

# UTILIZAÇÃO DA MODULAÇÃO DE FASE PARA MELHORIA DA RESOLUÇÃO LATERAL EM IMAGENS ULTRASSÔNICAS

VITOR L. GARCIA<sup>1</sup>, VANDER T. PRADO<sup>1</sup>, RICARDO T. HIGUTI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio  
Avenida Alberto Carazzai, 1640 - Centro. CEP 86300-000. Cornélio Procópio -PR. BRASIL.  
E-mails: vanderprado@utfpr.edu.br*

<sup>2</sup> *Laboratório de Ultrassom, Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira  
Avenida Brasil Sul, 56 – Centro. CEP 15385-000. Ilha Solteira-SP. BRASIL.  
E-mails: tokio@dee.feis.unesp.br*

**Abstract**— Although the instantaneous phase image improves the reflectors detection when compared to the conventional image, using only the amplitude of the echo signals, it still has limitations with respect to the reflector resolution and low signal-to-noise ratio values. This work proposes the use of the instantaneous phase image considering signals with phase modulation. According to the modulating signal, Pearson's correlation coefficient or phase variance is used to obtain new images. Considering a triangular and a constant modulating signal, the lateral resolution is improved approximately 11 times for a 32-elements array and a single point reflector with signal-to-noise ratio values above -11 dB.

**Keywords**— Ultrasonic image, instantaneous phase, Pearson's correlation coefficient, phase variance, resolution, contrast, signal-to-noise ratio.

**Resumo**— Embora a imagem de fase instantânea melhore a detecção de refletores quando comparada à imagem convencional, utilizando-se somente a amplitude dos sinais de eco, ainda apresenta limitações com relação à resolução dos refletores representados e baixos valores de relação sinal-ruído. Este trabalho propõe a utilização da imagem de fase instantânea considerando-se sinais com modulação de fase. De acordo com o sinal modulador utiliza-se o coeficiente de correlação de Pearson ou a variância da fase para obter novas imagens. Considerando-se um sinal modulador triangular e outro constante, obtêm-se melhoria de aproximadamente 11 vezes na resolução lateral para um *array* de 32 elementos e um refletor pontual com valores de relação sinal-ruído acima de -11 dB.

**Palavras-chave**— Imagem ultrassônica, fase instantânea, coeficiente de correlação de Pearson, variância da fase, resolução, contraste, relação sinal-ruído.

## 1 Introdução

Um *array* de transdutores é um conjunto de elementos dispostos geometricamente de forma linear ou bidimensional, igualmente espaçados ou de forma esparsa, cujo feixe acústico é controlado eletronicamente através de atrasos na excitação de cada transmissor (Drinkwater e Wilcox, 2006).

Com o avanço da tecnologia de sistemas eletrônicos, sobretudo dos *arrays*, e dos estudos sobre processamento digital de sinais, o desenvolvimento e aplicações de técnicas de formação de imagens ultrassônicas permite detectar e classificar imperfeições e defeitos, no caso de ensaios não-destrutivos por ultrassom; ou diagnosticar certas patologias em determinados órgãos do corpo humano, e distinguir o sexo e a saúde de um bebê ainda em estágio embrionário, ambos em aplicações médicas.

A qualidade das imagens é, principalmente, limitada pela resolução lateral, pela relação entre o nível do lóbulo principal e dos lóbulos laterais do feixe acústico e a presença de lóbulos de espaçamento (Camacho, Parrilla e Fritsch, 2009). A resolução lateral é determinada pela largura do lóbulo principal, o qual é inversamente proporcional ao tamanho da abertura (número de elementos e espaçamento entre eles). Os

níveis dos lóbulos laterais podem ser reduzidos com funções de apodização (Prado et al., 2013), em detrimento da resolução lateral. Já os lóbulos de espaçamento, aparecem em casos que a distância entre os elementos do *array* é maior do que meio comprimento de onda, e são responsáveis pelo aparecimento de artefatos na imagem (Lockwood et al., 1996).

Camacho, Parrilla e Fritsch (2009), Martínez-Graullera et al. (2011), Prado et al. (2014) e Prado et al. (2015) utilizaram a fase dos sinais para melhorar a qualidade de imagens ultrassônicas e aumentar a probabilidade de detecção dos refletores. Quando comparadas a imagens convencionais, utilizando-se diretamente a amplitude dos sinais de eco no processo de formação, as imagens obtidas através da fase apresentam menor contraste para os refletores representados. Entretanto, resultam em maior probabilidade de detecção dos refletores mais distantes sem prévio conhecimento das características de atenuação do meio de propagação, reduzindo também a indicação de artefatos como refletores e zona morta na imagem (Prado et al., 2014). Embora apresentem significativas melhorias na qualidade das imagens, a resolução lateral continua inalterada, dependendo fortemente das características físicas do arranjo.

