

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ONDAS DE GRAVIDADE ATRAVÉS DA ANÁLISE ESPECTRAL DE IMAGENS DE AEROLUMINESCÊNCIA

Cristiano Max Wrasse^{1,2}, Hisao Takahashi², Amauri Fragoso de Medeiros³, Lourivaldo Mota Lima⁴, Michael John Taylor⁵, Delano Gobbi⁶ e Joaquim Fachine⁷

Recebido em 15 dezembro, 2006 / Aceito em 25 junho, 2007
Received on December 15, 2006 / Accepted on June 25, 2007

ABSTRACT. The airglow layers are very useful to study and monitor the temperature and wave activity in the mesosphere region. All-sky cameras have been used to observe the nightglow emissions and to investigate the gravity waves characteristics and horizontal structures. The present paper describes the methodology used to estimate the gravity wave parameters such as the horizontal wavelength, phase speed, period and propagation direction, observed in the airglow images.

Keywords: airglow, mesosphere, gravity waves, spectral analysis, cross spectrum, unambiguous.

RESUMO. As camadas de emissão de aeroluminescência são muito importantes no estudo da mesosfera, pois elas são utilizadas para monitorar a temperatura e a atividade ondulatória nesta região. Imageadores *all-sky* vêm sendo utilizados para monitorar as camadas da aeroluminescência e investigar a estrutura horizontal das ondas de gravidade, bem como para observar as características destas ondas. O presente trabalho descreve a metodologia empregada para determinar os parâmetros característicos tais como, comprimento de onda horizontal, velocidade de fase, período e direção de propagação das ondas de gravidade observadas em imagens de aeroluminescência.

Palavras-chave: aeroluminescência, mesosfera, ondas de gravidade, análise espectral, espectro cruzado, não ambíguo.

¹Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (IP&D), Av. Shishima Hifumi, 2911, Urbanova – 12244-000 São José dos Campos, SP, Brasil. Tel.: +55 (12) 3947-1113; Fax: +55 (12) 3947-1149 – E-mail: cmw@univap.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Caixa Postal 515 – 12245-970 São José dos Campos, SP, Brasil. Tel.: +55 (12) 3945-7146; Fax: +55 (12) 3945-6740 – E-mail: hisaotak@laser.inpe.br

³Universidade Federal de Campina Grande (UFGC), Departamento de Física, CCT, Rua Aprígio Veloso, 882, Bodocongó – 58109-970 Campina Grande, PB, Brasil. Tel./Fax: +55 (83) 3310-1196 – E-mail: afragoso@df.ufcg.edu.br

⁴Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Departamento de Física, CCT, Rua Juvêncio Arruda, s/n, Bodocongó – 58109-970 Campina Grande, PB, Brasil. Tel.: +55 (83) 3315-3371; Fax: +55 (83) 3315-3352 – E-mail: lourivaldo_mota@yahoo.com.br

⁵Space Dynamics Laboratory, Science Division, Utah State University, Logan, UT 84322-4145, USA. Phone: 435 797-3919 / 797-3519; Fax: 435 797-4044 – E-mail: mtaylor@cc.usu.edu

⁶Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Caixa Postal 515 – 12245-970 São José dos Campos, SP, Brasil. Tel.: +55 (12) 3945-7146; Fax: +55 (12) 3945-6740 – E-mail: delanogobbi@laser.inpe.br

⁷Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Caixa Postal 515 – 12245-970 São José dos Campos, SP, Brasil. Tel.: +55 (12) 3945-7146; Fax: +55 (12) 3945-6740 – E-mail: joaquim@laser.inpe.br

INTRODUÇÃO

A mesosfera superior, localizada entre 80 e 100 km de altura, é uma região abundante em interações fotoquímicas e dinâmicas. Uma ampla variedade de estruturas importantes encontra-se nesta região, dentre as quais destacam-se as camadas de aeroluminescência e as camadas de metais meteóricos (Gardner, 1995). As camadas de emissão da aeroluminescência são muito importantes no estudo da mesosfera, pois elas têm sido utilizadas para monitorar tanto a temperatura como a atividade ondulatória nesta região.

A partir do trabalho pioneiro de Hines (1960), consideráveis progressos foram realizados nas últimas quatro décadas na compreensão da atividade das ondas de gravidade observadas na média e alta atmosfera (Fritts & Alexander, 2003). Estas ondas vêm recebendo crescente atenção devido ao seu importante papel no transporte de momentum e energia entre a baixa e a média atmosfera, alterando a estrutura térmica e a circulação geral nesta região.

Várias são as técnicas existentes para observar as ondas de gravidade na média e alta atmosfera, dentre as quais destacam-se as observações via radar de vento, radar de laser, medidas in-situ através de foguetes, a bordo de satélites e observações fotométricas contínuas das camadas da aeroluminescência noturna.

As observações das ondas de gravidade realizadas através da técnica de radar têm contribuído para os estudos da média e alta atmosfera. O depósito de energia das ondas, bem como sua variação sazonal, em altitude e latitude, têm sido estudadas por vários autores (Tsuda et al., 1990; Nakamura et al., 1993).

A observação da aeroluminescência noturna através de imageadores tem sido usada para investigar a estrutura horizontal das ondas de gravidade, bem como para observar as características das ondas de curto período e pequeno comprimento de onda horizontal (5~100 km) (Medeiros et al., 2004). Porém, somente as ondas com comprimentos de onda vertical maiores que a largura característica das camadas de emissão são possíveis de serem detectadas (Nakamura et al., 1999). Medidas simultâneas utilizando imageadores e radares meteóricos permitem a observação de ondas de gravidade e do vento básico na alta atmosfera. Estas medidas realizadas concomitantemente permitem a determinação da velocidade de fase e do período intrínseco das ondas de gravidade.

O presente trabalho visa apresentar a metodologia utilizada para determinar os parâmetros de ondas de gravidade observadas em imagens de aeroluminescência.

