

# PROCESSADORES DE SINAIS DIGITAIS - DESCRIÇÃO DE UM LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS EQUIPADO COM DSPs PARA APLICAÇÕES EM ENGENHARIA BIOMÉDICA

por

Fernando S. Schlindwein<sup>1</sup> e David H. Evans<sup>2</sup>

**RESUMO** – As facilidades do laboratório de processamento de sinais da Leicester Royal Infirmary, que vem usando processadores de sinais digitais desde 1986 na análise de sinais de ultra-som Doppler são descritas; as possíveis vantagens de um laboratório de processamento digital de sinais contar com processadores de sinais digitais acoplados a microcomputadores são discutidas; uma "estrutura mínima" para montar um laboratório de processadores de sinais digitais é descrita; e algumas aplicações em Engenharia Biomédica são citadas.

**palavras chave:** processadores de sinais digitais, processamento de sinais em tempo-real.

## INTRODUÇÃO

### Por que usar processadores de sinais?

O processamento digital de sinais da faixa de áudio em tempo-real envolve pelo menos dois tipos de atividades para as quais um microcomputador moderno comum (tipo IBM-PC ou Macintosh, por exemplo) não é bem preparado: a amostragem do sinal (que requer tempo de resposta de rotinas de serviço de interrupção muito rápido ou hardware específico para a amostragem dos sinais) e o próprio processamento (que usualmente requer instruções de multiplicar-acumular muito rápidas). Microcomputadores simplesmente não foram projetados para o tipo de tarefas envolvidas em processamento digital de sinais de áudio em tempo-real.

Mesmo para processamento "off-line" muitas de nossas pesquisas envolvem programas que "rodam" durante horas a fio simplesmente porque o volume de processamento

---

<sup>1</sup>-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).

<sup>2</sup>-Professor de Física Médica, Leicester Royal Infirmary, Department of Medical Physics & Clinical Engineering, Leicester LE1 5WW, UK.

envolve milhares de FFTs (ou convoluções, ou filtros digitais...). Processadores de sinais digitais foram projetados exatamente para os tipos de operações mais comumente usadas em processamento de sinais (ie, multiplicar-acumular rápido, muito rápido), portanto são muito mais adequados para essas operações do que os microprocessadores mais populares presentes nos modernos PCs (80x86 e 680x0). As principais diferenças entre um DSP e um C são que os DSPs têm "buses" de dados e de endereços separados que acessam duas memórias fisicamente distintas, dotando o processador de um certo paralelismo, e a presença de um (ou dois) multiplicador implementado em hardware, capaz de multiplicar-acumular em um ciclo de máquina, ao invés de multiplicar através de instrução micro-codificada e somar depois.

Um tipo de operação dos mais comuns em processamento digital de sinais é a implementação de somatórios do tipo:

$$\sum_{i=0}^N A_i x_{k-i}$$

que aparecem em FFTs, em convoluções, correlações e filtros digitais. Uma comparação entre as velocidades de execução de uma das multiplicações-soma executada pela CPU de um IBM-AT compatível (80286 @ 8MHz) e um DSP standard (TMS320C25) é dada na tabela 1. A tabela 2 mostra os tempos de resposta de uma rotina de serviço de interrupções mínima que simplesmente lê um dado de um conversor A/D, salvando e restaurando o contexto do processador. Uma comparação dos tempos de processamento para uma FFT de 256 complexos é dada na tabela 3, ambos os processadores programados em Assembly, rodando o clássico algoritmo "radix-2" e utilizando coeficientes trigonométricos de uma tabela de valores pré-calculada.

Tabela 1 - Tempos de execução de uma multiplicação-soma

<u>8 MHz IBM-AT (CPU 80286)</u>		<u>40 MHz TMS320C25</u>	
multiplicação ...	43 clocks (5.375 μs)	4 clocks	(100 ns)
soma .....	10 clocks (1.250 μs)		
total .....	6.625 μs	100 ns	

**O DSP é 66 vezes mais rápido.**

**Tabela 2 - Tempos de execução de uma amostragem por interrupção (clocks e  $\mu$ s)**

8 MHz IBM-AT (CPU 80286)	40 MHz TMS320C25
latência ..... 47 clocks	8 clocks
salvamento e restauração de contexto ..... 269 clocks	64 clocks
total ..... 33.625 $\mu$ s	1.8 $\mu$ s
O DSP é 19 vezes mais rápido.	

O DSP é 19 vezes mais rápido.

**Tabela 3. Tempos de execução de uma FFT de 256 pontos complexos com aritmética inteira, ambos os processadores programados em Assembly.**

8 MHz IBM-AT (CPU 80286)	40 MHz TMS320C25
160 ms (Avila, Cavalcanti e Nadal, 1988)	2.26 ms (Papamichalis and So, 1986)
O DSP é aprox. 70 vezes mais rápido.	

