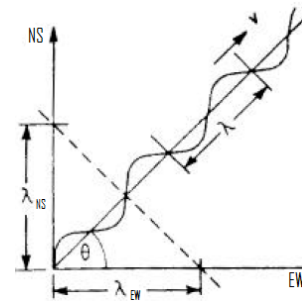


Figure 6: Esquema de uma estrutura de grande escala sendo dividida nas componentes norte-sul e leste-oeste. Adaptado: Hargreaves (1992).

Sendo assim, a direção de propagação que é usualmente definida como ângulo medido a partir do norte será dada por

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\lambda_{NS}}{\lambda_{EW}}\right). \quad (5)$$

Observe que, se o comprimento de onda na direção norte-sul tender a um comportamento assintótico, o comprimento de onda da oscilação tende ao valor da componente leste-oeste do comprimento de onda e a

direção de propagação tende para a direção leste-oeste. Por outro lado, se a componente leste-oeste do comprimento de onda for muito grande, a direção de propagação tende para norte-sul e o comprimento de onda resultante tende para o valor da componente norte-sul do comprimento de onda.

Por sua vez, a velocidade de fase horizontal da onda pode ser obtida pela divisão direta do comprimento de onda horizontal e o período calculado. Sendo assim, o período, o comprimento de onda horizontal, a velocidade de fase horizontal e a direção de propagação horizontal ficam completamente determinadas.

Esse método foi utilizado para estudar a relação entre o comprimento de onda de ondas de gravidade na mesosfera e a distância entre estruturas de bolhas de plasma na termosfera durante a campanha SpreadFEx e os resultados são mostrados no trabalho de Takahashi et al., (2009).

Conclusões

O método desenvolvido para cálculo de ondas de gravidade de grande escala permite que estruturas oscilatórias observadas na mesosfera, que apresentam dificuldades de determinação de seus parâmetros pelo método convencional de transformadas bidimensionais de Fourier, possam ser estudadas. Nesse método é possível determinar o período da oscilação a partir de análise de Fourier feita em duas imagens obtidas por cortes sequenciais do conjunto de imagens originais. Usando áreas específicas sobre as novas duas imagens é possível calcular a velocidade do deslocamento das estruturas. Essas componentes de velocidades são usadas para calcular componentes de comprimentos de ondas nas direções norte-sul e leste-oeste. Por fim, são obtidos, com essas componentes, o comprimento de onda horizontal real da oscilação e sua direção de propagação.

A próxima etapa da construção desse algoritmo é generalizar para que possa ser usado para determinar a distância entre bolhas de plasma na termosfera.

Referências

- Clairemidi, J., Herse M., and Moreels, G. 1985. Bi-dimensional observation of waves near the mesopause at auroral latitudes, *Planet. Space Sci.*, 33, 1013-1022.
- Fechine, J., A. F. Medeiros, R. A. Buriti, H. Takahashi e D. Gobbi. 2005. Mesospheric bore events in the equatorial middle atmosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.67, December 1, 2005, p.1774-1778.
- Fritts, D. C. e M. J. Alexander. 2003. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Reviews of Geophysics*, v.41, April 1, 2003, p.1003.
- Garcia, F. J., M. J. Taylor e M. C. Kelley. 1997. Two-dimensional spectral analysis of mesospheric airglow image data. *Applied Optics*, v.36, n.29, October, 10 1997, p.7374-7385.
- Hargreaves, J. K. *The solar-terrestrial environment*, Londres: Cambridge University Press, 1992.
- Medeiros, A. F. 2001. Observações de ondas de gravidade através do imageamento da aeroluminescência. (Tese de Doutorado em Geofísica Espacial). INPE, Instituto

Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001. 187 p.

Medeiros, A. F., H. Takahashi, R. A. Buriti, J. Fechine, C. M. Wrasse e D. Gobbi. 2007. MLT gravity wave climatology in the South America equatorial region observed by airglow imager. *Annales Geophysicae*, v.25, March 1, 2007, p.399-406.

Peterson, A. W. and Kieffaber, L. M. 1979. Infrared photography of OH airglow structures, *Nature*, 242, 321-322.

Smith, S.M., Taylor, M.J., Swenson, G.R., She, C., Hocking, W., Baumgardner, J., Mendillo, M., 2003. A multidagnostic investigation of the mesospheric bore phenomenon. *Journal of Geophysical Research* 108.

Takahashi, H. Taylor, M. J. Pautet, P.-D. Medeiros, A. F. Gobbi, D. Wrasse, C. M. Fechine, J. Abdu, M. A. Batista, I. S. Paula, E. Sobral, J.H.A. Arruda, D. Vadas, S. L. Sabbas, F. S. and Fritts, D. C. 2009. Simultaneous observation of ionospheric plasma bubbles and mesospheric gravity waves during the SpreadFEx Campaign. *Annales Geophysicae*. Article in press.

Taylor, M.J., Turnbull, D.N., Lowe, R.P. 1995. Spectrometric and imaging measurements of a spectacular gravity wave event observed during the ALOHA-93 campaign. *Geophysical Research Letters* 20, 2849-2852.

Taylor, M. J. 1997. A review of advances in imaging techniques for measuring short period gravity waves in the mesosphere and lower thermosphere. *Advances in Space Research*, v.19, May 1, 1997, p.667-676.

Wrasse, C. M., T. Nakamura, H. Takahashi, A. F. Medeiros, M. J. Taylor, D. Gobbi, C. M. Denardini, J. Fechine, R. A. Buriti, A. Salatun, Suratno, E. Achmad e A. G. Admiranto. 2006. Mesospheric gravity waves observed near equatorial and low-middle latitude stations: wave characteristics and reverse ray tracing results. *Annales Geophysicae*, v.24, December 1, 2006, p.3229-3240.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).