METODOLOGIA DE ANÁLISE DE IMAGENS DA AEROLUMINESCÊNCIA

As imagens das camadas da aeroluminescência obtidas através de imageadores fornecem o conjunto de dados necessários, embora não suficientes, para o estudo da atividade de ondas de gravidade na região da alta atmosfera. O imageador utilizado neste trabalho é composto basicamente de um sistema ótico e uma câmara CCD (acrônimo de *Charge Coupled Device*), o qual é capaz de detectar variações da aeroluminescência noturna e registrá-las em forma de imagens em arquivos digitais. O sistema consiste de uma lente olho de peixe ($f/4$) com um campo de visão de 180° , obtendo uma imagem completa do céu local. Esta imagem passa através de um sistema ótico telecêntrico. A trajetória ótica é interrompida por uma roda de filtros composta de cinco filtros de interferência, para o OI 557,7 nm, para o OI 630,0 nm, para o fundo luminoso em 578,0 nm, um filtro passa banda colorido no infravermelho entre 715 e 930 nm (bandas (8,3), (4,0), (9,4), (5,1), (6,2), (7,3) e parte da (8,4) do OH) sem transmissão em 865 nm e um para a banda do $O_2(0,1)$ em 865 nm (Medeiros, 2001). Os dados obtidos com este imageador foram coletados no Observatório de Luminescência Atmosférica em Cachoeira Paulista ($22,7^\circ S$, $45^\circ O$).

Pré-processamento de imagens

Para analisar as imagens de aeroluminescência e extrair os parâmetros de ondas de gravidade é necessária a realização de um pré-processamento destes dados. A técnica utilizada no pré-processamento de imagens é semelhante àquela descrita por Maekawa (2000), Medeiros (2001) e Vargas (2003). Nesta seção realizar-se-á uma breve descrição das principais etapas do pré-processamento de imagens de aeroluminescência. A Figura 1 apresenta o fluxograma do pré-processamento de imagens da aeroluminescência, onde as imagens à direita ilustram cada uma das etapas deste processo.

Uma imagem de aeroluminescência pode ser descrita em termos de uma matriz de pixels, igualmente espaçada, onde cada pixel pode ser identificado pelos índices (i, j) da matriz e pelo valor que quantifica a intensidade luminosa, associada a um tom de cinza, na posição (i, j) da imagem (Weeks, 1996).

O primeiro passo do pré-processamento visa alinhar o topo da imagem com o norte geográfico. Neste caso, a imagem sofre uma transformação de rotação sob um ângulo adequado, de modo que o topo da imagem corresponda ao norte geográfico.

O segundo passo do pré-processamento das imagens consiste em remover as estrelas das imagens. A remoção das estrelas

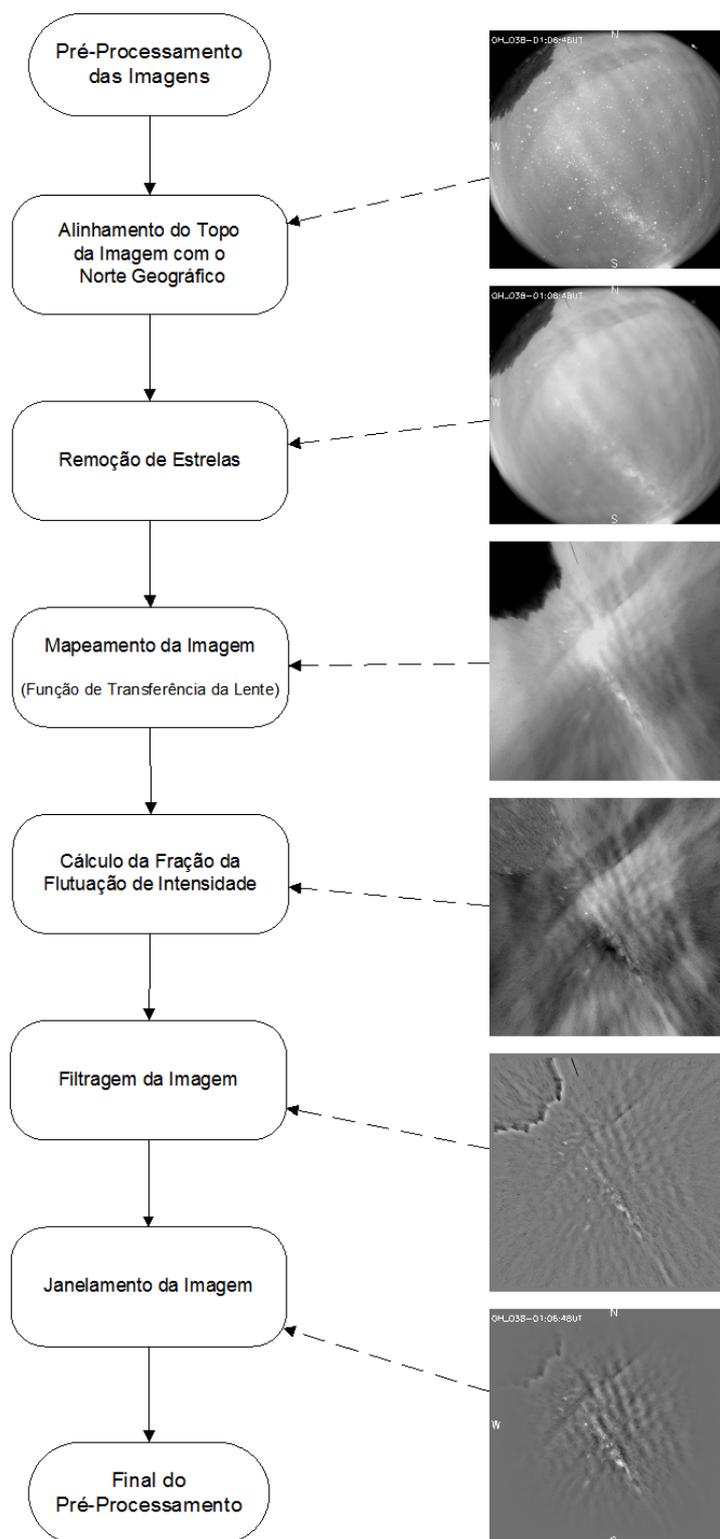


Figura 1 – Diagrama de blocos ilustrando a seqüência do pré-processamento das imagens. A imagem submetida ao pré-processamento foi adquirida no observatório de Cachoeira Paulista (SP) na noite de 6 de março de 2000 às 22:06 hora local (LT).

