

Título: Um modelo para a simulação de sinais Doppler ultra-sónicos provenientes de fluxo sanguíneo pulsátil

Title: *A model for the simulation of Doppler ultrasound signals from pulsatile blood flow*

Autor/Author: Carlos Alberto da Costa Bastos

Orientador/Advisor: Peter J. Fish e Francisco Vaz

Data Apresentação/Acceptance Date: 17/12/1999

Palavras Chave: Fluxo sanguíneo, Sinal Doppler, Ultra-sons, Volume de amostragem, Alargamento espectral, Aceleração sanguínea

Key Words: *Blood Flow, Doppler signal, Ultrasound, Sample volume, Spectral Broadening, Blood acceleration*

Doutoramento/Ph.D.

Resumo

O detector ultra-sónico de fluxo sanguíneo usa o efeito Doppler para estimar de forma não invasiva a velocidade do sangue na circulação. Tem sido bastante usado nas últimas quatro décadas para detectar a presença de estenoses.

O desenvolvimento de novas técnicas de processamento do sinal Doppler necessita de sinais de teste cujas características sejam conhecidas ou possam ser medidas com precisão. Isto é difícil de obter com sinais Doppler medidos *in vivo* devido à elevada variação do fluxo sanguíneo de pessoa para pessoa e também com o estado fisiológico da pessoa no momento da medida, por exemplo a tensão arterial influencia significativamente o fluxo sanguíneo. Um modelo para gerar sinais Doppler simulados cujas características sejam controláveis e/ou mensuráveis é uma ferramenta bastante útil, pois permite que as novas técnicas de processamento do sinal Doppler sejam testadas em condições controladas. Permite, também, estudar o efeito de vários factores que afectam o espectro do sinal Doppler. Habitualmente o efeito individual dos vários factores não pode ser identificado quando são usados sinais medidos *in vivo*.

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo para gerar sinais Doppler ultra-sónicos simulados. O modelo contém dois sub-modelos, um para o fluxo sanguíneo nos membros inferiores de um ser humano e outro para gerar os sinais simulados a partir do campo de velocidades do sangue e das características do instrumento.

O fluxo sanguíneo nos membros inferiores foi simulado com um análogo eléctrico para a rede vascular dos membros inferiores. Cada artéria foi simulada por uma linha de transmissão com perdas e as redes vasculares periféricas por um circuito *Windkessel* com três elementos. O circuito eléctrico foi implementado com o simulador de circuitos SPICE.

Para simular a interacção entre os glóbulos vermelhos e o campo de ultra-sons o vaso sanguíneo foi dividido em pequenos volumes elementares. As contribuições dos volumes elementares foram todas somadas para gerar o sinal Doppler simulado. O modelo fez algumas aproximações como sejam, por exemplo, considerar o fluxo sanguíneo laminar e sem rotação.

As características dos sinais gerados pelo modelo são bastante parecidas com as esperadas para o sinal Doppler real. O modelo desenvolvido foi usado para estudar a influência que a aceleração sanguínea, o tamanho do volume de amostragem e a duração da janela de amostragem têm na largura de banda eficaz do espectro do sinal Doppler. Foi deduzida uma fórmula que estima a largura de banda eficaz a partir das contribuições individuais do alargamento espectral devido à não estacionaridade, do alargamento espectral intrínseco, do alargamento espectral devido à duração da janela de amostragem e ainda da gama das velocidades que passam pelo volume de amostragem.

Foram, ainda, deduzidas expressões em forma fechada para o espectro de potência do sinal Doppler devido unicamente à gama de velocidades que atravessam um volume de amostragem com forma Gaussiana colocado num perfil de velocidades com forma exponencial. Foram, também, obtidas expressões para a largura de banda eficaz no caso especial do volume de amostragem Gaussiano ter simetria esférica e estar colocado no centro do vaso sanguíneo.

Abstract

The Doppler ultrasonic blood flow detector estimates non-invasively the velocity of blood in the circulatory system. It has been extensively used in the last four decades for the detection of stenoses in the circulation.

The development of new signal processing techniques for the Doppler signal requires test signals with known or measurable characteristics. This is very difficult to achieve with Doppler signals obtained *in vivo* because of the variability of blood flow between persons and with physiological state, for example blood pressure. A model for generating simulated Doppler signals whose characteristics are controllable and/or measurable is a useful tool because it permits the test of new processing techniques under controlled conditions. It permits also the study of the effect of various factors on the Doppler spectrum. Usually these effects cannot be isolated with *in vivo* measurements.

During this work a model for the generation of simulated Doppler ultrasound signals was developed. It comprised two sub-models one for blood flow in the human lower limb and the other for generating simulated signals from the blood velocity field and the instrument's characteristics.

Blood flow in the lower limb was modelled by an electric analogue for the lower limb vascular tree. Each artery was modelled by a lossy transmission line and the peripheral vascular beds by three-element *Windkessel* models. The electric analogue circuit was implemented with the SPICE circuit simulator.

To simulate the inter-action of the blood cells with the ultrasonic field the vessel was divided into small elemental volumes whose contributions were added together to generate the simulated Doppler signal. The model

assumed irrotational laminar flow and some other simplifying approximations.

The characteristics of the signals generated by the model were similar to those expected for the Doppler signal. The model was used to study the influence of blood acceleration, sample volume size and data segment duration on the root mean square (rms) width of the Doppler spectrum. A simple formula was derived for estimating the Doppler rms spectral width from the individual contribution of non-stationarity broadening, intrinsic broadening, window broadening and the range of blood velocities passing through the sample volume.

In addition closed form expressions were derived for the Doppler power spectrum due solely to the range of blood velocities passing through a Gaussian sample volumes placed in irrotational laminar flow with a velocity profile obeying a simple power law. Closed form expressions were also obtained for the root mean square spectral width in the special case of a spherically symmetric Gaussian sample volume placed in the centre of the vessel.