Misaridis e Jensen (2005) utilizaram sinais com

codificação (Veres et al., 2013; Trots, Nowicki e Pos-tema, 2017) e modulação de frequência em aplica-ções médicas, obtendo aumento da relação sinal-ruído (SNR) dos sinais e, conseqüentemente, imagens com maior contraste.

Propõe-se, neste trabalho, a utilização de sinais com modulação de fase para aumentar a robustez do métodos proposto por Prado et al. (2014), melho-rando-se assim alguns dos atributos da imagem. Uti-lizando-se diferentes sinais moduladores da fase, analisa-se a imagem com o coeficiente de correlação de Pearson e a variância da fase. Como resultado ob-têm-se melhoria de aproximadamente 11 vezes na re-solução lateral, considerando-se um *array* de 32 ele-mentos e um refletor pontual para valores de SNR acima de -11 dB.

## 2 Método proposto

### 2.1 Imagem de Fase Instantânea

Considerando-se um *array* linear com  $M$  ele-mentos e o conjunto de sinais temporais de eco de to-dos elementos em transmissão-recepção  $v_{ij}(t)$ , sendo este o sinal emitido pelo elemento  $i$  e recebido pelo elemento  $j$ , a imagem de fase instantânea (IP – *ins-tantaneous phase*) do ponto  $(r_0, \theta_0)$  em coordenadas polares é definida como (Prado et al., 2014):

$$I_{IP}(r_0, \theta_0) = \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \phi_{ij}(\tau_{ij}(r_0, \theta_0)), \quad (1)$$

sendo  $\tau_{ij}(r_0, \theta_0)$  o tempo de propagação entre o trans-missor  $(r_i, \theta_i)$ , o ponto  $(r_0, \theta_0)$  e o receptor  $(r_j, \theta_j)$ , e  $\phi_{ij}(t)$  é a fase instantânea de  $v_{ij}(t)$ , obtida por (Oppe-nheim, Schafer e Buck, 1999):

$$\phi_{ij}(t) = \arctan\left(\frac{\hat{v}_{ij}(t)}{v_{ij}(t)}\right), \quad (2)$$

sendo  $\hat{v}_{ij}(t)$  a transformada de Hilbert de  $v_{ij}(t)$ .

### 2.2 Coeficiente de correlação de Pearson

Como observado por Prado et al. (2014), ao se fazer um corte na imagem, partindo-se do centro do *array* em direção a um refletor, para um valor de  $\theta$  fixo, observa-se o formato do sinal de excitação nos *pixels* referentes à representação do refletor. No caso da imagem IP, observa-se o formato da fase instantâ-nea do sinal de excitação.

Portanto, uma maneira de aumentar a confiabili-dade na representação/detecção de refletores, seja au-mentando a intensidade/contraste dos mesmos, seja diminuindo a presença de artefatos, é adicionar ao sinal de excitação uma informação através da modula-ção de fase.

O sinal transmitido pode ser escrito como:

$$v_i(t) = A(t) \text{sen}(\omega t + m(t)), \quad (3)$$

sendo  $A(t)$  a envoltória do sinal, que depende tanto do sinal de excitação, como da resposta em frequên-cia do transdutor,  $\omega$  a frequência angular, e  $m(t)$  o si-nal modulador, isto é, a informação adicional.

Após aplicar a equação (1) ao conjunto de da-dos e extrair um sinal espacial  $s(r)$  referente a um corte na imagem passando por um refletor, espera-se que o resultado obtido se assemelhe à fase instantâ-nea, dada por  $\omega t + m(t)$ . Subtraindo-se  $\omega t$  chega-se a  $m(t)$ . Caso o sinal espacial seja um conjunto de *pi-xels* que não passa por nenhum refletor, este estará relacionado apenas a ruído e artefatos, não se assimi-lando ao sinal  $m(t)$ .

Portanto, na presença de um refletor, o sinal es-pacial apresenta as mesmas características do sinal modulador. Pode-se aplicar o coeficiente de correla-ção de Pearson entre este sinal e o sinal de referên-cia, que mede o grau de similaridade entre dois si-nais, dado por (Oppenheim, Schafer e Buck, 1999):

$$\rho = \frac{\text{cov}(m(t), s(r))}{\sqrt{\text{var}(m(t)) \cdot \text{var}(s(r))}}, \quad (4)$$

sendo  $\text{cov}(m(t), s(r))$  a covariância entre os dois si-nais e  $\text{var}(m(t))$  e  $\text{var}(s(r))$  a variância de cada um dos sinais.

