

Processamento de imagens multitemporais usando a transformada rápida de Fourier (FFT) na dimensão do tempo

Ronie Paulucio Porfírio¹
Osmar Abílio de Carvalho Júnior²
Luis Cláudio Lopes de Araújo³
Nilton Correia da Silva⁴
Díbio Leandro Borges⁵

¹Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - FATECS – Centro Universitário de Brasília (UniCEUB) -SEPN 707/907 *Campus* do UniCEUB Bloco 7, Asa Norte, 70790-075, Brasília, Distrito Federal - roniepp21@gmail.com

²Departamento de Geografia - Universidade de Brasília (UnB)- Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, Distrito Federal - osmarjr@unb.br

³Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - FATECS – Centro Universitário de Brasília (UniCEUB) -SEPN 707/907 *Campus* do UniCEUB Bloco 7, Asa Norte, 70790-075, Brasília, Distrito Federal - luisclaudio.mat@gmail.com

⁴Departamento de Sistemas de Informação - Centro Universitário de Anápolis (Unievangélica) - Avenida Universitária km 3.5 Cidade Universitária - Anápolis Goiás Brazil - nilton@unievangelica.edu.br

⁵Departamento de Ciência da Computação (CIC) - Universidade de Brasília (UnB)- Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF – Brasil - dibio@unb.br

Abstract. Orbital images are difficult to maintain a temporal precision due to the atmosphere interferences (clouds and shadows), radiometric variation (sensor oscillation, solar illumination angle, among others) or noises, common features in remote sensing images. In this paper is demonstrated a software that filters continuous series of the NDVI-MODIS along time using the Fast Fourier Transform algorithm. The specific software for time series was developed in C++ language. The algorithm comprises the following steps: forward transform of the time domain sign extracted from the image, frequency filtering followed by the inverse transform of the frequency domain filtered sign. This method enabled to eliminate different kinds of noise from the temporal series.

Palavras-chave: remote sensing, image processing, multitemporal images, Fast Fourier Transform (FFT), filter, time domain, frequency domain, sensoriamento remoto, processamento de imagens, imagens multitemporais, transformada rápida de Fourier, filtro, domínio do tempo, domínio da frequência.

1. Introdução

Os procedimentos de detecção de mudança consistem em modelos computacionais que permitem identificar as alterações em objetos ou feições da superfície terrestre entre diferentes tempos, por intermédio de imagens de sensores remotos (Singh, 1989). Estes métodos apresentam uma rápida progressão e desenvolvimento, com diferentes aplicações nos estudos de vegetação, clima, uso da terra como de outras mudanças naturais ou induzidas pelo homem (Sader et al., 1990; Stone et al., 1994; Jensen et al., 1995; Mora & Iverson, 1997). Desta forma, nos últimos anos foram propostos diferentes métodos neste propósito considerando distinta complexidade, refinamento e robustez.

Os métodos de análise multitemporal podem ser subdivididos em dois tipos: (a) emprego de pontos discretos no tempo de uma mesma região com o propósito de identificar mudanças

espaciais na cobertura da terra; e (b) emprego de séries temporais contínuas que permite descrever a dinâmica e a evolução superficial como, por exemplo, o comportamento da fenologia da planta ou o processo de inundação de rios.

As técnicas que consideram o emprego de pontos discretos no tempo apresentam uma maior representatividade entre os métodos de detecção de mudanças devido à maior facilidade de processamento. No entanto, os métodos que consideram a análise contínua dos dados temporais permitem uma melhor modelagem dos processos ecológicos descrevendo detalhadamente a sua evolução no tempo. Essa abordagem permite um novo enfoque no processamento de dados temporais por sensoriamento remoto aumentando a sensibilidade e permitindo uma descrição da variação sazonal dos fenômenos.