Considerando-se os tempos dados nas tabelas acima, é evidente que DSPs são mais adequados que microcomputadores padrão para processamento de sinais. Por outro lado, computadores pessoais são excelentes bases de desenvolvimento de software (assemblers, compilers, cross-compilers e linkers são disponíveis) e para armazenagem e saída de resultados (interfaces p/ teclado, tela gráfica, diskettes, discos rígidos, impressora, plotter).

Um sistema combinando as qualidades de versatilidade e baixo custo de um PC e o grande desempenho em tarefas de processamento digital dos DSPs é muito bem adequado para servir como estação de trabalho para o desenvolvimento e o ensino de técnicas de processamento digital de sinais, em particular para processamento em tempo-real. O custo básico de dotar um laboratório de processamento digital de sinais já existente das facilidades para utilizar DSPs é mínimo - uma placa de desenvolvimento com software custa em torno de US\$ 3600, o que é aproximadamente o preço de um PC, sendo que o sistema resultante dessa combinação de PC + DSP executa algumas tarefas de processamento de sinais até 70 vezes

mais rápido que um PC sozinho. O Laboratório de Física Médica da Leicester Royal Infirmary possui tais facilidades, e é com base na experiência de trabalho desde 1986 em tal laboratório que descrevemos uma "estrutura mínima" para montar um laboratório de processadores de sinais digitais.

## **ESTAÇÃO DE TRABALHO COM DSP**

A estação de trabalho básica que usamos na LRI consta apenas de um PC equipado com uma placa de DSP para desenvolvimento. A placa é "plug-in" para IBM-PC/IBM-PC-AT compatíveis. Em termos de software, o DSP é programado em Assembly e o PC em Assembly (para aplicações em tempo-real) e Fortran-77.

### **Placas de DSP para desenvolvimento**

Uma placa de desenvolvimento que conhecemos bem é a da LSI. Baseada no TMS320C25 (um DSP de palavra inteira da Texas Instruments) com clock de 40 MHz, a placa executa 10 MIPS (milhões de instruções por segundo). A placa standard tem 8 kwords de memória de programa e 8 kwords de memória de dados, ambas expandíveis até 64 kwords na placa, conversores A/D e D/A de 16 bits e lógica de controle para conversão A/D com temporizador programável (taxa de conversão até 58 kHz).

## **PROPOSTA PARA EQUIPAR UM LABORATÓRIO DE DSPS:**

A Texas Instruments mantém centros de treinamento na Inglaterra que ministram cursos sobre DSPs cobrando £1200 por quatro dias de aulas. Alguns centros de ensino e pesquisa no Brasil possuem laboratórios de processamento de sinais digitais bastante bem equipados em termos de infra-estrutura. Para aqueles centros que desejam expandir sua atuação e ter experiência com DSPs, propomos uma trajetória efetiva e barata: a instalação de estações de trabalho baseadas em um PC e uma placa de desenvolvimento de DSP. Numa fase inicial, DSPs de aritmética inteira são adequados: em muitos casos ponto-flutuante não é essencial (Welch 1969, Schindwein 1989). Processadores de ponto-flutuante ainda são mais caros (comparar os £24.00 por um TMS320C25 de aritmética inteira, aos £375 por um TMS320C30 ou os £150 por um WE DSP32C, da AT&T, os dois de ponto-flutuante), mas o preço vem baixando.

Listamos, em seguida os itens de hardware e software básicos para o laboratório iniciar seu funcionamento (assinalados com \* abaixo) seguidos dos elementos de apoio e expansão de atividades (assinalados com ). Alguns dos itens listados já existem em bons laboratórios de processamento de sinais, é claro. Os preços listados em dólares são estimativas aproximadas, mas os valores em libras esterlinas são exatos (obtidos de firmas locais na Inglaterra):

- \* IBM-PC/AT compatíveis com tela VGA (US\$ 4500);
- \* placas de desenvolvimento c/ DSP de aritmética inteira (£ 1995 Û US\$ 3600 por placa com TMS320C25 ou similar incluindo software básico, ie, monitor, loader e assembler);
- \* assembler p/PC (US\$ 100, MS MASM, Borland TASM, ou similar);
- \* assembler p/DSP (incluído no preço da placa de desenvolvimento dado acima, £ 160 Û US\$ 280 caso comprado em separado);
- \* compilador(es) para PC (US\$ 400 cada, C & Fortran);
- \* impressora gráfica de qualidade (US\$ 2300, HP laser jet série III ou similar), e compilador(es) para DSP (£ 675 Û US\$ 1200, Compilador C);
  - filtro analógicos "anti-aliasing", (programáveis pelo PC (projetados e montados "sob-medida", de acordo com o tipo de sinais a serem estudados, US\$ 100 p/ custo dos componentes);
  - tela gráfica de alta resolução (1024 x 768 x 256) e máquina fotográfica (US\$ 2000 para tela gráfica - interface e monitor "multi-sync" e US\$ 400 para câmara;
  - placas de desenvolvimento com DSP de ponto flutuante (£ 3995 Û US\$ 6900 p/ TMS320C30 ou £ 2395 Û US\$ 4150 p/ DSP32C, incluindo software básico com assembler/linker e interface p/aplicações);
  - pacote de software p/ filtros digitais £ 599 Û US\$ 1050;
  - plotter (US\$ 1500, HP7475 ou similar).

