

ESTIMAÇÃO DO TEMPO DE TRANSITO ULTRA-SÔNICO UTILIZANDO ESTRATEGIAS EVOLUTIVAS PARA A MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO

JUAN MOISES MAURICIO VILLANUEVA

Departamento de Engenharia Eletrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-Brasil
E-mails: jmauricio@ee.ufcg.edu.br

¹RAIMUNDO CARLOS S. FREIRE, ²SEBASTIAN YURI C. CATUNDA

¹*Departamento de Engenharia Eletrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-Brasil*

²*Departamento de Engenharia Eletrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-Brasil*
E-mails: freire@dee.ufcg.edu.br, catundaz@gmail.com

Abstract— Wind speed measurement systems are of great importance for applications of wind energy, industrial and scientific applications. Among the techniques for wind speed measuring are those based on ultrasonic transducers, allowing instrument design with low uncertainty, with fast response times and low power consumption. For this purpose, we should perform the estimation of the Time-of-Flight (ToF), which is usually estimated using techniques based on processing of the ultrasonic signal. However, it is possible to implement heuristic techniques for searching solutions based on evolutionary strategies, producing results with less computational processing time. Therefore, this work presents the determination of ToF using evolutionary algorithms, considering the modeling of the echo signal ultrasonic. Simulation results are presented with a level of signal to noise of SNR = 2.63 dB and SNR = -0.74 dB.

Keywords— Ultrasonic Transducers, Time-of-Flight, Evolutionary Strategies.

Resumo— Sistemas de medição da velocidade do vento são de grande importância para aplicações de Energia Eólica, Industrial e aplicações científicas. Entre as técnicas para medição da velocidade do vento estão aquelas baseadas em transdutores ultra-sônicos, permitindo projetar instrumento com baixa incerteza, tempos de resposta rápidos e baixo consumo de energia. Nestes casos, pode-se usar o Tempo de Trânsito ultra-sônico (ToF: *Time-of-Flight*), que é usualmente estimado usando técnicas baseadas no processamento do sinal ultra-sônico. Entretanto, pode-se também implementar técnicas heurísticas para a busca de soluções baseadas em estratégias evolutivas, produzindo resultados com menor tempo de processamento computacional. Neste trabalho, apresenta-se a determinação do ToF utilizando estratégias evolutivas, considerando-se a modelagem não linear do sinal de eco ultra-sônico. São apresentados resultados de simulação com nível de relação sinal ruído de SNR=2,63 dB e SNR=-0,74 dB.

Palavras-chave— Transdutores Ultra-sônicos, Tempo de Trânsito, Estratégias Evolutivas.

1 Introdução

A medição da velocidade de fluidos é de interesse em diversas aplicações, tais como: na área de Energia Eólica a medição da velocidade do vento permite a construção de mapas eólicos e determinação ótima de locais para a instalação de parques eólicos; em túneis de vento para o estudo aerodinâmico de objetos de teste; no setor industrial para a determinação da vazão e perda de gases (Hauptmann, 2008), etc. Os instrumentos para a medição da velocidade do fluido são diversos, entretanto, quando as restrições do projeto apontam a uma medição com suficiente exatidão os instrumentos baseados em sensores ultra-sônicos se destacam. Estes apresentam características de baixa incerteza comparadas com os instrumentos que usam as técnicas convencionais, assim como menor tempo de resposta e manutenção mínima (Villanueva, 2009).

O principio de medição da velocidade de fluidos usando transdutores ultra-sônicos requer a estimação

do Tempo de Trânsito (ToF, *Time-of-Flight*), que é o tempo de viagem do sinal ultra-sônico desde o transdutor transmissor até sua detecção no transdutor receptor. Entre as técnicas convencionais para a estimação do ToF estão aquelas baseada na Diferença de Tempo como a Detecção do Limiar (*Threshold*) e a Diferença de Fase. Existem também as técnicas de processamento digital de sinais baseadas na Correlação Cruzada, Estimação de Máxima Probabilidade (MLE, *Maximum Likelihood Estimation*), Filtro de Kalman e Transformada Wavelet (Villanueva, 2009; Espinoza, 2010; Ingaroca, 2011).

Podem-se também implementar algoritmos de otimização para a procura do ToF baseado na modelagem não linear multi-variável do sinal de eco ultra-sônico. Estes algoritmos podem ser baseados em algoritmos heurísticos, como algoritmos genéticos e estratégias evolutivas, que realizam a procura de soluções de variáveis em um espaço definido (Liu, 2011).