A análise de séries temporais de vegetação considera normalmente assinaturas temporais provenientes de índices de vegetação, como o NDVI e o EVI, de sensores com alta resolução temporal, como o AVHRR e MODIS (Tucker et al., 1991, Prince 1991; Wessels et al., 2004, DeFries et al., 1995; DeFries & Townshend, 1994; Running, 1995). No entanto, estas imagens apresentam dificuldade de manter uma consistência e qualidade ao longo do tempo devido às interferências atmosféricas, cobertura de nuvens, variação radiométrica (oscilação do sensor, iluminação solar, entre outros) ou presença de outros ruídos que são feições comuns no sensoriamento remoto (Hall et al., 1991; Hill & Sturm, 1991 Du et al., 2001; Furby et al., 2001; Carvalho Júnior et al. 2006). Desta forma, um importante entrave nos estudos espectrais de imagens temporais é a alta concentração de ruídos, tornando prioritário um tratamento prévio dos dados.

O objetivo do presente trabalho é desenvolver um programa para filtrar os eventuais ruídos presentes em séries temporais utilizando a transformada de Fourier no domínio do tempo. Neste intuito buscou-se o desenvolvimento de um sistema amigável e de fácil manuseio pelos usuários.

2. Fundamentos da transformação rápida de Fourier

O algoritmo de transformada rápida de Fourier foi desenvolvido na década de 60 a partir dos trabalhos de J.W. Cooley e J.W. Tukey (Cooley e Tukey, 1965; Press et al., 1992). Danielson e Lanczos (1942) mostraram que a transformada discreta de Fourier de um sinal de tamanho N pode ser reescrita como a soma de duas transformadas de Fourier, cada uma de tamanho igual a $N/2$. Uma delas é obtida a partir dos elementos pares do sinal, a outra, a partir dos elementos ímpares, considerando as seguintes formulações (1) a (4):

$$F_k = \sum_{j=0}^{N-1} e^{2\pi ijk/N} f_j \quad (1)$$

$$= \sum_{j=0}^{N/2-1} e^{2\pi ik(2j)/N} f_{2j} + \sum_{j=0}^{N/2-1} e^{2\pi ik(2j+1)/N} f_{2j+1} \quad (2)$$

$$= \sum_{j=0}^{N/2-1} e^{2\pi ikj/(N/2)} f_{2j} + W_k \sum_{j=0}^{N/2-1} e^{2\pi ikj/(N/2)} f_{2j+1} \quad (3)$$

$$F_k = F_k^e + W^k F_k^o \quad (4)$$

Onde, $W = e^{2\pi i/N}$ que é uma constante. F_k^e representa o k -ésimo componente da transformada de Fourier de tamanho $N/2$ formado pelos componentes pares (“e”) da f_j original. F_k^o , por sua vez, representa o k -ésimo componente da transformada de Fourier de tamanho $N/2$ formado pelos componentes ímpares (“o”) da f_j original.

Note que k varia de 0 até N e não só até $N/2$. Dessa forma, as transformadas F_k^e e F_k^o são periódicas em k com tamanho $N/2$. Assim, cada uma delas é repetida a cada dois ciclos para obter F_k .

Pode-se usar esta formulação de forma recursiva reduzindo o problema de calcular F_k em calcular F_k^e e F_k^o . Recursivamente, podemos submeter cada um desses cálculos a novas reduções. Por exemplo, podemos encontrar F_k^e , encontrando F_k^{ee} e F_k^{eo} , ambas de tamanho $N/4$, e assim por diante. Esse processo recursivo é chamado de *Danielson e Lanczos Lemma*.

O caso mais fácil de ser tratado ocorre quando o tamanho de N original é uma potência de 2. Quando isso não ocorre, realiza-se um aumento do tamanho de N , com valores de zeros, até atingir a mais próxima potência de 2. Com essa restrição em N , podemos aplicar repetidamente o *Danielson e Lanczos Lemma* reduzindo o problema em transformadas de sinais de $N/2$, $N/4$, $N/8$ até o tamanho $N/N = 1$ que é o próprio sinal: $F_k^{eooooo...ooo} = f_n$ para algum n .