Para tanto, faz-se necessário utilizar a mesma discretização nos domínios temporal e espacial, seja na formação da imagem ou através de interpolação no pós-processamento. Fazendo-se a imagem utili-zando coordenadas polares, basta que o espaçamento entre os *pixels* na direção do raio ( $dr$ ) seja equivalen-te ao período de amostragem ( $dt$ ), obedecendo a se-guinte igualdade:

$$dr = \frac{c \cdot dt}{2}, \quad (5)$$

sendo  $c$  a velocidade de propagação do som no meio.

Como resultado tem-se um coeficiente com va-lores no intervalo  $[-1, 1]$ . Quanto menor o valor de  $\rho$ , em módulo, menor a similaridade entre os sinais. Quanto maior o valor, maior a similaridade entre eles. O sinal algébrico está relacionado com inversão ou não de fase entre os sinais. Segundo Mukaka (2012), valores de  $\rho$ , em módulo, entre 0 e 0,3 repre-sentam uma correlação desprezível, de 0,3 a 0,5 uma similaridade fraca, de 0,5 a 0,7 moderada, de 0,7 a 0,9 forte e de 0,9 a 1,0 uma correlação muito forte.

Assim, para cada valor de  $\theta$ , aplica-se a equação (4) para cada trecho do sinal  $s(r)$ , de forma a criar uma nova imagem a partir dos coeficientes de corre-lação obtidos.

### 2.3 Variância da fase

Considerando-se  $m(t)$  constante o resultado da equação (4) seria indefinido. Portanto, neste caso, em vez de utilizar a correlação de Pearson, propõe-se

utilizar a variância do sinal de corte, após a extração da fase instantânea e subtração de  $\omega t$  do sinal de  $s(r)$ .

Espera-se que na região em que o refletor é representado a variância seja pequena e onde não há refletores, seja elevada. Deste modo, normaliza-se o resultado, subtraindo-se da unidade:

$$\rho_{var} = 1 - \frac{\text{var}(s(r))}{\max\{|\text{var}(s(r))|\}}. \quad (6)$$

Como resultado, tem-se, também, *pixels* com intensidades entre 0 a 1.

### 3 Resultados

*Point Spread Function* (PSF) é a imagem de um refletor pontual, isto é, como um refletor pontual em determinada região do espaço é representado considerando-se o *array* e o método de formação de imagem (Holmes, Drinkwater e Wilcox, 2005). A vantagem de se fazer a PSF é que o contraste e a resolução, assim como possível existência de artefatos, podem ser analisados a partir da imagem. Entretanto, tem-se a desvantagem de analisar apenas uma determinada região da imagem.

Considerando-se um *array* linear de 32 elementos pontuais espaçados entre si de meio comprimento de onda ( $\lambda/2$ ) em 5MHz na água ( $c = 1,5 \text{ mm}/\mu\text{s}$ ,  $\lambda = 0,3 \text{ mm}$ ) com seu centro localizado na origem do sistema de coordenadas, simulou-se a PSF para um refletor à frente do *array* na posição  $(r, \theta) = (25, \pi/2)$  [mm, rad]. Utilizou-se um sinal senoidal com 4 ciclos e envoltória Gaussiana, com fase modulada por um sinal triangular e por um sinal constante, como ilustrado nas Figuras 1 e 2. Ao sinal de excitação foi adicionado um ruído branco Gaussiano de forma a obter diferentes relações sinal-ruído (SNRs).

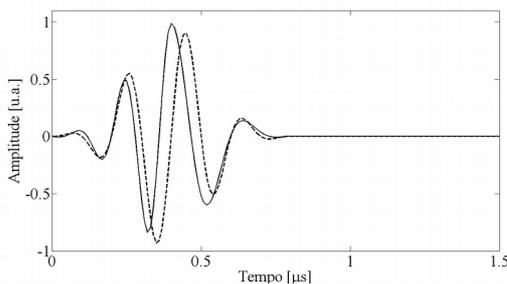


Figura 1. Sinal modulado considerando-se o sinal modulador  $m(t)$  triangular (linha cheia) e constante igual a  $\pi/2$  rad (linha tracejada).

Aplicou-se a equação (1) aos conjuntos de sinais simulados, obtendo-se a imagem IP para cada caso de sinal modulador e SNR. Para obtenção da imagem, selecionou-se o raio variando de  $r = 20 \text{ mm}$  a  $r = 27,5 \text{ mm}$  com passo  $dr = 7,7 \mu\text{m}$  e ângulo de  $\theta = 0,39\pi$  rad a  $\theta = 0,61\pi$  rad com passo  $d\theta = 0,56\pi$  mrad (de  $70^\circ$  a  $110^\circ$ , com passo de  $0,1^\circ$ ). Os resultados para SNRs iguais a 20, 0, -5, -10 e -20 dB estão ilustrados na Figura 3.

