

ANÁLISE ESPECTRAL DE SINAIS DOPPLER COM O MODELO AUTOREGRESSIVO: VANTAGENS E DESVANTAGENS

por

Fernando S. Schlindwein¹ e David H. Evans²

RESUMO -- A técnica Doppler para estudo do fluxo sangüíneo arterial baseia-se numa relação de proporcionalidade entre o desvio Doppler que ocorre na frequência de um sinal de ultra-som após este sofrer espalhamento pelo sangue e a distribuição de velocidades do sangue no vaso. Em condições ideais a forma da densidade espectral de potência do sinal Doppler corresponderia a distribuição de velocidades do sangue no vaso. A estimação da densidade espectral de potência de sinais Doppler é normalmente realizada através de uma transformada rápida de Fourier (FFT). Apesar de ser um algoritmo computacionalmente muito eficiente, a FFT tem algumas limitações, especialmente para análise de trechos curtos de sinal. A técnica autoregressiva (AR) para estimação da densidade espectral de potência tem algumas vantagens em relação à FFT, apresentando-se como uma promissora alternativa para análise de sinais Doppler em algumas situações, principalmente para estudo de sinais em que o espectro varia rapidamente no tempo. A técnica AR para análise espectral de sinais Doppler é comparada a técnica tradicional de periodogramas (FFT) e as vantagens e desvantagens de se utilizar o modelo autoregressivo para o estudo de sinais Doppler são listadas e discutidas.

palavras-chave: modelo autoregressivo, análise espectral, sinais Doppler, processamento em tempo-real

INTRODUÇÃO

A técnica de ultra-som Doppler é largamente utilizada na rotina clínica para

¹-Professor Assistente do Departamento de Engenharia Eletrônica da Escola de Engenharia da UFRJ, e do Programa de Engenharia Biomédica da COPPE/UFRJ, CEP 21945 - Rio de Janeiro, RJ. Brasil. (endereço para correspondência).

²-Professor de Física Médica, Leicester Royal Infirmary, Dept. Medical Physics & Clinical Engineering, Leicester LE1 5WW, UK.

avaliação da condição vascular. Já que o exame dopplerométrico é não-invasivo e o velocímetro Doppler básico é um instrumento barato, o exame constitui-se excelente método de triagem para exames mais sofisticados (Brum, 1986).

A técnica Doppler para estudo do fluxo sanguíneo arterial baseia-se numa relação de proporcionalidade entre o desvio Doppler na frequência de um sinal de ultra-som após este sofrer espalhamento pelo sangue e a distribuição de velocidades do sangue no vaso. Em condições ideais a forma da função densidade espectral de potência do sinal Doppler corresponderia a um histograma da distribuição de velocidades do sangue no vaso (Arts e Roevros 1972, Evans et al. 1989).

A estimação da densidade espectral de potência de sinais Doppler é normalmente realizada através da aplicação de uma transformada rápida de Fourier (FFT) diretamente ao sinal amostrado. O sinal é processado em segmentos individuais de 128 ou 256 amostras tipicamente, sendo que normalmente cada segmento é multiplicado por uma janela 'anti-leakage' previamente ao cálculo da FFT (Bingham, Godfrey e Tukey 1967, Harris 1978). Os segmentos podem ser justapostos no tempo ou com superposição parcial, conforme descrito por Welch (1967). Esta técnica de efetuar a transformada diretamente no sinal foi primeiro descrita por Schuster (1898), que foi quem inventou o nome 'periodograma' para designar o espectro do sinal obtido dessa maneira.

Apesar de a técnica dos periodogramas ser prontamente implementável por um algoritmo computacionalmente muito eficiente e elegante, a FFT, esse método tem algumas limitações, especialmente para análise de trechos curtos de sinal. A técnica autoregressiva (AR), descrita por Burg (1975) e por Kay e Marple (1981), tem algumas vantagens em relação à FFT para estimação da densidade espectral de potência de sinais Doppler, apresentando-se como uma promissora técnica alternativa em algumas situações, principalmente para estudo de sinais Doppler em que o espectro do sinal varia rapidamente no tempo. Apresentamos a seguir uma comparação da técnica AR para análise espectral de sinais Doppler com a técnica tradicional de periodogramas (FFT) na forma de uma breve discussão das vantagens e desvantagens de se utilizar o modelo autoregressivo para o estudo de sinais Doppler.