é necessária devido às suas acentuadas luminosidades localizadas, ocasionando uma possível contaminação do espectro das ondas em altas frequências (Maekawa, 2000).

No terceiro passo do pré-processamento, as imagens originais são mapeadas para um novo sistema de coordenadas, pois a projeção do céu noturno sobre a câmera CCD é distorcida devido ao formato da lente olho de peixe (*fish-eye*). Este problema é tratado com sucesso por Hapgood & Taylor (1982) e Garcia et al. (1997) através de um algoritmo que mapeia a imagem original em novas coordenadas, denominadas coordenadas geográficas. Neste novo sistema de coordenadas o zênite está localizado na origem do sistema, onde x e y são os eixos nas coordenadas leste-oeste e norte-sul, respectivamente.

A quarta etapa do pré-processamento das imagens é a determinação da fração da flutuação de intensidade das imagens. A fração de flutuação fornece uma medida relativa percentual sobre o quanto a intensidade em um determinado pixel variou num determinado instante. Devido ao fato do imageador não fornecer valores absolutos de intensidade luminosa, a fração da flutuação de intensidade é um bom parâmetro quando se deseja conhecer a variação da luminosidade das camadas de aeroluminescência. O cálculo da fração da flutuação de intensidade é determinado pela seguinte expressão (Garcia et al., 1997):

$$\frac{\Delta I}{\bar{I}} = \frac{I - \bar{I}}{\bar{I}}, \quad (1)$$

onde I representa a intensidade luminosa contida numa imagem qualquer da noite e \bar{I} a imagem média de toda a noite.

Na quinta etapa do pré-processamento, as imagens são filtradas por um filtro do tipo passa-alta, com frequência de corte de 5 km.

No sexto e último passo do pré-processamento, submete-se a imagem a uma função de ponderação. A função adotada neste estudo é a janela de Hanning, a qual visa minimizar os lóbulos laterais dos picos significantes do espectro. Esta função pode ser expressa pela seguinte relação (Coble et al., 1998):

$$H(i, j) = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{s_i} i \right) \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{s_j} j \right), \quad (2)$$

onde i e j representam as linhas e as colunas da matriz imagem, s representa o tamanho da matriz em pixels da imagem.

Análise espectral das imagens de aeroluminescência

A Figura 2 apresenta uma imagem da camada de emissão do Oxigênio atômico, linha verde, obtida em Cachoeira Paulista, na noite de 3 de novembro de 1999 às 03:30 hora local (LT). A imagem original, Figura 2(A), apresenta várias ondas de gravidade,

dentre as quais quatro ondas estão destacadas pelas setas, indicando a direção e o sentido de propagação de cada uma delas. A Figura 2(B) representa a imagem linearizada em 512×512 km², e o retângulo tracejado representa a região de interesse onde será aplicada a análise espectral com o objetivo de se determinar as características das ondas de gravidade que se propagam por esta região. A Figura 2(C) representa o conjunto de imagens que serão submetidas à análise espectral. A fim de produzir uma imagem linearizada, assume-se que o pico da camada de emissão do Oxigênio atômico, linha verde, seja em torno de 96 km de altura.

Para realizar a análise espectral é necessário selecionar o evento de onda de gravidade. Deste modo, é escolhida uma sequência de imagens que contenham a informação do evento de interesse. Em seguida, estas imagens são pré-processadas (esquema da Fig. 1) e então se realiza uma animação deste conjunto de imagens, com o intuito de reconhecer e selecionar a região onde será aplicada a análise espectral. Uma vez determinada esta região aplica-se a Transformada de Fourier Discreta (TFD) ao conjunto de dados selecionado obtendo seu espectro de potência.

O espectro de potência em duas dimensões é definido pelo módulo quadrático, $|F(k, l)|^2$, da Transformada de Fourier Discreta em duas dimensões (TFD-2D), o qual é expresso por:

$$F(k, l) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \left(e^{-i \frac{2\pi xk}{M}} \right) \left(e^{-i \frac{2\pi yl}{N}} \right) f(x, y), \quad (3)$$

onde, $F(k, l)$ é a transformada de Fourier da função $f(x, y)$, k, l são os números de onda zonal e meridional, $M \times N$ é a dimensão da imagem analisada. O espectro de potência é aplicado à região de interesse em todo o conjunto de imagens, conforme apresentado na Figura 2(C). Se o número de imagens selecionadas for n , o espectro de potência resultante será a média aritmética do conjunto dos n espectros computados.

A Figura 3 mostra o espectro de potência resultante de uma série de oito imagens da camada de emissão do Oxigênio atômico (linha verde) observadas na noite de 3 de novembro de 1999 entre 03:06 e 03:34 LT. A Figura 3(A) apresenta o espectro de potência resultante em duas dimensões. A potência do espectro normalizado (em dB) é dada por $P(dB) = 10 \cdot \log_{10}(P/P_0)$, onde P é a potência espectral resultante e P_0 é a potência espectral de referência da TFD-2D.