A próxima etapa é entender que valores de n correspondem a qual padrão de e 's e o 's. A resposta é: reverter os padrões de e 's e o 's assinalando $e = 0$ e $o = 1$ e teremos, em binário o valor de n . Isso funciona porque as sucessivas subdivisões dos dados em dados pares e ímpares correspondem aos bits menos significativos de n . A essa idéia, damos o nome de *bit reverse*.

O processo de reversão de bits combinado ao *Danielson e Lanczos Lemma* faz a FFT se tornar um processo prático: Primeiramente rearranjamos os elementos de um sinal na ordem bit reversa. Depois um loop externo é executado $\log_2 N$ vezes calculando, em turnos, transformadas de tamanho 2,4,8,...,N. Para cada etapa desse loop externo há dois loops internos alinhados que agem sobre as já computadas sub-transformações implementando o *Danielson-Lanczos Lemma*. Dessa forma todo o algoritmo se torna da ordem de $N \times \log_2 N$. (Press et al., 1992).

3. Material e métodos

3.1 Dados do sensor MODIS

No presente trabalho são utilizadas imagens do sensor MODIS. Estas imagens são disponibilizadas gratuitamente pela NASA e possuem alta resolução temporal, que varia de 1 a 16 dias (Justice et al., 2002). As trinta e seis bandas espectrais deste sensor estão localizadas em função de um comprimento de onda definido para a observação de feições das propriedades das nuvens e sua dinâmica, as propriedades da vegetação na cobertura terrestre e a temperatura da superfície dos oceanos (Salomonson & Toll, 1990). Além disso, são oferecidas imagens georreferenciadas e corrigidas dos efeitos atmosféricos, como nuvens, aerossóis, entre outros (Telles et al., 1995, Wolf et al., 2002).

No presente trabalho são utilizadas seqüências de imagens NDVI (MOD13Q1) entre 2000 até 2007 com resolução de 250m. Os produtos referentes aos índices de vegetação (MOD13) são gerados a partir da reflectância diária de superfície (série MOD09 - nível 2), corrigidos para o espalhamento molecular, absorção de ozônio e aerossóis (Vermote et al., 2002). Na formulação dos índices de vegetação são utilizados os dados de reflectância da superfície no nível 2G (reprojetados) que faz uma composição temporal de 16 dias desses dados (nível 3).

Para obter os espectros de NDVI as imagens relativas às diferentes datas devem ser unidas formando cubo de imagens (Carvalho Júnior et al., 2006). Neste cubo os eixos “x” e “y” são as coordenadas geográficas, enquanto no eixo “z” posiciona-se o espectro temporal NDVI. Os espectros temporais de NDVI são ordenados no cubo utilizando a seqüência dos dias do ano em ordem crescente.

3.2. Desenvolvimento do Programa

O desenvolvimento do programa considerou sete etapas principais:

1. Definir um cubo de imagens referente a uma série temporal como dado de entrada, denominada como Série Temporal Original (STO);
2. Extrair um sinal no *domínio do tempo* da STO;
3. Transformar esse sinal para o domínio da frequência;
4. Aplicar um filtro nesse sinal;
5. Aplicar a transformada inversa nesse sinal filtrado de forma a voltar para o domínio do tempo;
6. Gravar esse sinal filtrado no domínio do tempo numa nova imagem multitemporal filtrada de acordo com o filtro usado na etapa quatro. A essa última imagem daremos o nome de Série Temporal de Saída (STS);
7. Fazer novamente as etapas de 2 a 6, escolhendo a cada iteração um novo ponto da STO até haver percorrido todos os pontos possíveis tomando o cuidado de aplicar sempre o mesmo filtro em todos os sinais.