AS VANTAGENS DO MODELO AR EM RELAÇÃO A FFT

Janelas 'antileakage'

A FFT assume implicitamente periodicidade do sinal fora do trecho amostrado (Gold e Rader 1969, Brigham 1974). Como isto não é geralmente verdade, o truncamento do sinal causa uma discontinuidade nas extremidades do segmento amostrado, e a energia associada a essa discontinuidade 'vaza' para todas as componentes espectrais, razão pela qual o indesejável fenômeno é conhecido pelo nome de 'leakage' (vazamento, em inglês). Uma maneira de diminuir o efeito de 'leakage' é multiplicar o trecho do sinal amostrado por funções

especiais chamadas 'janelas antileakage' (Harris 1978), mas isso diminui a resolução espectral. O modelo AR não assume que o sinal seja periódico no domínio do tempo, portanto 'janelas anti-leakage' não são necessárias.

Espectro contínuo

O modelo autoregressivo produz um espectro contínuo enquanto a FFT produz um espectro discreto com $N/2$ linhas espectrais para segmentos de sinal com N amostras reais. O espectro produzido pela FFT dá margem a ambiguidade em termos de resolução espectral. O efeito de se ver o espectro somente nas $N/2$ frequências é às vezes chamado de 'efeito cerca de pauzinhos' ('picket-fence effect').

Estabilidade para segmentos de curta duração

O modelo AR é capaz de estimar o espectro do sinal mesmo a partir de segmentos curtos. Kitney, Talhami e Giddens (1986) demonstraram que o método autoregressivo é capaz de estimar o espectro de trechos tão curtos quanto a metade de um ciclo de uma senóide, enquanto que a técnica de Fourier necessita de segmentos contendo tipicamente cinco períodos do sinal para produzir estimadores espectrais confiáveis (Gold e Rader 1969, Kitney, Talhami e Giddens 1986).

Resolução temporal

A capacidade de estimar o espectro do sinal a partir de segmentos curtos permite melhor resolução temporal que a FFT, ie, a técnica permite um maior número de 'espectros por segundo', portanto melhor capacidade de acompanhar mudanças bruscas no conteúdo espectral de sinais pouco estacionários. Nessas situações, onde o espectro do sinal varia rapidamente no tempo, o modelo autoregressivo produz sonogramas mais estáveis que a FFT (Kitney, Talhami e Giddens 1986, Kaluzinski 1987, Schlindwein 1989).

Resolução espectral

Larry Marple (1977) demonstrou que o modelo AR tem resolução até dez vezes melhor que o método de periodogramas. A resolução do método AR depende da relação sinal ruído do trecho a ser analisado, mas mesmo para relações sinal ruído da ordem de -40 dB o modelo AR tem melhor resolução que a técnica de periodogramas. Trabalhos de outros pesquisadores confirmam estes resultados (Sakai 1975, Kitney, Talhami e Giddens 1986, Kaluzinski 1987).

AS DESVANTAGENS DO MODELO AR EM RELAÇÃO A FFT

Tempo de processamento

A técnica autoregressiva conforme implementada por Schindwein e Evans (1989) para processamento em tempo-real demora tipicamente quatro vezes mais do que uma FFT para analisar segmentos de mesmo tamanho.

Reversibilidade

A técnica AR não é reversível.

Facilidade de programar

A dificuldade de programação da técnica AR é maior. A dificuldade de codificar ambos algoritmos é praticamente equivalente.

Sensibilidade a erros de truncamento

A técnica AR mais frequentemente implementada é a técnica iterativa de Levinson-Durbin (Kay e Marple 1981), conforme implementada em tempo-real para sinais Doppler por Schindwein (1989). Nesse algoritmo erros de truncamento tem efeitos piores do que na técnica de FFT, daí a dificuldade de implementação do modelo AR em processadores inteiros.