A Figura 3(B) apresenta o espectro de potência em três dimensões que mostra a amplitude em função dos números de onda zonal (k) e meridional (l) em (ciclo/km), para cada uma das oscilações detectadas. O número de onda na qual a amplitude é máxima, $k = \pm 0,045$, $l = \pm 0,021$ (ciclo/km), corresponde

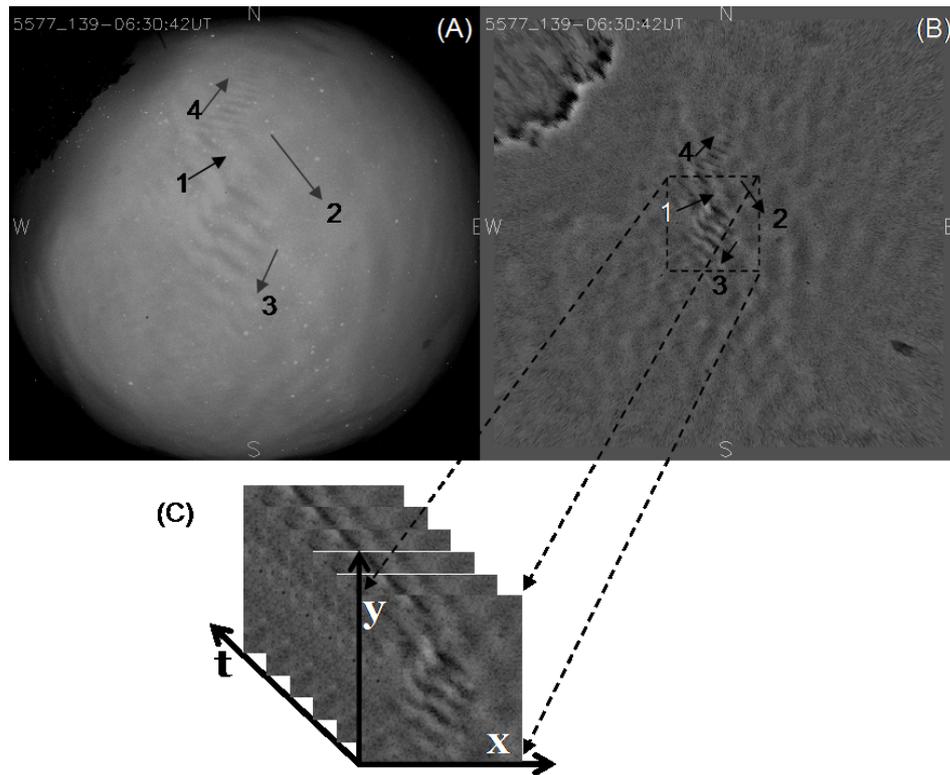


Figura 2 – Imagem da camada de emissão do Oxigênio atômico (557,7 nm) obtida em Cachoeira Paulista, na noite de 3 de novembro de 1999, detectada às 03:30 LT. Em (A) a imagem original apresenta quatro ondas de gravidade representadas pelas setas. Em (B) a imagem é mapeada em $512 \times 512 \text{ km}^2$, onde o retângulo tracejado representa a região da imagem utilizada na análise das ondas. Em (C) o conjunto de imagens que serão analisadas.

ao evento de onda de gravidade número 1, apresentado na Figura 2. Também é possível observar a existência de outros picos significantes neste espectro, que representam as demais ondas que estão presentes nestas imagens.

Como o espectro de potência é simétrico em relação à origem, $|F(k, l)|^2 = |F(-k, -l)|^2$, existe uma ambigüidade de 180° na direção de propagação da onda. Neste caso, somente a metade do espectro resultante contém a informação desejada, a outra metade é redundante. Assim, o sentido de propagação da onda não pode ser determinado diretamente através do espectro de potência. Uma maneira simples de resolver este problema é através da animação de uma seqüência de imagens que contenha o evento de onda em questão, determinando-se visualmente o sentido de propagação.

Um outro método utilizado para resolver o problema da ambigüidade no espectro é a determinação do espectro cruzado entre duas imagens sucessivas. Ao contrário do espectro de potência, o espectro cruzado fornece um valor complexo que contém informações sobre a amplitude e fase dos dois sinais

(Bloomfield, 1976). Ao escolher duas imagens sucessivas, representadas por $f(x, y)$ e $g(x, y)$ o espectro cruzado entre as imagens pode ser representado por:

$$C(k, l) = F(k, l) \cdot G^*(k, l), \quad (4)$$

onde $C(k, l)$ é o espectro cruzado entre as duas imagens, $F(k, l)$ e $G(k, l)$ representam as Transformadas de Fourier Discretas das imagens $f(x, y)$ e $g(x, y)$, respectivamente. $G^*(k, l)$ representa o complexo conjugado de $G(k, l)$. Se o número de imagens selecionadas for n o espectro cruzado será computado para $n - 1$ imagens, e o espectro cruzado resultante será então a média do conjunto de $n - 1$ espectros computados. Neste trabalho, o espectro cruzado médio foi adotado como o espectro resultante da seqüência de imagens selecionadas.

A amplitude do espectro cruzado é expressa pelo módulo do espectro cruzado, $|C(k, l)|$, e a fase do espectro cruzado é expressa por:

$$\varphi(k, l) = \arctg \left\{ \frac{\text{Im } C(k, l)}{\text{Re } C(k, l)} \right\}, \quad -\pi \leq \varphi \leq \pi. \quad (5)$$

Para o número de onda (k, l) no qual a amplitude é máxima, a fase do espectro cruzado representa a diferença de fase causada pela propagação da onda entre estas imagens.