Neste trabalho, apresenta-se o procedimento de estimação do ToF para a medição da velocidade do vento utilizando estratégias evolutivas. Dessa forma,

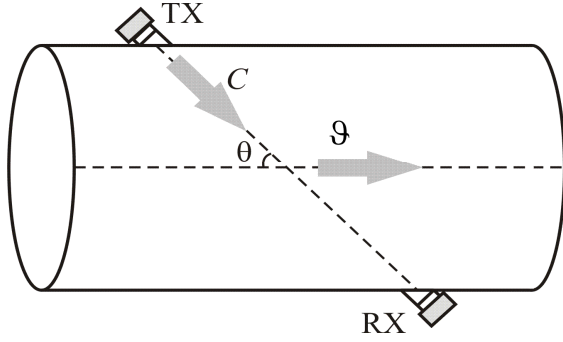


Figura 1. Configuração da Medição.

realiza-se a modelagem da envoltória do eco ultra-sônico por uma equação não linear multi-variável. Em seguida, apresentam-se as definições preliminares, o procedimento de estimação do ToF e resultados de simulação.

2 Definições Preliminares

2.1 Medição da velocidade do vento usando transdutores ultra-sônicos

Na Figura 1 ilustra-se a configuração dos transdutores ultra-sônicos para a medição da velocidade do vento. O transdutor transmissor opera abaixo de uma frequência fixa e emite uma onda mecânica que atravessa o meio e interage com a velocidade do vento. O meio introduz um ruído aleatório e atenua o sinal. Quando o transdutor receptor detecta o sinal ultra-sônico realiza a mudança de domínio de energia mecânica para elétrica. Usualmente, uma amplificação é requerida na etapa de recepção (Villanueva, 2009).

A partir da configuração de medição, são relacionadas as variáveis do processo, determinando-se a velocidade do vento por:

$$v = \frac{1}{\cos \theta} \left(\frac{L}{\tau} - C \right) \quad (1)$$

A configuração de medição ilustrado na Figura 1 é modelada considerando-se que os transdutores ultra-sônicos apresentam um comportamento similar a um filtro passa-faixa com largura de banda limitada, que o meio provoca uma atenuação no sinal e adiciona um ruído gaussiano. Desta forma, o sinal no transdutor receptor é dado por:

$$y(t) = Ax(t - \tau) + u_A \quad (2)$$

em que: $x(t)$ é o sinal elétrico no transdutor transmissor, $y(t)$ é o sinal elétrico no transdutor receptor, A é a amplitude do sinal elétrico no transdutor receptor, τ é o tempo de trânsito (ToF) e u_A é o ruído aleatório Gaussiano.

Na Figura 2, ilustram-se os sinais elétricos do transdutor transmissor (TX) e do transdutor receptor (RX). Observa-se que o Tempo de Transito (ToF) é definido como o intervalo de tempo desde o instante que o sinal é transmitido até o instante em que o sinal é detectado pelo transdutor receptor (eco ultra-sônico).

2.2 Modelamento do Eco Ultra-sônico

O sinal do eco ultra-sônico no transdutor receptor foi modelado por uma função não linear multi-variável, de acordo com (Guetbi, 1998; Huang, 2007):

$$y(t) = \left(\frac{t - \tau}{\beta \alpha} \right)^\gamma \sin(2\pi f_o(t - \tau) + \phi) e^{\left(\beta - \frac{t - \tau}{\alpha} \right)} \quad (3)$$

em que: τ é o tempo de trânsito (ToF) e $[\alpha, \beta, \phi, \gamma]$ são parâmetros associados a forma do eco ultra-sônico no tempo.

Desta forma, o eco ultra-sônico é definido a partir da determinação dos valores dos parâmetros $\alpha, \beta, \phi, \tau$ e γ . Diversos algoritmos de busca podem ser utilizados, entretanto, aqueles baseados nas estratégias evolutivas estabelecem estratégias de busca otimizadas baseadas em procuras de soluções direcionadas utilizando uma função de aptidão (*fitness*) e um processo evolutivo para encontrar a melhor solução dentro de um espaço de busca definido.

