

Processamento de Imagens Médicas

Ultrassom: Princípios Físicos

Prof. Sérgio S Furuie

PTC/LEB - S.Furuie 1

Processamento de Imagens Médicas

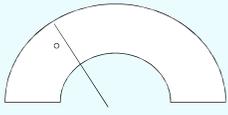
O que sabemos sobre ultrassom?

- Tipo de energia?
- Tipo de interação com o corpo humano?
- Ionizante?
- Invasivo?
- Projeção? Ou Tomográfico?
- Vantagens/Desvantagens/Limitações?
- Alguma semelhança com radar?

PTC/LEB - S.Furuie 2

Processamento de Imagens Médicas

Radar em aeroportos, sonar em submarinos..



presença de objetos e morfologia

PTC/LEB - S.Furuie 3

Processamento de Imagens Médicas

Radar no trânsito

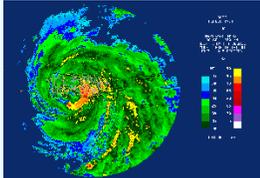



velocidade, movimento => como?

PTC/LEB - S.Furuie 4

Processamento de Imagens Médicas

Radar meteorológico

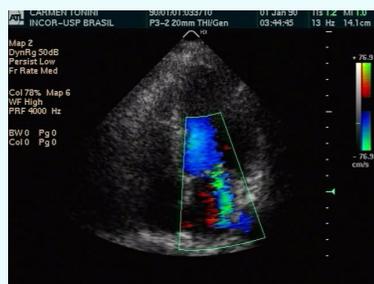


- É tomográfico?
- morfologia e velocidade

PTC/LEB - S.Furuie 5

Processamento de Imagens Médicas

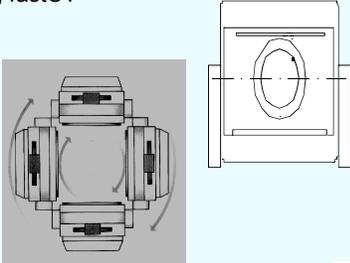
Corte tomográfico por reflexão



PTC/LEB - S.Furuie 6

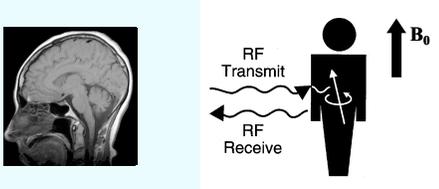
Ultra-som versus CT

- Reconstrução tomográfica a partir das projeções
 - CT, Spiral CT, fastCT
 - SPECT
 - PET



PTC/LEB - S.Furule 7

Ultrassom versus RM



PTC/LEB - S.Furule

Intensidade do elemento da imagem

- Densidade de prótons
- Magnetização Longitudinal - T1
- Magnetização Transversal - T2
- Fluxo

Ultrassom: abordagem

- Como funciona?
 - Princípios físicos
 - Sensores/transdutores
- Limitações técnicas
- Vantagens/desvantagens
- Aplicações clínicas

PTC/LEB - S.Furule 9

Som

- **Som** = ondas mecânicas longitudinais de compressão e rarefação do meio, com frequências entre 20 Hz e 20 kHz, capazes de sensibilizar o sistema auditivo humano.
 - Humanos - 20 Hz ~ 20 kHz
 - Cães - 15 Hz ~ 50 kHz
 - Golfinhos - 150 Hz ~ 150 kHz
 - Morcegos - 1 kHz ~ 120 kHz
- **Infra-som** = ondas mecânicas com frequências abaixo de 20 Hz.
- **Ultra-som** = ondas mecânicas com frequências acima de 20 kHz.