Maekawa (2000) descreve o procedimento utilizado para determinar os parâmetros das ondas de gravidade utilizando os resultados do espectro cruzado. Para isto, o número de onda, (k, l), com a maior amplitude do espectro cruzado é escolhido como sendo o número de onda na direção zonal, k , e meridional, l , da onda de gravidade. A diferença de fase entre duas imagens sucessivas, $\Delta\varphi(k, l)$, é a fase do espectro cruzado para estes números de onda. Logo, a velocidade de fase observada, c_{obs} , pode ser determinada através da seguinte relação:

$$c_{obs} = \frac{1}{\sqrt{k^2 + l^2}} \cdot \frac{\Delta\varphi(k, l)}{360^\circ} \cdot \frac{1}{\Delta t}, \quad (6)$$

onde Δt é a diferença temporal entre duas imagens sucessivas. O comprimento de onda horizontal λ_h é determinado diretamente das frequências espaciais (k, l), em ciclos/km, pela seguinte relação:

$$\lambda_h = \frac{1}{\sqrt{k^2 + l^2}}. \quad (7)$$

O período observado da onda de gravidade pode então ser determinado através da velocidade de fase e do comprimento de onda já estabelecidos anteriormente, pela relação:

$$\tau_{obs} = \frac{\lambda_h}{c_{obs}}. \quad (8)$$

Se existirem medidas do vento básico, na altura da camada de emissão, através de radares, simultaneamente com imagens da aeroluminescência, pode-se determinar o período intrínseco da onda através da velocidade de fase intrínseca. A velocidade de fase intrínseca (c_{int}) da onda é determinada por um observador que se desloca junto com o vento básico e a sua relação com a velocidade de fase aparente ou observada (c_{obs}) é dada por $c_{int} = c_{obs} - \bar{u}$, onde \bar{u} é o vento básico na direção de propagação da onda (e.g. Fechine et al., 2007; Wrasse et al., 2007). Assim o período intrínseco é dado por:

$$\tau_{int} = \frac{\lambda_h}{c_{int}}. \quad (9)$$

A Figura 4(A) apresenta a amplitude e a Figura 4(B) apresenta a fase do espectro cruzado aplicado para a mesma seqüência de imagens utilizada na Figura 3. Observe que a amplitude do espectro cruzado apresenta o mesmo resultado do espectro de potência mostrado na Figura 3. Contudo, o espectro cruzado também fornece a informação sobre a fase do espectro. A Figura 4(B) apresenta a fase do espectro cruzado, onde se observa que para os

principais picos apresentados na Figura 4(A) existem duas fases associadas a cada pico, uma fase positiva (representada pelas cores claras) e outra fase negativa (representada pelas cores escuras).

Conforme discutido anteriormente, o resultado da aplicação da Transformada de Fourier Discreta em duas dimensões produz uma ambigüidade no sentido de propagação de 180° . Entretanto, observa-se que na Figura 4(B) a fase do espectro cruzado é anti-simétrico em relação à origem, ou seja, $\Delta\varphi(k, l) = -\Delta\varphi(-k, -l)$. De acordo com a Eq. (5), o sentido de propagação das ondas de gravidade pode ser determinado utilizando os números de onda que apresentam diferença de fase negativa, $\Delta\varphi < 0$, ou seja, no caso da Figura 4 a direção de propagação da onda número 1 (pico mais intenso) é para nordeste ($64,4^\circ$). Dessa forma é possível resolver o problema de ambigüidade decorrente da Transformada de Fourier Discreta (TFD-2D).

A Figura 5 apresenta o resultado final do espectro cruzado para a seqüência de imagens do Oxigênio atômico, linha verde. A direção e o sentido de propagação das ondas de gravidade presentes nesta seqüência de imagens podem então ser determinados sem o problema da ambigüidade. Além disso, o vento básico nas direções zonal e meridional foram observados nesta mesma noite por um radar meteorológico, instalado em Cachoeira Paulista (e.g. Clemesha et al., 2001; Batista et al., 2004). Os valores da velocidade do vento básico às 03:30 LT, na direção leste e norte foram de 13,3 m/s e 10,5 m/s, respectivamente. Assim, é possível determinar os parâmetros intrínsecos das ondas observadas.

A Tabela 1 apresenta o comprimento de onda horizontal (λ_h), direção de propagação azimutal (ϕ), velocidade de fase (c_{obs}, c_{int}), período (τ_{obs} e τ_{int}), velocidade do vento básico (\bar{u}) na direção de propagação da onda e os números de onda zonal (k) e meridional (l) das três principais ondas de gravidade detectadas na análise espectral. Observa-se na tabela que os parâmetros observados da velocidade de fase e período diferem dos parâmetros intrínsecos em cada um dos eventos de onda de gravidade. Esta diferença se deve ao efeito Doppler causado pelo vento básico.

Os eventos de onda de gravidade números 1 a 3 podem ser claramente identificados na Figura 5. Os dois picos principais na amplitude denotam os eventos de onda números 1 e 2 respectivamente. O pico no espectro referente ao evento de onda número 3 apresenta baixa energia espectral quando comparado com os dois picos principais. Considerando apenas os parâmetros observados, o evento de onda número 3 propaga-se lentamente, os valores da velocidade de fase, $c_{obs} = 2,6$ m/s, e do período $\tau_{obs} \approx 71$ minutos, reforçam esse argumento. No entanto, isto deixa