3 Estratégias Evolutivas para a Determinação do Time-of-Flight (ToF)

Estratégias evolutivas realizam a procura de soluções de maneira aleatória, mas direcionada, considerando uma função de aptidão, chamada de *fitness*, a qual deve ser definida de acordo as

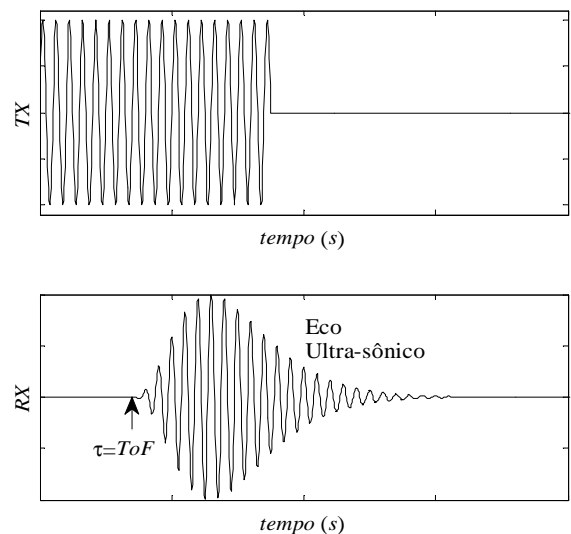


Figura 2. Sinais ultra-sônicas transmitida e recebida.

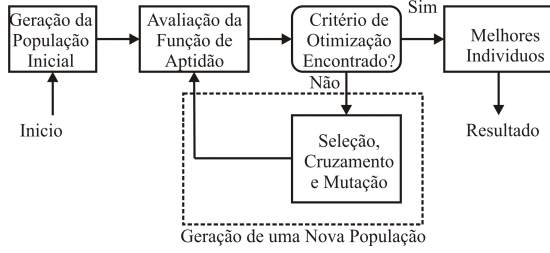


Figura 3. Diagrama de blocos da Estratégia Evolutiva para a determinação do ToF.

características próprias do problema de otimização. Com a finalidade de implementar um processo evolutivo, são utilizados operadores de seleção, cruzamento e mutação, para a geração de novas soluções. Na Figura 3, ilustra-se o diagrama de blocos do processo evolutivo para a determinação do tempo de trânsito (Michalewicz, 1992).

3.1 Geração da População Inicial

Para gerar a população inicial criou-se uma população de tamanho $PopSize$, inicializada aleatoriamente, cujos parâmetros encontram-se definidos nos seguintes limites: $\alpha \in [10^{-6}; 0,001]$, $\beta \in [1; 3]$, $\phi \in [0; \pi]$, $\tau \in [0; 500\mu s]$ e $\gamma \in [1; 4]$. Desta maneira, o i -ésimo indivíduo da população inicial é dado por:

$$x^i = (\alpha^i, \beta^i, \phi^i, \tau^i, \gamma^i) \quad (4)$$

Com a finalidade de introduzir uma variação durante o processo de busca, para cada indivíduo x^i é associado um conjunto de valores correspondentes ao desvio padrão de cada variável, respectivamente. Portanto, o i -ésimo indivíduo da população inicial finalmente construído da seguinte maneira:

$$(x^i, \sigma^i) = (\alpha^i, \beta^i, \phi^i, \tau^i, \gamma^i, \sigma_\alpha^i, \sigma_\beta^i, \sigma_\phi^i, \sigma_\tau^i, \sigma_\gamma^i) \quad (5)$$

Como o problema apresenta restrições no espaço de busca, deve-se tomar cuidado para não gerar indivíduos inválidos na etapa de inicialização. Desta maneira, foram estabelecidos limites superior e inferior obtidos a partir da envoltória do sinal de eco ultra-sônico. Essa envoltória do eco ultra-sônico foi obtida pela determinação do módulo da transformada de Hilbert, como se ilustra na Figura 4.

$$\begin{aligned} LimSup &= e(t) + 0,3e(t) \\ LimInf &= e(t) - 0,3e(t) \end{aligned} \quad (6)$$

Em que $e(t)$, é a envoltória do eco ultra-sônico no transdutor receptor.

3.2 Função da Aptidão (Fitness)

Cada indivíduo da população inicial é obtido pelos parâmetros $x^i = (\alpha^i, \beta^i, \phi^i, \tau^i, \gamma^i)$, e estes modelam o sinal de eco ultra-sônico $y_i(t)$ (Eq. (3)). Deve-se avaliar de forma quantitativa a aptidão deste indivíduo em relação ao sinal de eco ultra-sônico $e(t)$. Dessa forma, foi utilizado o erro de aproximação dado por $\epsilon_A = y_i(t) - e(t)$.