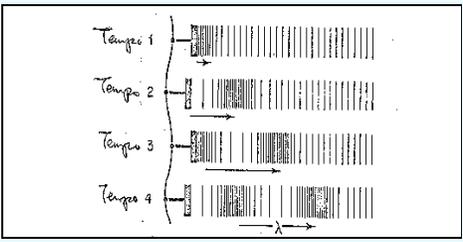
PTC/LEB - S.Furule 10

Princípio físico: energia acústica

- Reflexão
- Refração/transmissão
- $v = \lambda \cdot f$ (velocidade=comprimento x freq.)
- $v \approx 1500$ m/s (média no corpo) [5.400 km/h]
- Percorre 50 cm (ida e volta) em 0.6 ms
- Se varrer 100 linhas => 60 ms => 20 imagens/s

PTC/LEB - S.Furule 11

Ondas de compressão e rarefação formando ondas sonoras



PTC/LEB - S.Furule 12

Processamento de Imagens Médicas

Onda sonora e curvas de variação do deslocamento e da pressão

(a) (b) (c)

PTC/LEB - S.Furule 13

Processamento de Imagens Médicas

Equações de onda

$$y(x,t) = A \text{ sen } [2\pi (x/\lambda - t/T)] = A \text{ sen } (kx - \omega t)$$

$$P(x,t) = P_0 \text{ sen } [2\pi (x/\lambda - t/T)] = P_0 \text{ sen } (kx - \omega t)$$

onde :

- $k = 2\pi/\lambda =$ número de onda
- $\omega = 2\pi/T = 2\pi f =$ frequência angular
- $A =$ amplitude de deslocamento
- $P_0 =$ amplitude de pressão = $\rho v \omega A$

PTC/LEB - S.Furule 14

Processamento de Imagens Médicas

Parâmetros: caracterizam a onda

λ = comprimento de onda
distância entre dois máximos ou mínimos consecutivos de amplitude de oscilação;

T = período
intervalo de tempo necessário para uma onda percorrer uma distância igual a um comprimento de onda;

f = frequência
número de vezes que a onda se repete por unidade de tempo e depende somente da fonte sonora = $1/T$.

$v = f \lambda$

v = velocidade de propagação:
função das características do meio através do qual o som se propaga, portanto, independe da frequência da onda.

PTC/LEB - S.Furule 15

Processamento de Imagens Médicas

Princípios físicos

- Energia sonora:
 - Parte prossegue => penetra na matéria
 - Parte retorna (refletida) => detectada pelo sensor
 - Parte é convertida em calor, ...
- Impedância acústica

$v = \lambda \cdot f$ (velocidade=comprimento x freq.)

$Z = \rho \cdot v$ (Impedância=densidade x veloc.)

PTC/LEB - S.Furule 16

Processamento de Imagens Médicas

Mergulhando em impedância diferente

H₂O

PTC/LEB - S.Furule 17

Processamento de Imagens Médicas

Mergulhando em alta impedância

Hg

PTC/LEB - S.Furule 18

Reflexão, refração

Figura 5 - Reflexão e refração (ou transmissão) de ondas na interface entre os meio 1 e 2

Eq. Fresnel
R+T=1

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \right)^2$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \left(\frac{4Z_1 Z_2 \cos^2 \theta_i}{(Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t)^2} \right)$$

Lei de Snell
 $\frac{\sin \theta_i}{v_1} = \frac{\sin \theta_t}{v_2}$

PTC/LEB - S.Furule 19

Incidência normal

Impedância acústica (.001g/m²/s) a 1 MHz:

- ar => 0,0004
- água => 1,54
- sangue => 1,61
- fígado => 1,65
- osso => 6,00
- rim => 1,62
- gordura => 1,38