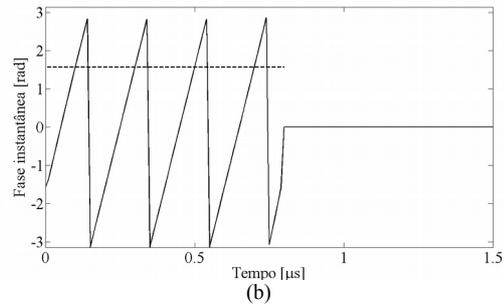
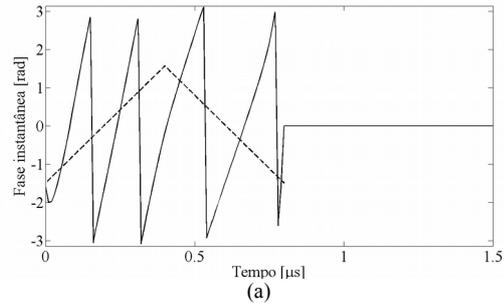


Figura 2. Fase instantânea dos sinais modulados (linha cheia) e sinal modulador  $m(t)$  (linha tracejada) para: (a)  $m(t)$  triangular e (b) constante igual a  $\pi/2$  rad.

A imagem IP está apresentada considerando apenas o caso da modulação de fase por um sinal constante, visto que a representação do refletor é bem parecida com o outro caso simulado. Observa-se que apesar de a imagem de fase instantânea representar o refletor para todas as SNRs apresentadas, como ilustrado nas Figuras 3(a), 3(d), 3(g), 3(j) e 3(m), existe uma limitação na resolução espacial, visto que o refletor pontual é detectado como tendo dimensões  $2,4 \text{ mm}$  ( $8\lambda$ ) na direção  $x$  (lateral) e  $0,5 \text{ mm}$  ( $1,67\lambda$ ) na direção  $y$  (axial), o que poderia dificultar na identificação de diferentes refletores próximos a este.

Os resultados considerando-se o coeficiente de correlação cruzada da equação (4) entre o sinal modulador da Figura 2(a) e o corte  $s(r)$  na imagem IP podem ser visualizados nas Figuras 3(b), 3(e), 3(h), 3(k) e 3(n). Nota-se que apesar de não representar o refletor para  $\text{SNR} = -20 \text{ dB}$ , para os demais casos apresenta uma melhoria significativa na resolução lateral, visto que o refletor é representado com  $0,22 \text{ mm}$  ( $0,73\lambda$  aproximadamente 11 vezes menor). Entretanto, o refletor pontual aparece duplicado, como se fossem dois refletores distintos, o que poderia levar a interpretações incorretas na detecção e identificação dos refletores da imagem.

Consegue-se a representação de um único refletor com a mesma melhoria na resolução lateral considerando-se a análise utilizando o sinal constante como modulador e a variância do sinal de corte  $s(r)$ , explicado no item 2.3, como pode ser observado nas Figuras 3(c), 3(f), 3(i), 3(l) e 3(o). Por outro lado, aumenta-se a intensidade dos *pixels* relacionados ao fundo da imagem, o que pode resultar em uma diminuição no contraste.

O corte na imagem IP ( $x = 0$ , ou  $\theta = \pi/2$  rad) para SNR igual a 0 dB considerando-se ambos os sinais moduladores está ilustrado na Figura 4. Uma vez que intervalo da fase obtido a partir da equação