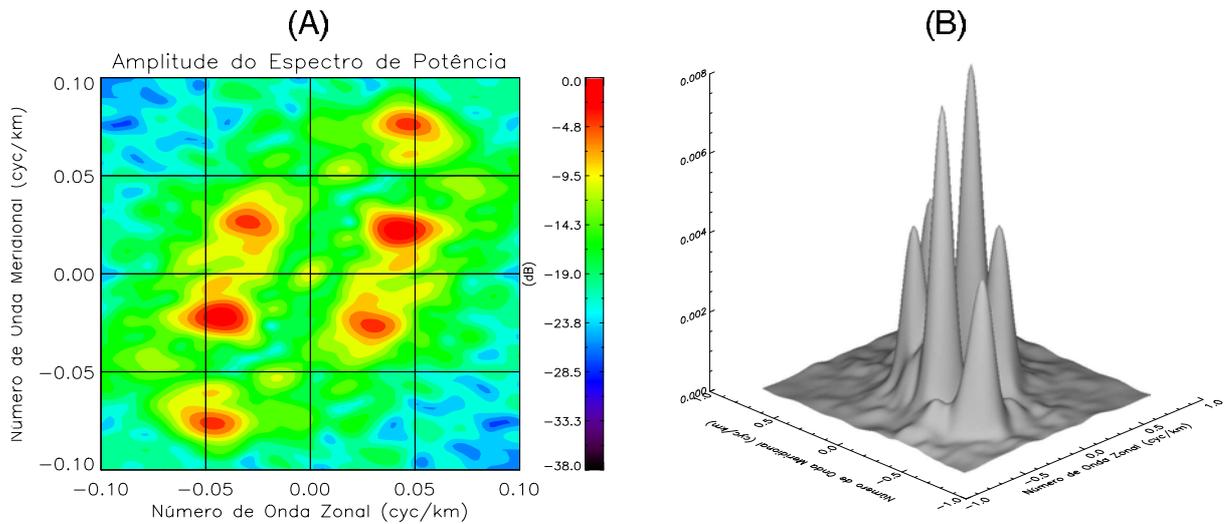


Figura 3 – Espectro de potência resultante de uma série de oito imagens obtidas da camada de emissão do Oxigênio atômico (linha verde) na noite de 3 de novembro de 1999 entre 03:06 e 03:34 LT. Em (A) é apresentado o espectro de potência resultante em duas dimensões e em (B) é apresentado o espectro em três dimensões. Os números de onda positivos representam uma direção de propagação para o norte e para o leste, respectivamente. A amplitude máxima no espectro corresponde ao evento de onda número 1 apresentado na Figura 2.

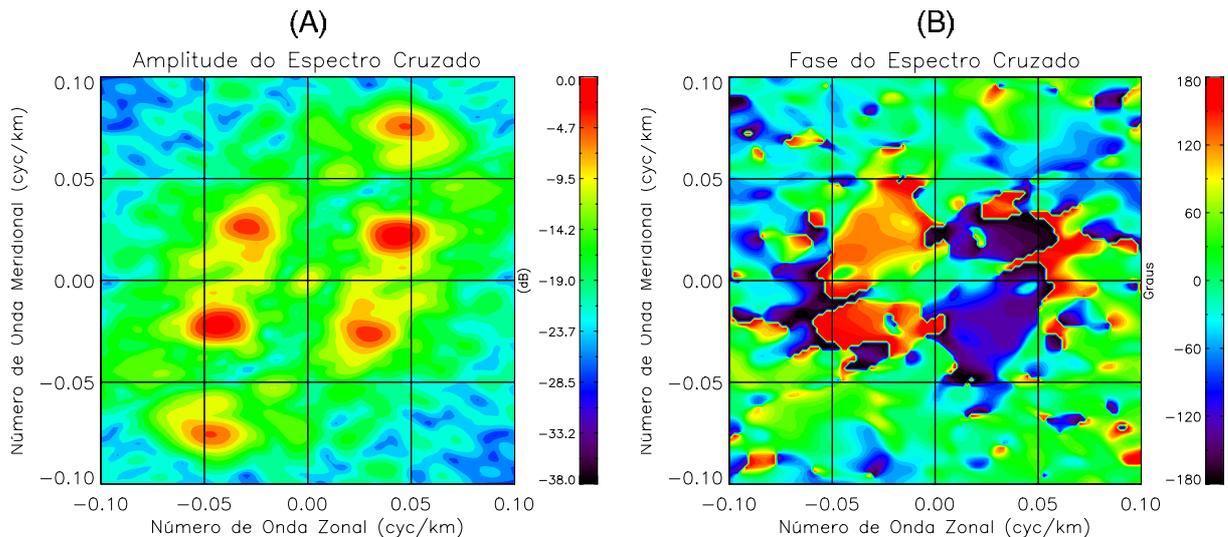


Figura 4 – Em (A) a amplitude e em (B) a fase do espectro cruzado resultante para a mesma seqüência de imagens utilizada na Figura 2.

de ser evidente quando são analisados os parâmetros intrínsecos desta onda.

Taylor et al. (1995) sugerem um mecanismo pelo qual duas ondas de larga escala e com ângulos azimutais similares interferem entre si gerando uma terceira onda, de menor escala, que se propaga quase ortogonalmente em relação à onda de maior escala. Esta pode ser uma boa explicação para o surgimento do evento de onda número 3, uma vez que esta onda está ortogonalmente disposta em relação ao evento de onda número 2, e cujo

comprimento de onda horizontal é em torno de 24 km.

Já o quarto pico no espectro resultante não pode ser atribuído ao evento de onda número 4, mesmo que o ângulo azimutal de propagação seja similar a este. Uma análise mais criteriosa mostra que o evento número 4 possui um comprimento de onda horizontal da ordem de 8 km, muito menor que o resultado encontrado no espectro cruzado, que é de aproximadamente 30 km. Além disso, o evento de onda número 4 não foi incluso na região de interesse para esta análise. Este evento de onda também pode ser