$$\theta_i = \theta_t = 0^\circ$$

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

$$T = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

PTC/LEB - S.Furule 20

Energia refletida e transmitida

- Ar => água
R=0,9989
T=0,001
- Água => osso
R=0,35
T=0,65

PTC/LEB - S.Furule 21

Princípios físicos: energia desperdiçada

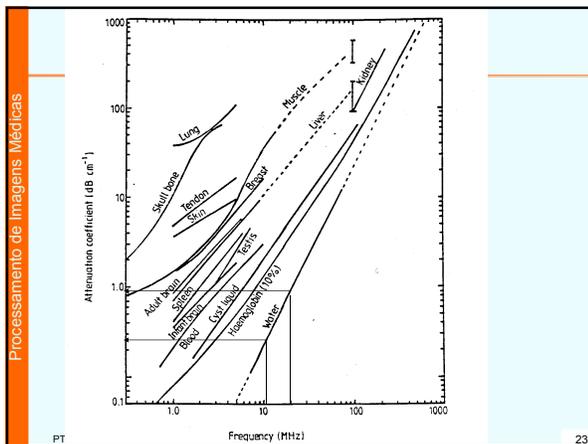
Atenuação:

- absorção (calor)
- espalhamento

frequência ↑ => μ ↑

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

PTC/LEB - S.Furule 22



Aumento de 2 x em frequência ?

- No caso da água, a atenuação aumentou 3 x

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

PTC/LEB - S.Furule 24

Transdutor: Efeito piezoelétrico

Piezeletricidade:
Tensão alternada produz oscilações nas dimensões do cristal, devido ao re-alinhamento das moléculas polarizadas

PTC/LEB - S.Furúie 25

Transdutor: geração e recepção

PTC/LEB - S.Furúie 26

Eco acústico: impedância

$2d=c.t$

Atenuação:

- absorção (calor)
- espalhamento

$\mu \sim \alpha$ frequência

O que está incorreto no $v(t)$?

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

PTC/LEB - S.Furúie 27

Princípios físicos: consolidação

- efeito piezo-elétrico: mecânica \Leftrightarrow elétr.
- espalhamento dentro das estruturas
- resolução espacial $\sim 1 \lambda = 1.5 \text{ mm}$ (@1MHz)
- $v = \sim 1500 \text{ m/s}$ (média no corpo)
- 20 - 50MHz p/ intra-arterial
- 100-200MHz p/ microscopia celular
- $v = \lambda \cdot f$
- $Z = \rho \cdot v$ (ρ :densidade)

PTC/LEB - S.Furúie 28

Formando imagens

PTC/LEB - S.Furúie 29

modo A (Amplitude)

$2d=c.t$

Atenuação:

- absorção (calor)
- espalhamento

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

PTC/LEB - S.Furúie 30

Modo B (Brilho)

- modo A em tons de cinza com varredura

PTC/LEB - S.Furule 31

Modo B: diagrama funcional

- controle automático ganho (tempo)
- baixo ruído eletrôn.
- faixa dinâmica elevada
- janela de tempo (profund)
- conversão A/D: 20MHz
- 512 x 512 x 8bits
- 512 x 512 x 24bits (Doppler)
- posição de leitura
- imagem média, simples ou de máximos

PTC/LEB - S.Furule 32

Modo M (Movimento)