Como os limites do erro de aproximação não são constantes (devido ao ruído) o erro de aproximação normalizado é determinado por:

$$\epsilon_{AN} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\epsilon_A}{LimSup} | \epsilon_A > 0 \\ \frac{\epsilon_A}{LimInf} | \epsilon_A < 0 \end{array} \right\} \quad (7)$$

Assim, cada indivíduo da população tem associado uma função de aptidão, que reflete quão boa ele é, comparada com outros na população. Desta maneira, foi definida a função de aptidão, para cada indivíduo, determinada como uma combinação de três parâmetros:

$$f = f_1 + \sqrt{f_2^2 + f_3^2} / w_f \quad (8)$$

em que: w_f é um fator de ponderação, que foi ajustado para 40, e f_1 , f_2 e f_3 , são respectivamente valores máximo, médio e desvio padrão, dados por:

$$\begin{aligned} f_1 &= \max(\epsilon_{AN}^2) \\ f_2 &= \text{mean}(\epsilon_{AN}^2) \\ f_3 &= \text{std}(\epsilon_{AN}^2) \end{aligned} \quad (9)$$

A função de aptidão, definida em (8), força o algoritmo a minimizar o máximo do erro de aproximação normalizado considerando a minimização também dos valores médio e desvio padrão deste erro. O fator de ponderação tem por objetivo evitar o mascaramento do primeiro parâmetro pelos outros dois (Catunda, 2003).

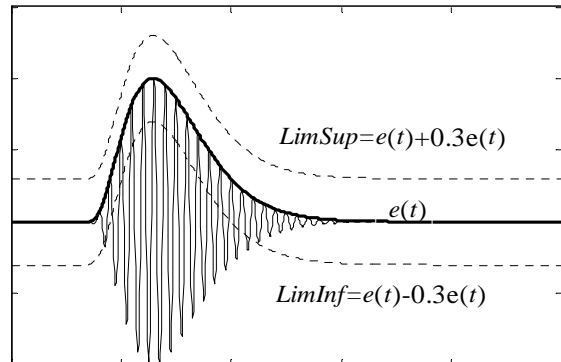


Figura 4. Limites Superior e Inferior da envoltória.

3.3 Seleção

O método da seleção envolve a escolha dos indivíduos na população que irão gerar descendentes, assim como o número de descendentes a serem criados. A partir da população principal, n_{ind} indivíduos são selecionados para gerar novos indivíduos, utilizando uma pontuação baseada em atributos não lineares e seleção por roleta (Catunda, 2003).

$$Prob(i) = \frac{n_{ind} \cdot v^{n_{ind}-1}}{\sum_j v^{j-1}} ; i = 1, \dots, n_{ind} \quad (10)$$

Em que v é a raiz real e positiva do polinômio:

$$(SP - n_{ind}) \cdot v^{n_{ind}-1} + SP \cdot v^{n_{ind}-2} + \dots + SP = 0 \quad (11)$$

e SP é o parâmetro que controla a pressão de seleção.

3.4 Operadores de Cruzamento e Mutação

O operador de cruzamento troca parte da informação genética entre dois indivíduos, produzindo novas soluções potenciais com algumas características dos pais. O operador de cruzamento utilizado era baseado no cruzamento uniforme (Michalewicz, 1992), definido por:

$$(x^1, \sigma^1) = (\alpha^1, \beta^1, \phi^1, \tau^1, \gamma^1, \sigma_\alpha^1, \sigma_\beta^1, \sigma_\phi^1, \sigma_\tau^1, \sigma_\gamma^1) \quad (12)$$

$$(x^2, \sigma^2) = (\alpha^2, \beta^2, \phi^2, \tau^2, \gamma^2, \sigma_\alpha^2, \sigma_\beta^2, \sigma_\phi^2, \sigma_\tau^2, \sigma_\gamma^2)$$

e a operação de cruzamento produz o filho:

$$(x, \sigma) = \left(\frac{\alpha^1 + \alpha^2}{2}, \dots, \frac{\gamma^1 + \gamma^2}{2}, \frac{\sigma_\alpha^1 + \sigma_\alpha^2}{2}, \dots, \frac{\sigma_\gamma^1 + \sigma_\gamma^2}{2} \right) \quad (13)$$

Depois da operação de cruzamento os indivíduos sofrem um processo de mutação, com o objetivo de introduzir indivíduos com novas variações na população, tendo como consequência uma maior exploração do espaço de busca. O operador de mutação foi definido por:

$$\sigma' = \sigma e^{N(0, \Delta\sigma)}$$

$$x' = x + N(0, \sigma') \quad (14)$$

em que: $\Delta\sigma$ é o valor do desvio padrão ajustado para 0,001, e N gera um número aleatório com função de distribuição Gaussiano.