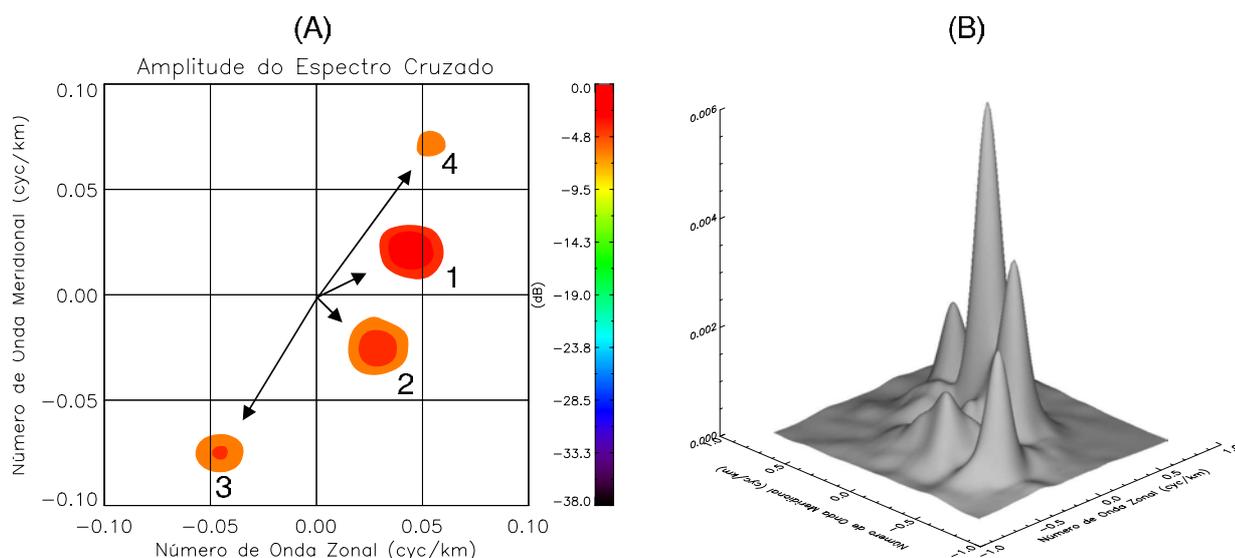


Figura 5 – Em (A) o espectro cruzado não ambíguo em duas dimensões da mesma seqüência de imagens utilizadas na Figura 3. As três maiores amplitudes denotam as características de três das quatro ondas de gravidade apresentadas na Figura 2. As setas indicam a direção de propagação de cada onda. Em (B) o espectro cruzado não ambíguo em três dimensões.

Tabela 1 – Parâmetros de onda de gravidade determinados a partir das imagens de aeroluminescência.

Onda	λ_h (km)	ϕ ($^\circ$)	c_{obs} (m/s)	c_{int} (m/s)	τ_{obs} (min)	τ_{int} (min)	u (m/s)	k (ciclo/km)	l (ciclo/km)
Onda nº 1	$20,1 \pm 2$	$64,4 \pm 2$	$41,0 \pm 4$	24,5	$8,2 \pm 0,8$	13,7	16,5	0,045	0,021
Onda nº 2	$24,1 \pm 0,5$	$131,2 \pm 8$	$39,4 \pm 0,5$	36,3	$10,2 \pm 0,2$	11,1	3,1	0,031	-0,027
Onda nº 3	$11,4 \pm 0,7$	$212,3 \pm 1$	$2,6 \pm 0,5$	18,6	$71,5 \pm 0,9$	10,2	-16	-0,046	-0,074

atribuído ao resultado de uma interferência entre os eventos de onda número 1 e 2, porém propagando-se em direção oposta ao evento de número 3.

SUMÁRIO

A partir da metodologia apresentada neste trabalho é possível determinar, sem ambigüidade, os parâmetros intrínsecos das ondas de gravidade utilizando uma seqüência de imagens das camadas de aeroluminescência. Nesta técnica a fase do espectro cruzado é o fator determinante para a remoção da ambigüidade no sentido de propagação da onda. Existem outras técnicas que resolvem o problema da ambigüidade, como por exemplo, a técnica desenvolvida por Coble et al. (1998) que determina o espectro horizontal não ambíguo aplicando de uma só vez a Transformada de Fourier Discreta em relação ao espaço e ao tempo (TFD-3D)

para um conjunto de imagens de aeroluminescência, porém é necessário utilizar dezenas de imagens de aeroluminescência para poder discriminar com mais detalhes as componentes do número de onda para vários períodos. A grande vantagem da metodologia descrita neste trabalho é a possibilidade de se obter os parâmetros das ondas de gravidade utilizando apenas poucas imagens de aeroluminescência e não dezenas de imagens como em outras técnicas. Atualmente, a redução de dados de ondas de gravidade no grupo do LUME do INPE vem sendo realizada, de modo operacional, a partir da metodologia apresentada neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) através do projeto número 05/50482-5.