– modo A dinâmico em tons de cinza

PTC/LEB - S.Furule 33

Efeito Doppler

Fluxo e velocidade $\Delta f = 2 \frac{f_0}{c} \cdot \cos(\alpha) \cdot v$

PTC/LEB - S.Furule 34

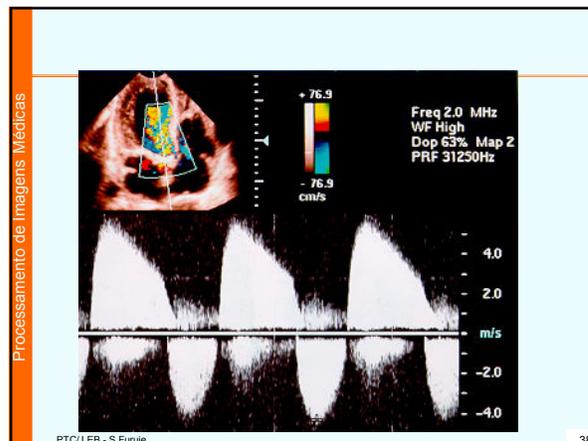
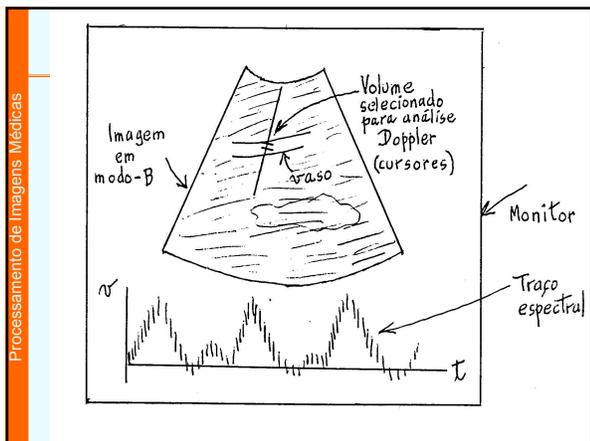
Velocidade absoluta ?

- Como obter o ângulo de incidência ?

PTC/LEB - S.Furule 35

Modo duplex

PTC/LEB - S.Furule 36



Processamento de Imagens Médicas

Ultra-som: degradação

$T(t) \rightarrow \text{[Box]} \rightarrow S(t)$

- Caract. do transdutor $B(t)$
- Atenuação no caminho $A(t)$
- Espalhamento $E(t)$
- Ruído : speckle

$$S(t) = T(t) \otimes B(t) \otimes A(t) \otimes E(t)$$

$$\frac{S(f)}{T(f)} = B(f) \cdot A(f) \cdot E(f)$$

PTC/LEB - S.Furule 39

Processamento de Imagens Médicas

Ruído speckle

- Ruído devido a interferência de ondas (efeito de superposição de ondas, efeito destrutivo)
- Ruído correlacionado com o sinal, aproximadamente multiplicativo
- Aproximadamente distribuição de Rayleigh (partículas da mesma ordem que o comprimento de onda)

$$g(x) \approx f(x) + \sqrt{f(x)} \cdot N(0,1)$$

se homogêneo, $f(x) = cte$

$$E[g] = f$$

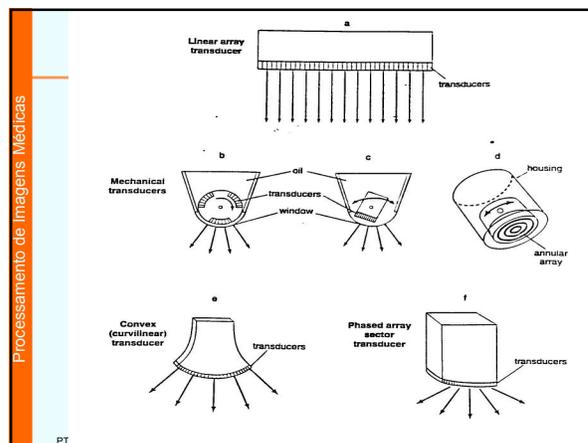
$$\text{var}[g] = f$$

PTC/LEB - S.Furule

Processamento de Imagens Médicas

Transdutores: mais detalhes

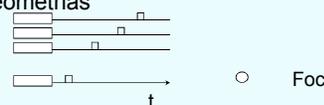
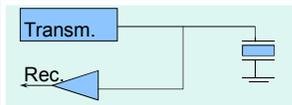
PTC/LEB - S.Furule 41