Desta maneira, é criada uma nova população de indivíduos (denominada como filhos), potencialmente melhores que a população inicial (denominados pais).

4 Resultados de Simulação

Nesta seção são apresentados resultados de simulação para a determinação do tempo de trânsito ultra-sônico (ToF) na configuração de medição da velocidade do vento apresentado na Figura 1. Foram utilizados os seguintes parâmetros para simulação: Frequência de operação do transdutor ultrasônico de 40 kHz; Velocidade do vento $\vartheta = 10$ m/s; distância entre os transdutores $L = 8,6$ cm; $\theta = \pi/4$ e Temperatura = 20 °C.

A partir destes valores e utilizando a equação (1) foi determinado o Tempo de Trânsito (ToF) teórico que deve ser alcançado pelo algoritmo evolutivo, dado por:

$$ToF_{teórico} = \frac{L}{\vartheta \cos \theta + C} = 244,96 \mu s \quad (15)$$

em que: C é a velocidade do som do ar, que depende principalmente da temperatura e é dada por:

$$C = 20,074 \sqrt{273,15 + T} \quad (16)$$

Foram estabelecidos os parâmetros para a simulação do algoritmo evolutivo, tais como: Número de indivíduos da população inicial: 50; Número máximo de gerações: 500, probabilidade de cruzamento: 0,8 e limite mínimo do *fitness* de 0,01.

A Tabela 1 contém os resultados de simulação quando considerado um ruído aditivo gaussiano com valor médio zero e desvio padrão igual a 20% do nível máximo do sinal de eco ultra-sônico $e(t)$, equivalente a uma relação sinal a ruído de $SNR = 2,63$ dB.

Tabela 1. Determinação do ToF com $SNR = 2.63$ dB

| ToF (μs) | α | β | ϕ | γ | Fitness |
|----------|-----------------------|---------|--------|----------|---------|
| 244,42 | $1,02 \times 10^{-4}$ | 2,99 | 1,01 | 3 | 0,056 |
| 242,96 | $1,50 \times 10^{-4}$ | 2,00 | 1,07 | 2 | 0,310 |
| 244,20 | $9,16 \times 10^{-5}$ | 2,58 | 0,99 | 3 | 0,192 |
| 244,86 | $1,02 \times 10^{-4}$ | 3,00 | 0,96 | 3 | 0,063 |
| 242,04 | $1,03 \times 10^{-4}$ | 3,01 | 0,36 | 3 | 0,065 |

A Tabela 2 contém os resultados de simulação quando considerado um ruído aditivo gaussiano com valor médio zero e desvio padrão igual a 30% do nível máximo do sinal de eco ultra-sônico $e(t)$, equivalente a um $SNR = -0,74$.

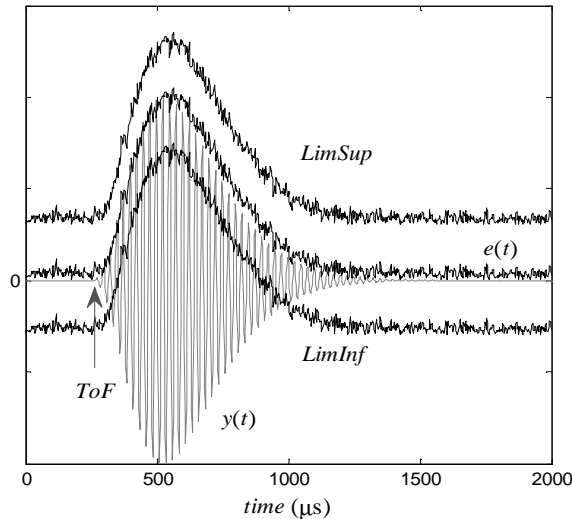


Figura 5. Modelagem do sinal eco ultra-sônico $y(t)$ com parâmetros $\alpha=9,36 \times 10^{-5}$; $\beta=2,9$; $\phi=0,997$; $\gamma=3$ e $ToF=243,53 \mu s$.