3.3. Codificação

Esse algoritmo foi implementado na linguagem C++ considerando o código desenvolvido por MLMSoftwareGroup LLC que pode ser encontrado no CD que acompanha o livro de Gorman et al. (2008). Algumas adaptações foram feitas. Primeiramente alterou-se o código para realizar a normalização (divisão de cada elemento da transformada por 1/N) somente na transformada direta para manter a compatibilidade com a convenção adotada por Haykin e Veen (2001) considerado para validar os resultados obtidos. Em segundo lugar, adaptou-se esse algoritmo de forma a usar algumas classes da biblioteca *Rogue Wave implementation of the C++ Standard Library* fornecidas pelo *Apache Software Foundation*. (Rogue Wave Software, 2008). Especificamente, as classes usadas foram a *valarray class template* e a *complex class template* para fazer a modelagem e manipulação dos sinais complexos resultantes das transformadas diretas dos sinais temporais.

A classe *complex* é uma classe usada para criar objetos para representar e manipular números complexos. As operações definidas nessa classe admitem que elas sejam utilizadas juntamente a outros tipos numéricos da linguagem C++ permitindo que softwares numéricos sejam facilmente e naturalmente desenvolvidos. (Apache Software Foundation, 2008). Usamos essa classe para definir um tipo de dado nomeado *TXFloat* que permitiu criar variáveis de números complexos com parte real e imaginária em ponto flutuante. A classe *valarray*, por sua vez, é uma classe usada para representar vetores de dados unidimensionais para desempenhar cálculos sem prejudicar o desempenho do programa. Essa classe facilita a modelagem e manipulação de vetores de dados e fornece a eficiência indispensável que programas numéricos requerem. Usamos essas duas classes em conjunto para definir um tipo de dado nomeado *TXSinal* como podemos ver nas seguintes declarações:

- **typedef** complex<float> TXFloat;
- **typedef** valarray<TXFloat> TXSinal;

Dessa forma, variáveis do tipo *TXSinal* foram usadas para representar os sinais reais e complexos manipulados pelo algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT).

Assim, essas adaptações permitiram produzir um algoritmo rápido o suficiente para realizar sucessivas filtrações em tempo real possibilitando ao usuário verificar o comportamento do sinal resposta conforme os parâmetros de filtração iam sendo alterados. Assim, o usuário pode verificar a resposta para um determinado filtro em diferentes pontos da imagem antes mesmo de realizar qualquer processamento definitivo. Somente após haver definido um filtro desejável que o processamento de toda imagem é realizado.

4. Resultados

4.1. Programa desenvolvido

Como resultado é gerado um módulo específico para o tratamento de imagens multitemporais. Esse módulo possui quatro interfaces principais: “Visualizar Imagem”, “Domínio do Tempo”, “Domínio da Frequência” e “Filtro” que permitem realizar uma avaliação dos espectros temporais da STO. Além disto, o programa permite que um filtro específico seja configurado observando prévias dos sinais temporais resultantes. Basicamente, o procedimento de configuração do filtro ocorre em 4 etapas:

1. Seleciona-se uma banda do cubo de imagens para visualização na interface “Visualizar Imagem”.
2. Seleciona-se uma coordenada relativa a qualquer posição geográfica. Automaticamente, as interfaces “Domínio do Tempo” e “Domínio da Frequência” apresentam, respectivamente, o espectro temporal e o espectro de Fourier equivalente da STO na cor azul.
3. Configura-se o filtro elegendo que componentes de Fourier da STO serão mantidos e quais serão zerados. Automaticamente, as interfaces “Domínio da Frequência” e “Domínio do Tempo” apresentam respectivamente e em tempo real o espectro de Fourier filtrado e o espectro temporal resposta equivalente da STS na cor vermelha.
4. Configurado o filtro, executa-se a ação “Gerar” que produzirá de fato um cubo filtrado segundo o filtro escolhido.

A **Figura 1** ilustra as quatro principais interfaces desse módulo desenvolvido.