## **APLICAÇÕES EM ENGENHARIA BIOMÉDICA E PERSPECTIVAS**

Um laboratório de EB equipado com estações de trabalho conforme as descritas acima pode desenvolver pesquisa em: processamento de sinais Doppler em tempo-real (Schlindwein e Evans 1987, 1989, Murphy et al 1988), processamento da fala em tempo-real (Atal e Hanauer, 1971, Schafer e Rabiner 1975), monitoração de pacientes, monitoração fetal, controle de próteses, processamento de imagens médicas, além de acelerar procedimentos tais como mapeamento de campo acústico de transdutores, e aplicações genéricas tais como transformadas de Fourier, transformadas de Hilbert, filtragem digital, filtragem adaptativa (Skagen, 1988, Talhami e Kitney, 1988), convolução, correlação e identificação de padrões, para citar algumas aplicações (Texas Instruments, 1986).

Acreditamos que os processadores de sinais digitais vieram para ficar, e que há um nicho de mercado para microcomputadores como o Next, que incorpora um DSP na sua arquitetura, como standard, para processamento de sinais de áudio em tempo-real.

## **AGRADECIMENTOS**

FSS agradece a UFRJ e ao CNPq pelo apoio financeiro e os autores agradecem a Mike J. Smith pelo desenvolvimento da FFT em Assembly para o PC.

## REFERÊNCIAS

- ATAL, B.S., and HANAUER, S.L. (1971), "Speech analysis and synthesis by linear prediction of the speech wave", *The Journal of the Acoustical Society of America*, volume 50, number 2, pages 637-655.
- AVILA, A.S.R., CAVALCANTI, S.C., e NADAL, J. (1988), "Sistema experimental de eletroencefalografia com análise espectral e mapeamento da atividade cortical baseado em microcomputador", *Revista Brasileira de Engenharia, Caderno de Engenharia Biomédica*, volume 5, número 1, páginas 91-103.
- MURPHY, C., COATS, A., CONWAY, J. COLDITZ, P., and ROLFE, P. (1988), "Doppler ultrasound signal analysis based on the TMS320 signal processor", *Journal of Biomedical Engineering* volume 10, number 4, pages 127-129.
- PAPAMICHALIS, P., and SO, J. (1986), "Implementation of fast Fourier transform algorithms with the TMS32020", In *Digital signal processing applications with the TMS320 family. Theory, algorithms and implementations*, Texas Instruments. chapter 4, pages 69-168.
- SCHAFFER, R.W., and RABINER, L.R. (1975), "Digital representations of speech signals", *Proceedings of the IEEE*, volume 63, number 4, pages 662-677.
- SCHLINDWEIN, F.S., e 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*. volume 4, número 2, páginas 25-47.
- SCHLINDWEIN, F.S., e EVANS, D.H. (1989), "A real-time auto-regressive spectrum analyzer for Doppler ultrasound signals", *Ultrasound in Medicine & Biology*, volume 15, number 3, pages 263-272.
- SKAGEN, D.W. (1988), "Estimation of running frequency spectra using a Kalman filter algorithm", *Journal of Biomedical Engineering*, volume 10, number 5, pages 275-279.
- TALHAMI, H.E., and KITNEY, R.I. (1988), "Maximum likelihood frequency tracking of the audio pulsed Doppler ultrasound signal using a Kalman filter", *Ultrasound in Medicine & Biol.*, volume 14, number 7, pages 599-609.
- TEXAS INSTRUMENTS (1986), *Digital signal processing applications with the TMS320 family. Theory, algorithms and implementations*.
- WELCH, P.D. (1969), "A fixed-point fast Fourier transform error analysis", *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, volume AU-17, number 2, pages 151-157.

**DIGITAL SIGNAL PROCESSORS - DESCRIPTION OF A DIGITAL SIGNAL PROCESSING  
LABORATORY EQUIPPED WITH DSPS FOR APPLICATIONS IN BIOMEDICAL  
ENGINEERING**

**ABSTRACT** – The facilities of the digital signal processing laboratory at the Leicester Royal Infirmary, which has been using digital signal processors (DSPs) since 1986 for the analysis of Doppler signals in real-time, are described. The possible advantages of a digital signal processing laboratory using DSPs in conjunction with microcomputers are discussed. A "minimum structure" for starting a DSPs laboratory is described, and some applications in Biomedical Engineering are suggested.

key words: digital signal processors, real-time digital signal processing.