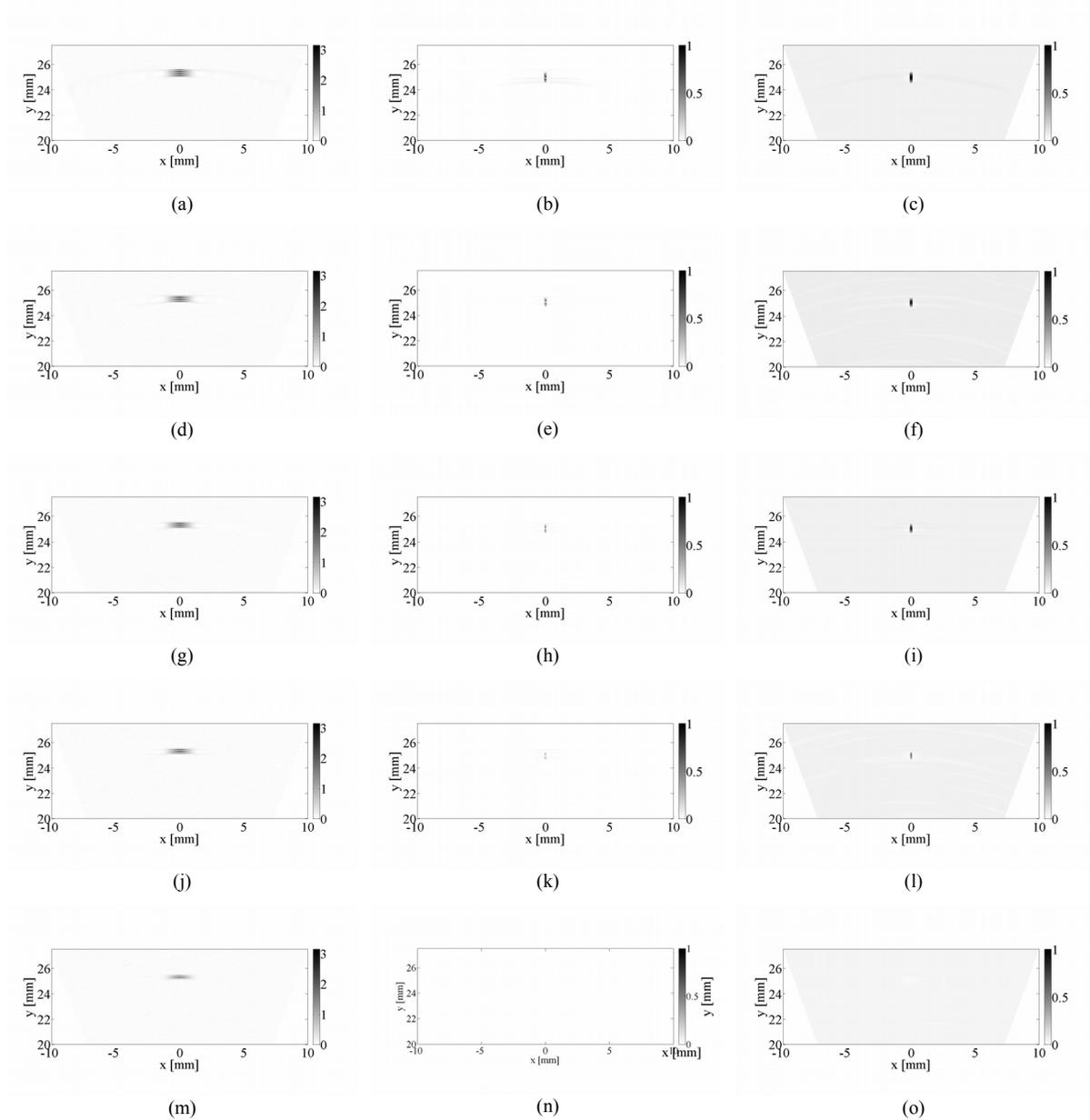


Figura 3. Imagem IP (primeira coluna), imagem obtida utilizando-se o coeficiente de correlação de Pearson e modulação de fase com um sinal triangular (segunda coluna) e utilizando-se a variância da fase e modulação com um sinal constante (terceira coluna) para os seguintes valores de SNR: (a),(b) e (c) 20 dB, (d),(e) e (f) 0 dB, (g),(h) e (i) -5 dB, (j),(k) e (l) -10 dB e (m),(n) e (o) -20 dB.

(2) é de  $-\pi$  a  $\pi$ , faz-se necessário o desempacotamento (*unwrap*) da fase antes da subtração do termo  $\omega t$ . Observa-se, de forma qualitativa, grande similaridade entre os sinais de corte e modulador para ambos os casos.

Fez-se um outro corte nas imagens, para SNR = 0 dB, passando a uma distância lateral  $\lambda$  do refletor, isto é, para  $\theta = 0,496\pi$  rad, comparando-o com o corte passando pelo refletor ( $\theta = \pi/2$  rad), como pode ser observado na Figura 5. Observa-se que para a imagem IP (Figura 5(a)), mesmo fora da região do refletor, tem-se ainda uma intensidade significativa. Já para as imagens considerando-se os sinais modulados e o coeficiente de correlação de Pearson (Figura 5(b)) e a variância da fase (Figura 5(c)), a intensidade fora da região do refletor, a  $\lambda$  de distância lateral já é bastante reduzida, resultando em melhor resolução lateral e, conseqüentemente, maior contraste

naquela região da imagem (considerando-se o tamanho real do refletor).

Poder-se-ia criar um limiar, como proposto por Prado et al. (2014) para detectar quais *pixels* estão relacionados a refletores e quais são apenas ruído ou artefato na imagem, por exemplo com a classificação de Mukaka (2012). Entretanto, ainda assim seria um termo subjetivo e não é o objetivo principal deste trabalho.