4.2. Resultados do tratamento dos dados

Na **Figura 2**, podemos visualizar na imagem da esquerda, uma superposição do espectro temporal original (em azul) e o espectro temporal resultante (em vermelho). Na imagem da direita, apresentamos os espectros de Fourier correspondentes.

Na **Figura 3**, mostramos uma mesma imagem antes do filtro (à esquerda) e depois do filtro (à direita). A imagem antes do filtro mostra a banda da imagem multitemporal de número 98 onde ocorreu um erro. Podemos verificar esse erro na forma de um ruído (variação brusca na amplitude) na **Figura 2**: o ruído é o quarto menor pico contando da esquerda para a direita na imagem relativa ao espectro temporal original. Voltando a atenção para a **Figura 3**, a nova imagem filtrada relativa a essa mesma banda é mostrada na imagem da direita. Verifique que o erro (toda parte da imagem de coloração escura) foi filtrado e, portanto, a imagem revela detalhes que antes não podiam ser observados.

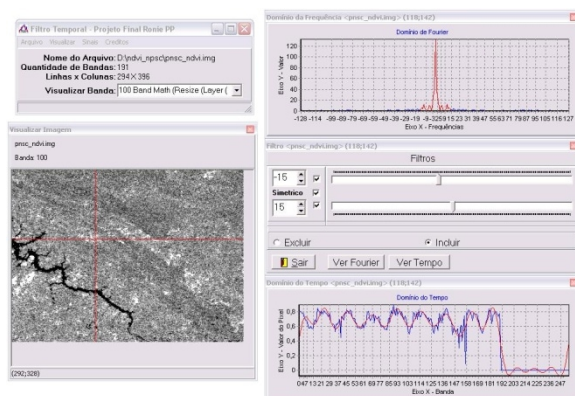


Figura 1 - Módulo de tratamento de imagens

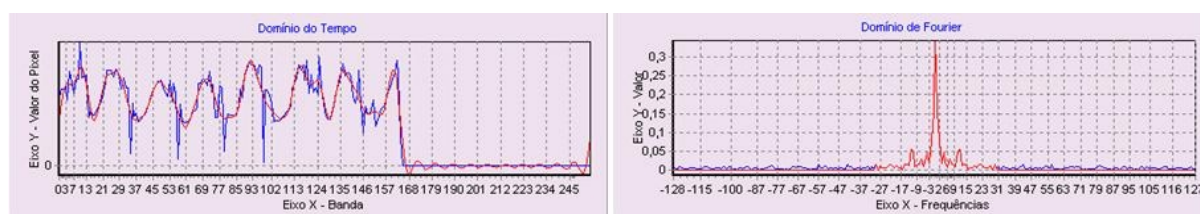


Figura 2 - Espectros temporais e espectros de Fourier, nessa ordem.



Figura 3 - Imagens antes e após o filtro.

5. Conclusão

De certo, desenvolveu-se um software capaz de filtrar eventuais ruídos presentes em séries temporais combinando o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT) com classes de dados da linguagem C++ com o objetivo de maximizar a velocidade do processamento. O resultado foi um sistema amigável, intuitivo, fácil de ser operado capaz de realizar um tratamento prévio nos dados reduzindo os ruídos e permitindo que os pesquisadores realizem os estudos espectrais de imagens temporais necessários.