REFERÊNCIAS

- BATISTA PP, CLEMESHA BR, TOKUMOTO AS & LIMA LM. 2004. Structure of the mean winds and Tides in the meteor region over Cachoeira Paulista, Brazil (22.7°S, 45°W) and its comparison with models. *Journal of Atmospheric Solar-Terrestrial Physics*, 66(6-9): 623–636.
- BLOOMFIELD P. 1976. *Fourier analysis of time series: an introduction*. New York: Wiley. 280 p.
- CLEMESHA BR, BATISTA PP & SIMONICH DM. 2001. Simultaneous measurements of meteor winds and sporadic sodium layers in the 80–110 km region. *Middle Atmosphere Temporal and Spatial Structures*, 27(10): 1679–1684.
- COBLE MR, PAPAN GC & GARDNER CS. 1998. Computing two-dimensional unambiguous horizontal wavenumber spectra from OH airglow images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(2): 368–382.
- FECHINE J, WRASSE CM, TAKAHASHI H, MEDEIROS AF, BATISTA PP, CLEMESHA BR, LIMA LM, FRITTS D, TAYLOR MJ, PAULET D, MLYNCZAK MG & RUSSELL JM. 2007. Mesospheric Bore Events during SFX Campaign. In: *International Symposium on Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere – CPEA, 2007, Kyoto, Japan*. Abstracts Book of CPEA, 1: p. 71.
- FRITTS DC & ALEXANDER MJ. 2003. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Reviews of Geophysics*, 41(1): 1–46.
- GARCIA FJ, TAYLOR MJ & KELLEY MC. 1997. Two-dimensional spectral analysis of mesospheric airglow image data. *Applied Optics*, 36(29): 7374–7385.
- GARDNER CS. 1995. Introduction to ALOHA/ANLC-93 – the 1993 Airborne Lidar and Observations of the Hawaiian Airglow Airborne Noctilucent Cloud Campaigns. *Geophysical Research Letters*, 22(20): 2789–2792.
- HAPGOOD MA & TAYLOR MJ. 1982. Analysis of airglow image data. *Annales de Geophysique*, 38(6): 805–813.
- HINES CO. 1960. Internal Atmospheric Gravity Waves at Ionospheric Heights. *Canadian Journal of Physics*, 38(11): 1441–1481.
- MAEKAWA R. 2000. Observations of gravity waves in the mesopause region by multicolor airglow imaging. Kyoto. Master Thesis – Kyoto University, 64 p.
- MEDEIROS AF. 2001. Observações de ondas de gravidade através do imageamento da aeroluminescência. (INPE-10478-TDI/932). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 187 p.
- MEDEIROS AF, TAKAHASHI H, BATISTA PP, GOBBI D & TAYLOR MJ. 2004. Observations of atmospheric gravity waves using airglow all-sky CCD imager at Cachoeira Paulista, Brazil (23°S, 45°W). *Geofísica Internacional*, 43(1): 29–39.
- NAKAMURA T, TSUDA T, YAMAMOTO M, FUKAO S & KATO S. 1993. Characteristics of Gravity-Waves in the Mesosphere Observed with the Middle and Upper-Atmosphere Radar. 2. Propagation Direction. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 98(D5): 8911–8923.
- NAKAMURA T, HIGASHIKAWA A, TSUDA T & MATSUSHITA Y. 1999. Seasonal variations of gravity wave structures in OH airglow with a CCD imager at Shigaraki. *Earth Planets Space*, 51(7-8): 897–906.
- TAYLOR MJ, TAYLOR V & EDWARDS R. 1995. An investigation of thunderstorms as a source of short period mesospheric gravity waves. In: JOHNSON RM & KILLEEN TL. (Ed.). *The Upper Mesosphere and Lower Thermosphere: A Review of Experiment and Theory*. Geophysical Monograph Series. Washington DC: American Geophysical Union, 87: 177–184.
- TSUDA T, KATO S, YOKOI T, INOUE T, YAMAMOTO M, VANZANDT TE, FUKAO S & SATO T. 1990. Gravity-Waves in the Mesosphere Observed with the Middle and Upper-Atmosphere Radar. *Radio Science*, 25(5): 1005–1018.
- VARGAS FA. 2003. Estudo do espectro das ondas de gravidade observadas em Cachoeira Paulista (23°S). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE-10502-TDI/933). São José dos Campos. 2003. 123 p.
- WEEKS JR AR. 1996. *Fundamentals of electronic image processing*. Piscataway: NJ: IEEE Press. 570 p.
- WRASSE CM, TAKAHASHI H, FECHINE J, MEDEIROS AF, BATISTA PP, CLEMESHA BR, LIMA LM, FRITTS D, VADAS S, TAYLOR MJ, PAULET D, BAGESTON JV & DENARDINI CM. 2007. Gravity Waves Observations over Brazil During SFX Campaign: Ray Tracing Results and Wave Source Estimation. In: *International Symposium on Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere – CPEA, 2007, Kyoto, Japan*. Abstracts Book of CPEA, 1: p. 73.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Cristiano Max Wrasse. Possui graduação em Licenciatura em Física pela Universidade Federal de Santa Maria (1997), mestrado em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2000), doutorado em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2004), Pós-Doutorado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2005–2006). Pesquisador visitante no Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH) da Kyoto University, Japão (2005). Atualmente é Professor Doutor da Universidade do Vale do Paraíba. Atua principalmente nos seguintes temas: Dinâmica da média e alta atmosfera, estudo de geração e propagação de ondas de gravidade e Sensoriamento Remoto da Atmosfera.

Hisao Takahashi. Possui graduação em Física pela Universidade de Niigata (1968), mestrado em Física pela Universidade de Niigata (1970) e doutorado em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (1980). Atualmente é professor titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Aeronomia, atuando principalmente nos seguintes temas: ondas de gravidade e planetárias, aeroluminescência, dinâmica da atmosfera equatorial e o acoplamento dinâmico entre troposfera e mesosfera-ionosfera.

Amauri Fragoso de Medeiros. Possui graduação em Licenciatura Plena em Física pela Universidade Estadual da Paraíba (1984), mestrado em Ensino de Ciências (Modalidade Física e Química) pela Universidade de São Paulo (1995) e doutorado em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2001). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Campina Grande. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Geofísica. Atua principalmente nos seguintes temas: ondas de gravidade e aeroluminescência.

Lourivaldo Mota Lima. Possui graduação em Licenciatura Plena em Física pela Universidade Estadual da Paraíba (1985), especialização em Ensino de Ciências pela Universidade Estadual da Paraíba (1992), mestrado em Meteorologia pela Universidade Federal da Paraíba (1995) e doutorado em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2004). Atualmente é professor titular da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Geofísica. Atua principalmente nos seguintes temas: Dinâmica da Alta Atmosfera, Ondas Atmosféricas, Luminescência Atmosférica.

Michael John Taylor. Possui bacharelado em Física pela Southampton University, U.K. (1974), mestrado em Eletrônica pela Southampton University, U.K. (1977), e Ph.D. em Física da Atmosfera pela Southampton University, U.K. (1986). Pesquisador visitante da Radio Atmospheric Science Center (RASC) na Kyoto University, Japão (1997-1998). Atualmente é professor associado do Departamento de Física da Utah State University (USU) e diretor do Bear Lake Observatory. Atua principalmente nos seguintes temas: Dinâmica da Alta Atmosfera, Ondas Atmosféricas, Luminescência Atmosférica.

Delano Gobbi. Possui graduação em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1984), mestrado em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (1988), doutorado em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (1993) e pós-doutorado pela Kyoto University (1999). Atualmente é Pesquisador Associado do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Geofísica. Atua principalmente nos seguintes temas: Dinâmica Mesosférica, Emissões Mesosféricas, Ondas de Gravidade.

Joaquim Fechine. Possui graduação em Bacharelado em Física pela Universidade Federal de Campina Grande (1998) e mestrado em Ciências Atmosféricas pela Universidade Federal de Campina Grande (2004). É doutorando em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Geofísica. Atua principalmente nos seguintes temas: Dinâmica e propagação de ondas de gravidade e Sensoriamento Remoto da Atmosfera.