Processamento de Imagens Médicas

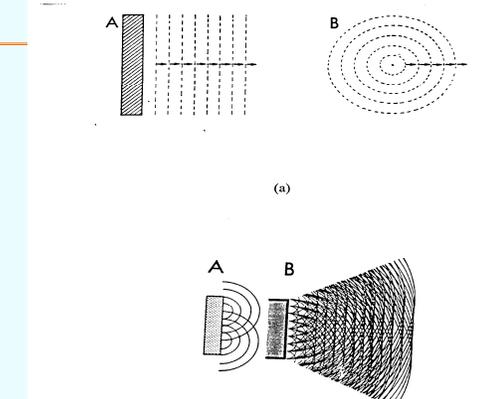
Ultra-som: transdutores

- phased-arrays
 - focar (guiar) região
 - diferentes geometrias

PTC/LEB - S.Furule 43

Processamento de Imagens Médicas



PT

Processamento de Imagens Médicas

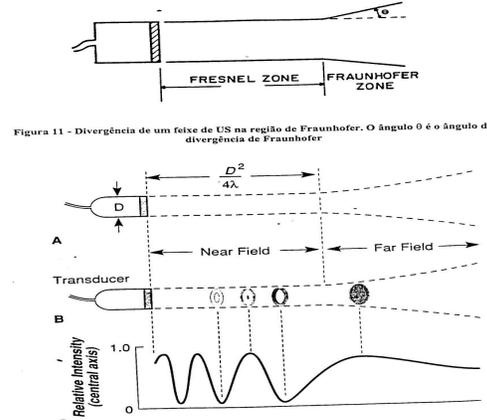


Figura 11 - Divergência de um feixe de US na região de Fraunhofer. O ângulo θ é o ângulo de divergência de Fraunhofer

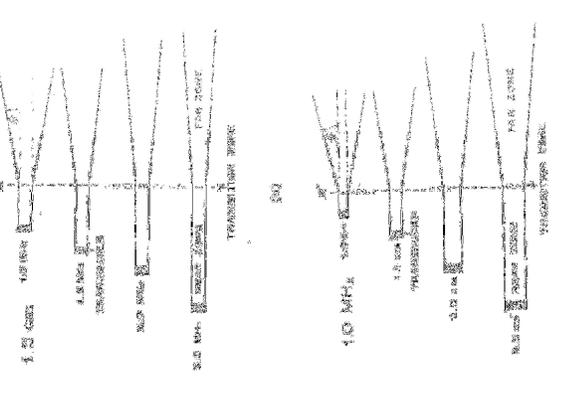
PT

Processamento de Imagens Médicas

zona de Fresnel

- Para que um objeto seja "visível" pelo transdutor, ele precisa estar localizado na zona de Fresnel ou zona próxima.
 - deve-se diminuir a espessura do cristal para aumentar a sua "profundidade de campo", ou, alternativamente,
 - aumentar o diâmetro D do cristal.

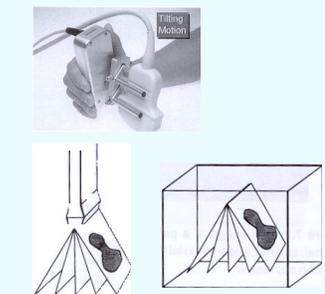
PTC/LEB - S.Furule 46



PTC

Processamento de Imagens Médicas

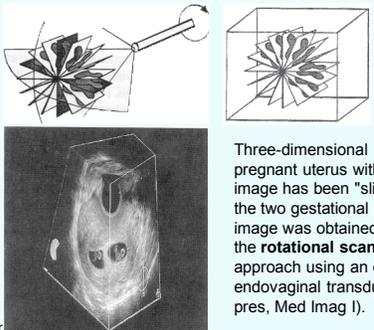
Ultra-som 3D: varr. Mec. tilt



PTC/LEB - S.Furule 48

Processamento de Imagens Médicas

Scan rotacional



Three-dimensional image of a pregnant uterus with twins. The image has been "sliced" to reveal the two gestational sacs. This image was obtained by means of the **rotational scanning** approach using an endfiring endovaginal transducer (SPIE pres, Med Imag I).