Referências

- Apache Software Foundation. *Apache C++ Standard Library (STDCXX)*. 25 de 10 de 2008. <http://stdcxx.apache.org/> (acesso em 25 de 10 de 2008).
- Carvalho Junior, O.A.; Hermuche, P.M.; Guimarães, R.F. *Identificação regional da floresta decidual na bacia do rio PARANÁ (GO/TO) a partir da análise multitemporal de imagens MODIS*. *Revista Brasileira de Geofísica*, vol.24, p.319-332, 2006.
- Cooley, J. W. e Tukey J. W., *An algorithm for machine calculation of complex Fourier series*. *Math. Computation*. Vol 19, 1965.
- Danielson, G. C. e Lanczos C. *Some improvements in practical Fourier analysis and their application to X-ray scattering from liquids*. *J. Franklin Inst.* Vol. 233, 1942.
- De Fries, R. & Townshend, J.R.G. *NDVI derived land cover classification at global scales*. *International Journal of Remote Sensing*, vol.15, n.17, p.3567–3586, 1994.
- De Fries R, Hansen M & Townshend J.R.G. *Global discrimination of land cover types from metrics derived from AVHRR pathfinder data*. *Remote Sensing of Environment*, vol.54, p.209–222, 1995.
- Du, Y.; Cihlar, J.; Beaubien, J. & Latifovic, R. *Radiometric normalization, composition, and quality control for satellite high resolution image mosaics over large areas*. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** 39: 623-634, 2001.
- Furby, S. L. & Campbell, N. A. *Calibrating images from different dates to .like-value. digital counts*. **Remote Sensing of Environment** v. 77, p. 186-196, 2001.
- Gorman, Lawrence, Michael J. Sammon, e Michael SEUL. *Practical Algorithms for Image Analysis*. 2. New York: Cambridge University Press, 2008.
- Hall, F. G.; Strelbel, D. E. & Nickeson, J. E.; Goetz, S.J. *Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images*. **Remote Sensing of Environment** 35: 11-27, 1991.
- Haykin, Simon, e Barry Van Veen. *Sinais e Sistemas*. Edição: Anatólio Laschuk. Tradução: José Carlos Barbosa dos Santo. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- Hill, J. & Sturm, B. *Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural landcover classification and vegetation monitoring*. **International Journal of Remote Sensing** 12: 1471-1491, 1991.
- Jensen, J.R., Rutchey, K., Koch, M.S., Narumalani, S. *Inland wetland change detection in the Everglades water conservation area 2A using time series of normalized remotely sensed data*. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 61, 199–209. 1995.
- Mora, F., & Iverson, L. R. *Dynamic stratification of the landscape of Mexico: analysis of vegetation patterns observed with multitemporal remotely sensed images*. **Geocarto International**, 12: 73– 87. 1997.
- Press, William H., Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, e Brian P. FLANNERY. *Numerical Recipes in C The Art of Scientific Computing*. 2 ed. Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1992.
- Prince S.D. *A model of regional primary production for use with coarse-resolution satellite data*. **International Journal of Remote Sensing**, vol.12, p.1313–1330, 1991.
- Rogue Wave Software. *C++ Standard Library*. 25 de 10 de 2008. <http://www.roguewave.com/products/sourcepro/standard-library.php> (acesso em 25 de 10 de 2008).
- Running, S.W., Loveland, T.R., Pierce, L.L., Nemani, R.R. & Hunt, E.R.J. *A remote sensing based vegetation classification logic for global land cover analysis*. **Remote Sensing of Environment**, vol.51, n.1, p.39-48, 1995.
- Sader, S. A., Stone, T. A., & Joyce, A. T. *Remote sensing of tropical forests: an overview of research and applications using nonphotographic sensors*. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 56: 1343–1351. 1990.
- Singh, A. *Digital change detection techniques using remotely-sensed data*. **International Journal of Remote Sensing**, 10: 989–100. 1989.
- Stone, T. A., Schlesinger, P., Houghton, R. A., & Woodwell, G. M. *A map of the vegetation of South America based on satellite imagery*. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 60: 541– 551. 1994.

Tucker, C.J., Newcomb, W.W., Los S.O. & Price, S.D. *Mean an inter-year variation of growing season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989*. **International Journal of Remote Sensing**, vol.12, p.1133–1135,1991.

Wessels K.J, Prince S.D, Frost P.E & Van Zyl D. Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, vol.91, p.47–67, 2004.