Ordem do modelo

Diversas técnicas foram propostas para estimação da ordem 'ótima' para o modelo AR (Akaike 1969, Kitney, Talhami e Giddens 1986, Parzen 1975). Para sinais Doppler nossa experiência justifica o emprego de uma ordem fixa igual a 12 (Schindwein e Evans 1990).

IMPLICAÇÕES PARA ANÁLISE DE SINAIS DOPPLER

Apesar de muito do que tem sido escrito em comparações entre a técnica AR e a FFT enfatizar a melhor resolução espectral do método AR como uma das suas principais vantagens sobre a FFT, nossa experiência indica que em se tratando de sinais Doppler, a melhor vantagem é a capacidade de estimar o espectro a partir de segmentos curtos do sinal, permitindo acompanhamento de mudanças bruscas no conteúdo espectral do sinal. Em situações onde o espectro do sinal varia rapidamente no tempo o modelo autoregressivo produz

sonogramas mais estáveis que a FFT. Tais situações ocorrem quando o fluxo sanguíneo é perturbado (sinal pouco estacionário) devido a ateromas, por exemplo.

Não se está aqui a recomendar o uso clínico do método AR em substituição a estabelecida técnica dos periodogramas, mesmo porque a grande vantagem da técnica AR só se evidenciar na análise de segmentos curtos de sinal (menos que 10 ms) mas acreditamos nas potencialidades do método e na possibilidade de uso clínico do mesmo, principalmente no estudo de carótidas, onde a largura do espectro do sinal Doppler na fase sistólica descendente é usado como indicador de doença arterial obstrutiva (Keagy et al 1982, Kassam et al 1982). Talvez a maior razão de o método AR não ser ainda muito popular para o estudo de sinais Doppler seja o fato que até o final da década de 80 simplesmente não era possível implementar analisadores espectrais baseados na técnica autoregressiva em tempo-real para sinais da faixa de áudio. Com a disponibilidade e barateamento de processadores de sinais digitais acoplados a microcomputadores esperamos ver algumas aplicações clínicas logo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFRJ e ao CNPq pelo apoio financeiro a Tim Hartshorne pela coleta dos sinais e a Mike J. Smith pelas inúmeras e proveitosas discussões.

REFERÊNCIAS

- AKAIKE, H. (1969), "Fitting Autoregressive Models for Prediction", Annals of the Institute of Statistics and Mathematics, vol.21, 243-247.
- ARTS, M.G.J. and ROEVROS, J.M.J.G. (1972), "On the Instantaneous Measurement of Blood Flow by Ultrasonic Means", Medical & Biological Engineering, vol.10, 23-34.
- BINGHAM, C., GODFREY, M.D. and TUKEY, J.W (1967), "Modern Techniques of Power Spectrum Estimation", IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, vol.AU-15, N.2, 56-66.
- BRIGHAM, E.O. (1974), The Fast Fourier Transform, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- BRUM, O.F., (1986), Doppler ultra-som - Princípios Básicos e Aplicações Clínicas. Livro Médico Editora, Rio de Janeiro.
- BURG, J.P. (1975), Maximum entropy spectral analysis, Ph.D. thesis, Stanford University.
- EVANS, D.H., MCDICKEN, W.N., SKIDMORE, R. and WOODCOCK, J.P. (1989), Doppler Ultrasound - Physics, Instrumentation, and Clinical Applications. John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
- GOLD, B. and RADER, C.M. (1969), Digital Processing of Signals, McGraw-Hill, New York.
- HARRIS, F.J. (1978), "On the use of windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform", Proceedings of the IEEE, vol.66, N.1, 51-83.
- JOHNSTON, K.W., MARUZZO, B.C. and COBBOLD, R.S.C. (1977), "Errors and Artifacts of