Selecionaram-se quatro pontos na imagem, sendo um a posição do refletor ( $r, \theta$ ) = (25,  $\pi/2$ ) [mm, rad] e três pontos sem a presença de refletores: na direção do refletor simulado (22,  $\pi/2$ ) [mm, rad]; e em outras direções, mas com a mesma distância: (25,  $0,39\pi$ ) e (25,  $0,44\pi$ ) [mm, rad]. Para cada ponto selecionado calculou-se o contraste com relação aos demais *pixels* na mesma direção, para diferentes valores de SNR, como ilustrado na Figura 6. Nota-se que

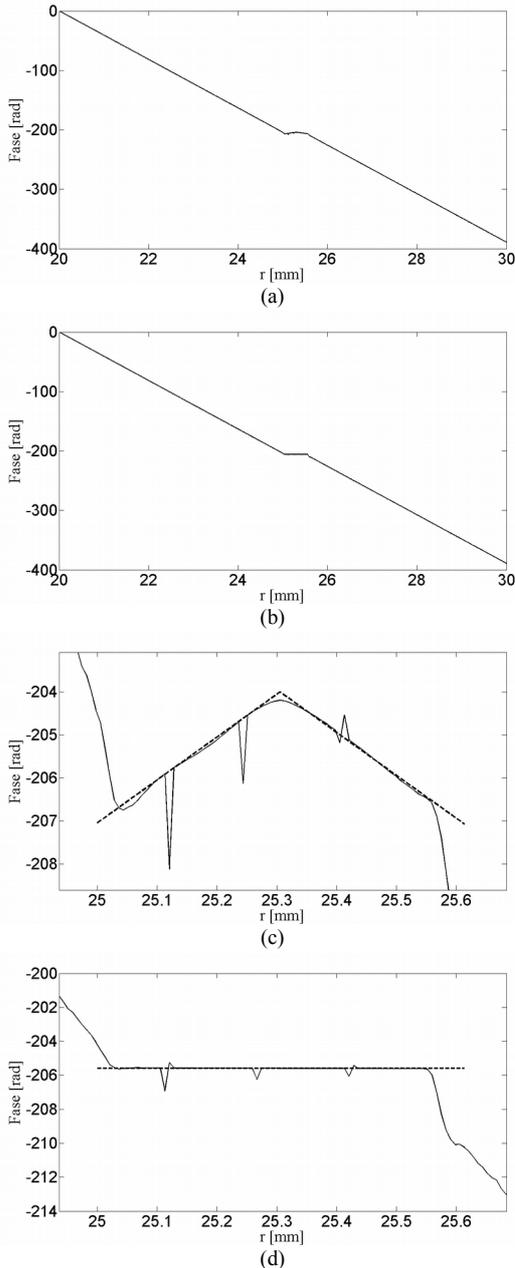


Figura 4. Corte na imagem IP para SNR igual a 0 dB considerando-se os sinais moduladores: (a) triangular e (b) constante. Zoom na região de interesse e comparação do sinal de corte  $s(r)$  (linha cheia) com o sinal modulador  $m(t)$  (linha tracejada) para os sinais: (c) triangular e (d) constante.

com o sinal de modulação triangular tem-se um contraste de pelo menos metade da faixa dinâmica (0,5) para SNRs acima de -5 dB. Com o sinal modulador constante e a variância da fase chega-se a -11 dB. Já a imagem IP, sem considerar a modulação da fase dos sinais apresenta contraste de 1 rad para SNRs acima de -28 dB.

Para fins de comparação entre os métodos, os valores dos *pixels* referentes à imagem de fase instantânea foram normalizadas de 0 a 1, dividindo-se pelo valor máximo possível na imagem ( $\pi$ ). Os contrastes para o refletor podem ser observados na Figura 7. Nota-se que para SNRs maiores que 5 dB todos os métodos apresentam contrastes significativamente elevados, acima de 75% da faixa dinâmica. Como já