Tabela 2. Determinação do ToF com SNR = - 0,74 dB

| ToF (μs) | α | β | ϕ | γ | Fitness |
|-----------------|-----------------------|---------|--------|----------|---------|
| 243,53 | $9,36 \times 10^{-5}$ | 2,9 | 0,99 | 3 | 0,228 |
| 245,48 | $1,48 \times 10^{-4}$ | 2,0 | 1,68 | 2 | 0,349 |
| 242,45 | $9,88 \times 10^{-5}$ | 2,8 | 0,39 | 3 | 0,111 |
| 243,97 | $9,87 \times 10^{-5}$ | 2,6 | 1,01 | 3 | 0,095 |
| 242,89 | $1,08 \times 10^{-4}$ | 3,0 | 1,01 | 3 | 0,235 |

A partir dos resultados de simulação apresentados na Tabela 1, observou-se que o algoritmo evolutivo consegue estimar o ToF com níveis de ruído bastante elevados, que comparados com outras técnicas baseadas na Diferença do Tempo como Detecção do Limiar ou Diferencia de Fase apresentam problemas na estimação do ToF com níveis de ruído não permitidos.

Na Figura 5, ilustra-se o resultado da simulação, para um SNR = -0,74 dB, obtendo-se como resultado do tempo de trânsito de $ToF = 243,53 \mu s$ e $fitness = 0,228$; $\alpha=9,36 \times 10^{-4}$; $\beta=3,22$; $\phi=0,38$ e $\gamma=3$. Observa-se que o algoritmo evolutivo produz diferentes soluções para as mesmas condições de nível de ruído.

5 Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um algoritmo para a determinação do tempo de trânsito ultra-sônico utilizando estratégias evolutivas. A modelagem não linear do sinal de eco ultra-sônico permite implementar uma função de aptidão (fitness) para realizar a busca de soluções em um espaço de busca definido. A partir dos resultados é observado que o algoritmo evolutivo proporciona soluções diferentes, isto é, são encontradas diversas soluções que satisfazem as restrições do problema. Além disso, o algoritmo permite obter soluções em ambientes

ruidosos, apresentando vantagens desejáveis comparadas com técnicas convencionais de estimação do ToF. Observa-se também que sendo um problema de otimização com restrições, é requerida uma geração da população inicial adequada, com a finalidade de evitar a convergência prematura do algoritmo evolutivo.

Referências Bibliográficas

- Catunda, S.Y.C., Saavedra, O.R., FonsecaNeto, J.V., Morais, M.R.A., (2003), "Look-up table and breakpoints determination for piecewise linear approximation functions using evolutionary computation", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp: 435-440.
- Espinoza, C.E.M., Villanueva, J.M.M., Catunda, S.Y.C., (2010), "Wind Speed Measurement and Uncertainty Analysis using ultrasonic sensors with Kalman Filtering", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp:624-628.
- Hauptmann, P., Hoppe, N., Puettmmer, A., (2001), "Ultrasonic sensors for process industry", IEEE Ultrasonic Symposium, Vol. 1, pp: 369-378.
- Huang, Y.S., Huang, Y.P., Huang, K.N., Young, M.S., (2007), "An accurate air temperature measurement system based on an envelope pulsed ultrasonic time-of-flight technique", IEEE Review of Scientific Instruments, Vol.; 78, Issue 11, pp: 115102-1151029.
- Ingaroca, N.S.C., Villanueva, J.M.M., Catunda, S.Y.C., Santiago, J.L.G., Vargas, C.E.T., (2011), "Multilayer measuring system and uncertainty analysis using ultrasonic sensors with wavelet transform", IEEE Instrumentation and Measurement Technolugu Conference, pp:1-6.
- Liu, Z., Bai, X., Pan, Q., Li, Y., Xu., Ch., (2011), "Ultrasonic echoes estimation method using genetic algorithm", IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp: 613-617.
- Michalewicz, Z., (1992), "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", Springer, 2nd Edition.
- Villanueva, J.M.M., Catunda, S.Y.C., Tanscheit, R., (2009), "Maximum-Likelihood Data Fusion of Phase-Difference and Threshold-Detection Techniques for Wind Speed Measurement", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, Issue 7, pp: 2189-2195.