- Doppler Flowmeters and Their Solution", *Archives of Surgery*, vol.112, 1335-1342.
- KALUZYNSKI, K. (1987), "Analysis of application possibilities of autoregressive modelling to Doppler blood flow signal spectral analysis", *Medical & Biological Engineering & Computing*, 25, 373-376.
- KASSAM, M.S., COBBOLD, R.S.C., JOHNSTON, K.W. AND GRAHAM, C.M. (1982), "Method for estimating the Doppler mean velocity waveform", *Ultrasound in Medical & Biological*, vol.8, N.5, 537-544.
- KAY, S.M. and MARPLE Jr., S.L. (1981), "Spectrum analysis - a modern perspective", *Proceedings of the IEEE*, vol.69, N.11, 1380-1419.
- KEAGY, B.A., PHARR, W.F., THOMAS, D. AND BOWES, D.E. (1982), "A quantitative method for the evaluation of spectral analysis patterns in carotid artery stenosis", *Ultrasound in Medicine & Biology*, vol.8, N.6, 625-630.
- KITNEY, R.I., TALHAMI, H. and GIDDENS, D.P. (1986), "The Analysis of Blood Velocity Measurements by Autoregressive Modeling", *Journal of Theoretical Biology*, vol.120, 419-442.
- MARPLE, L. (1977), "Resolution of conventional Fourier, autoregressive, and ARMA methods of spectrum analysis", *Proceedings of the IEEE international conference on ASSP*, Hartford, Connecticut, 74-77.
- PARZEN, E. (1975), "Multiple time series: Determining the order of approximating autoregressive schemes", Technical report N.23, Statistical Science Division, State University of New York, at Buffalo.
- SAKAI, H. (1979), "Statistical Properties of AR Spectral Analysis", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol.ASSP-27, N.4, 402-409.
- SCHLINDWEIN, F.S. and EVANS, D.H. (1987), "Análise Espectral de Sinais Doppler e Geração de Sonogramas em Tempo-Real Utilizando Processador de Sinais Digitais e Micro-computador", *Revista Brasileira de Engenharia. Cadernos de Engenharia Biomédica*, vol.4, N.2, 25-47.
- SCHLINDWEIN, F.S. and EVANS, D.H. (1989), "A real-time auto-regressive spectrum analyzer for Doppler ultrasound signals", *Ultrasound in Medicine & Biology*, vol.15, N.3, 263-272.
- SCHLINDWEIN, F.S. and EVANS, D.H. (1990), "Selection of the order of autoregressive models for spectrum analysis of Doppler ultrasound signals", *Ultrasound in Medicine & Biology*, vol.16, N.1, 81-91.
- SCHUSTER, A. (1898), "On the Investigation of Hidden Periodicities with Application to a Supposed 26 Day Period of Meteorological Phenomena", *Terr. Mag.*, vol.3, 13-41.
- WELCH, P.D. (1967), "The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging over Short, Modified Periodograms", *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol.AU-15, N.2, 70-73.

SPECTRAL ANALYSIS OF DOPPLER SIGNALS USING THE AUTOREGRESSIVE MODELING TECHNIQUE: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES

ABSTRACT -- The Doppler technique for the assessment of arterial blood flow is based on a linear relationship between the Doppler shift in frequency of an ultrasonic wave, when it is scattered by a moving target (erythrocytes), and the velocity of the target. Under ideal conditions, the spectrum of the Doppler shift signal has the same shape as a histogram of the velocity distribution of the blood within the Doppler sample volume. The estimation of the power spectral density of Doppler signals is normally performed by applying a fast Fourier transform (FFT) directly to the sampled signal and squaring the magnitudes of the transform values. The signal is processed in individual frames of N samples (usually 256), and each frame is usually weighted, using one of the many window functions known to minimize spectral leakage, before the FFT is calculated. The FFT-periodogram is computationally a very efficient method, but it has some shortcomings, especially for the analysis of relatively short data records (128 or 64 samples). The autoregressive technique for power spectral density estimation has been found to have some advantages when compared to the FFT, and to produce better results when analysing short segments of data, and it is a promising alternative for real-time spectral analysis of Doppler signals, especially for the analysis of nonstationary signals. The characteristics of AR modelling technique for spectral analysis are compared to those of the traditional FFT-periodogram method and the advantages, and disadvantages of using the autoregressive model for the study of Doppler signals are discussed.

key words: autoregressive model, spectral analysis, Doppler signals, real-time signal processing.