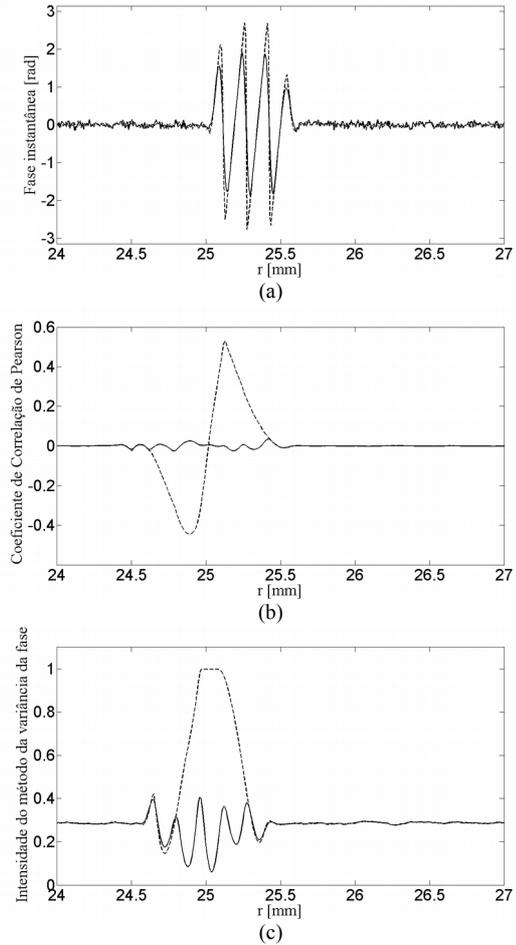
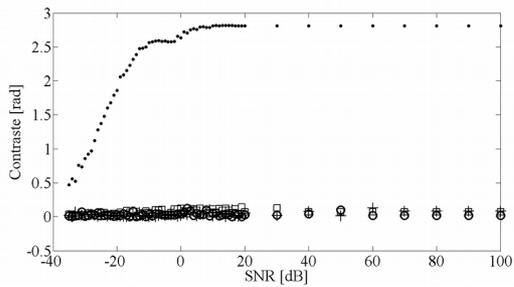


Figura 5. Corte nas imagens (a) IP e imagens considerando (b) o sinal modulador triangular e coeficiente de correlação de Pearson e (c) o sinal modulador constante e a variância da fase. Corte passando sobre o refletor ( $\theta = \pi/2$  rad) em linha tracejada e a  $\lambda$  de distância lateral ( $\theta = 0,496\pi$  rad) em linha cheia.

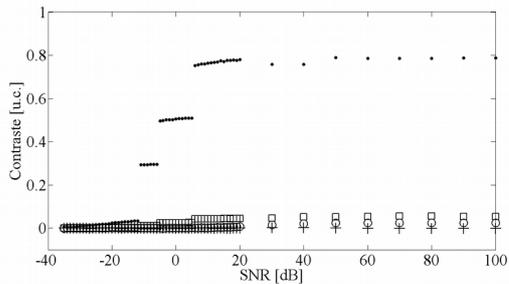
observado na Figura 6, utilizando-se a modulação triangular e o método da correlação de Pearson, com relação aos demais, o coeficiente decresce mais rapidamente com a SNR. Já imagem IP sem considerar modulação nos sinais apresenta maior contraste que os demais com o decréscimo da SNR, atingindo o valor de 50% para SNR de -23 dB. Utilizando-se o sinal modulador constante e a variância da fase, tem-se um resultado intermediário entre os demais.

## 4 Conclusão

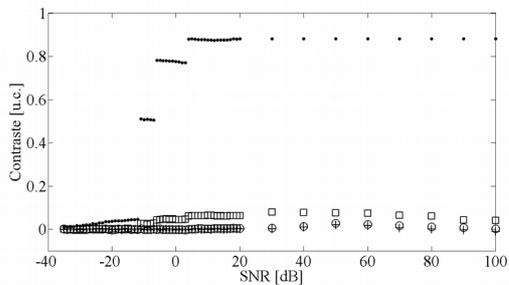
A utilização de sinais com modulação de fase em conjunto com a imagem de fase instantânea resulta em melhorias significativas na resolução lateral da imagem. Embora o método utilizando sinal modulador triangular e a correlação de Pearson tenha alterado o formato do refletor na direção axial, este apresenta melhoria na direção lateral, possuindo contraste de pelo menos 50% da faixa dinâmica para valores de SNRs acima de -5 dB. Esta característica não é um resultado global do método, uma vez que inúmeros outros sinais poderiam ser utilizados para modular o sinal de excitação. Utilizando-se o sinal modulador constante e, conseqüentemente, a variância da



(a)



(b)



(c)

Figura 6. Contraste considerando-se a diferença das intensidades dos *pixels* na mesma direção  $\theta$  para os pontos nas posições  $(r, \theta)$  iguais a  $(25, \pi/2)$  [mm, rad] (marcador  $\bullet$ ),  $(22, \pi/2)$  [mm, rad] (marcador  $\square$ ),  $(25, 0,39\pi)$  [mm, rad] (marcador  $\circ$ ) e  $(25, 0,44\pi)$  [mm, rad] (marcador  $+$ ), para: (a) imagem IP, (b) sinal modulador triangular correlação de Pearson e (c) sinal modulador constante e variância da fase.