PTC 49

Processamento de Imagens Médicas

Ultra-som: aplicações

- Estudo de estruturas dinâmicas em uma determinada posição.
 - válvulas cardíacas no modo M
- Cortes tomográficos 2D
 - cardíaca
 - fetal
 - abdominal, ...

PTC/LEB - S.Furule 50

Processamento de Imagens Médicas

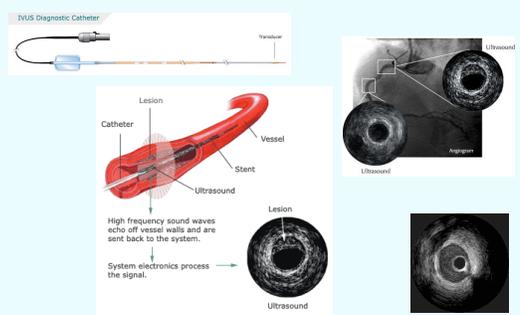
Ultra-som: aplicações

- Mapeamento colorido de fluxo (duplex)
 - codificação do fluxo (doppler) em cores
 - sobreposição em imagens 2D
 - curva temporal do fluxo
- Fluxo turbulento, refluxo, perfil de velocidade
- Contraste p/ US: micro-bolhas
- IVUS - Intra Vascular Ultra Sound
- Ecocardiografia 2D e 3D

PTC/LEB - S.Furule 51

Processamento de Imagens Médicas

IVUS

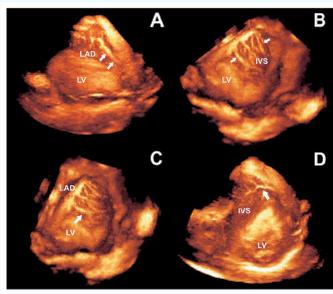


High frequency sound waves echo off vessel walls and are sent back to the system. System electronics process the signal.

PTC/LEB - S.Furule 52

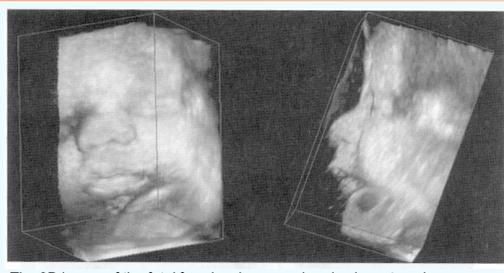
Processamento de Imagens Médicas

Ecocardiografia 3D com microbolhas



PTC/LEB - S.Furule 53

Processamento de Imagens Médicas



The 3D image of the fetal face has been rendered using a translucency-rendering algorithm with the ray-casting approach. In this image, the amniotic fluid has been made transparent, and tissues have been made transparent or opaque depending on the voxel intensity (SPIE Press, Medical Imaging).

PTC/LEB - S.Furule 54

Processamento de Imagens Médicas

Ultra-som: resumindo

- + Custo/benefício muito bom
- + Energia utilizada não é ionizante
- + Exames não são invasivos
- + Inerentemente tomográfico: dinâmica
- + Exames realizados pelos próprios médicos especialistas.
- Ruído do tipo speckle (interferência de ondas)
- Informações não são metabólicas, ou fisiológicas

PTC/LEB - S. Furlão 55

Processamento de Imagens Médicas

Comparação de modalidades?

- Ultrassom:
 - energia mecânica, reflexão, contraste de impedâncias acústicas, tomográfica
- Raio-X:
 - Radiação eletromagnética, transmissão, atenuação, ionizante
- Medicina Nuclear:
 - Radiação eletromagnética, emissão, Contagem de fótons, ionizante
- Ressonância Magnética:
 - RF, ressonância, densidade de prótons, tomog

PTC/LEB - S. Furlão 56

Processamento de Imagens Médicas

Outros aspectos

- Anatômico versus funcional:
 - Complementaridade
- Outras modalidades:
 - Termografia
 - Fluorescência
 - Videoscopia
 - Microscopia confocal
 - ...

PTC/LEB - S. Furlão 57