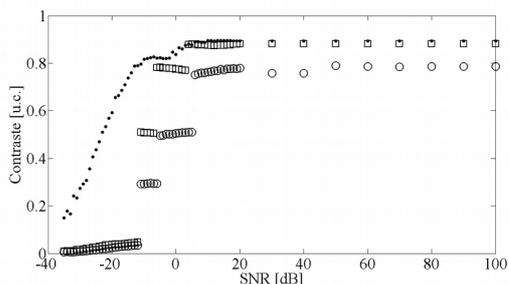


Figura 7. Contraste do refletor considerando-se a diferença das intensidades dos *pixels* na mesma direção  $\theta$  para a imagem IP (marcador  $\bullet$ ), modulação de fase com sinal triangular e correlação de Pearson (marcador  $\circ$ ), e modulação com sinal constante e variância (marcador  $\square$ ).

fase, obtém-se um resultado semelhante à imagem de fase instantânea com relação à resolução axial, com a melhoria de aproximadamente 11 vezes na resolução lateral, representando refletores para SNRs acima de -11 dB. Para SNRs acima de 0 dB todos os métodos comparados apresentam contrastes elevados, acima

de 75% da faixa dinâmica. Contudo, a imagem de fase instantânea sem considerar a modulação de fase apresenta contrastes mais expressivos que os demais para SNRs abaixo de 0 dB. Por outro lado, considerou-se ruído branco Gaussiano adicionado aos sinais sem nenhum pós-processamento de filtragem. Filtrando-se os sinais antes da formação da imagem compensa-se o contraste menor obtido com os métodos propostos. Serão ainda verificados os resultados para outros sinais moduladores, assim como a presença de múltiplos refletores. Pretende-se também validar o método experimentalmente, analisando-se a existência de alguma restrição quanto à banda do sinal modulado e a resposta em frequência do transdutor, e estudar diferentes métodos para extração da fase instantânea, avaliando a influência destes nos resultados finais.

### Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Programa Institucional de Voluntariado na Iniciação Científica e Tecnológica – PVICT da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

### Referências Bibliográficas

- Camacho, J.; Parrilla, M. e Fritsch, C (2009). Phase coherence imaging. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol.56, No. 5; pp. 958-974.
- Drinkwater, B. W. e Eilcox, P. D (2006). Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: a review. *NDT&E International*, vol.39, No. 7; p. 525-541.
- Holmes, C.; Drinkwater, B. W. e Wilcox, P. D (2005). Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation. *NDT&E International*, Vol.38, No. 8; pp. 701-711.
- Lockwood, G. R.; Li, P. C.; O'Donnell, M. e Foster, F. S (1996). Optimizing the radiation pattern of sparse periodic linear arrays. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol.43, No. 1; pp. 7-14.
- Martínez-Graullera, O.; Romero-Laorden, D.; Martín-Arguedas, C. J.; Ibañez, A.; Ullate, L. G (2011). A new beamforming process based on the phase dispersion analysis. In: *International Congress on Ultrasonics*. Poland: AIP Publishing, pp. 185-188.
- Misaridis, T. e Jensen, J. A (2005). Use of modulated excitation signals in medical ultrasound. Part II: design and performance for medical imaging applications. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol.52, No. 2; pp. 192-207.
- Mukaka, M. M (2012). Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. *Malawai Medical Journal*, Vol.24, No. 3; pp. 69-71.

- Oppenheim, A. V.; Schaffer, R. W. e Buck, J. R (1999) *Discrete-Time Signal Processing*. Ed. 2. New Jersey: Prentice Hall, 870p.
- Prado, V. T.; Granja, S. C.G.; Higuti, R. T.; Kitano, C.; Martínez-Graullera, O. E Segura, L. E (2015). Defect detection in anisotropic plates based on the instantaneous phase of signals. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol.62, No. 10; pp. 1888–1894.
- Prado, V. T.; Higuti, R. T.; Kitano, C. e Martínez-Graullera, O (2014). Instantaneous phase threshold for reflector detection in ultrasonic images. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol.61, No. 7; pp. 1204–1215.
- Prado, V. T.; Higuti, R. T.; Kitano, C.; Martínez-Graullera, O. e Adamowski, J. C (2013). Lamb mode diversity imaging for non-destructive testing of plate-like structures. *NDT&E International*, Vol.59; pp. 86-95.
- Trots, I.; Nowicki, A. e Postema, M (2017). Ultrasound Image Improvement by Code Bit Elongation. *IEEE Signal Processing Letters*, Vol.25, No. 3; pp437-441.
- Veres, I. A.; Cleary, A.; Thubsby, G.; Mckee, C.; Armstrong, I.; Pierce, G. e Culshaw, B (2013). Golay code modulation in low-power laser-ultrasound. *Ultrasonics*, Vol.53, No. 1; pp. 122-129.