



**“PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA MONITORAÇÃO
REMOTA E ON-LINE DE VAZAMENTOS EM TUBOS UTILIZANDO
MATRIZ DE SENSORES PIEZELÉTRICOS E ANÁLISE ESPECTRAL
DE ORDEM SUPERIOR”**

**“A PROPOSAL FOR A METHODOLOGY FOR REMOTE AND ON-LINE MONITORING
OF LEAKS IN TUBES USING PIEZOELECTRIC SENSORS ARRAY AND
HIGHER-ORDER SPECTRAL ANALYSIS ”**

Mario Francisco Guerra Boaratti¹, Daniel Kao Sun Ting² e Linilson R. Padovese³

Copyright 2001, Brazilian Petroleum and Gas Institute - IBP

This paper was prepared for presentation at the 3rd Seminar on Pipeline, held in Rio de Janeiro, Brazil, 21-23 November, 2001

This paper was selected for presentation by the Event Technical Committee following review of information contained in an abstract submitted by the author(s). Contents of the paper, as presented, have not been reviewed by the IBP. *Organizers will neither translate nor correct texts received.* The material, as presented, does not necessarily reflect any position of the Brazilian Petroleum Institute, its officers, or members.

Abstract

Our work is focused in the remote on-line detection and localization of the origin of leaks in tubes. For this, we intend to develop a methodology for the detection and localization of these leaks in pressurized tubes using computational tools for the acquisition and processing of signals coming from the propagation of vibratory waves generated by leaks in these tubes, using piezoelectric sensors like accelerometers, microphones and acoustic emission sensors. The mathematical methods to be used are a combination of Higher-Order Spectral Analysis (HOSA) with Beam-forming techniques. Among many HOSA derived methods we plan to apply, particularly the Direction of Arrival Estimation (DOA) and Time-Delay Estimation (TDE).

Resumo

Nosso trabalho está focado na detecção e localização remota e “on-line” da origem de vazamentos em tubos. Para isto, pretendemos desenvolver uma metodologia para a detecção e localização destes vazamentos em tubos pressurizados, utilizando ferramentas computacionais para aquisição e processamento de sinais provenientes da propagação de ondas vibratórias geradas por vazamentos nestes tubos, utilizando-se de sensores piezométricos dos tipos acelerômetros, microfones e de emissão acústica. Os métodos matemáticos a serem usados são uma combinação de “Higher-Order Spectral Analysis (HOSA)” com técnicas de “Beam-forming”. Entre vários métodos derivados do HOSA planejamos aplicar particularmente “Direction of Arrival Estimation (DOA)” e “Time-Delay Estimation (TDE)”.

Introdução

Nesse trabalho levantamos a necessidade de se estudar o problema de vazamentos em tubos ou

¹ Doutorando, Engenheiro Eletricista - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN

² Doutor, Engenheiro Mecânico - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN

³ Doutor, Engenheiro Mecânico - Departamento de Engenharia Mecânica - EPUSP

3rd Seminar on Pipelines, Rio de Janeiro, RJ, 2001
8458

vasos pressurizados tais como questões econômicas, ambientais e de segurança de instalações industriais. Partimos do pressuposto que estes vazamentos geram ondas acústicas que se propagam ao longo da tubulação e que estas poderão ser detectadas por matrizes de sensores localizadas ao longo dos tubos. Supomos também que estes sinais serão corrompidos por ruídos e que estes podem ser correlacionados com o sinal de fonte. São apresentados: uma descrição do fenômeno de vazamento em tubos, uma revisão bibliográfica do problema, as técnicas matemáticas a serem utilizadas (HOSA e "Beam-forming") e uma proposta de desenvolvimento do trabalho.

O problema

A integridade de tubos pressurizados em processos industriais é fundamental. Nós podemos encontrar tais situações em plantas de geração elétrica, siderúrgica, química, petroquímica e outras, onde o transporte de fluídos e gases é uma constante. Em todos estes casos vazamentos podem levar a situações de riscos e de prejuízos; se não detectados a tempo podem causar até acidentes graves, com conseqüências ambientais severas.

Imaginemos por exemplo o gerador de vapor de um reator nuclear que apresente um pequeno furo em seu sistema primário, este furo irá levar ao vazamento de vapor contaminado o qual só será detectado pelo aumento da radioatividade do meio. Isto levará a parada do reator, a um trabalho de detecção e localização do tubo furado e ao devido reparo. Esta detecção utilizando técnicas existentes (por exemplo, Eddy-Current [1, 2, 3]) pode mostrar-se um trabalho exaustivo ou impraticável principalmente se o furo for de dimensões reduzidas. Outro fator a ser considerado é que a detecção só se dará após termos contaminação do meio externo ao sistema primário. Sendo assim um sistema que fosse capaz de detectar um vazamento em um sistema pressurizado tão logo ele se inicie, seria de vital importância para garantir a segurança, a disponibilidade e a confiabilidade da instalação. Agora imaginemos que além de detectar o vazamento este sistema fosse capaz de localizar a origem da falha ou suas imediações de modo que o tempo de parada para manutenção fosse reduzido, isto seria de grande ajuda.

Esta solução pode ser estendida a qualquer planta industrial, que apresente um ruído causado por uma falha em um certo local e que precise ser monitorado para a detecção de sua origem. Por exemplo uma tubulação de petróleo ou gás natural com centenas de quilômetros poderia ser monitorada através da instalação de matrizes de sensores em pontos estratégicos da tubulação, os quais teriam seus sinais constantemente analisados, indicando a integridade desta tubulação. Tão logo um pequeno vazamento se inicie, uma central poderia detectá-lo e enviar equipes para o local exato onde o vazamento se iniciou. Tal estratégia evitaria um provável acidente ecológico de grandes proporções.

O que temos hoje

São conhecidos vários métodos para verificações não destrutivas e não intrusivas de falhas em metais e tubos. A técnica ultra-sônica é uma das mais utilizadas na avaliação de integridade de materiais sujeitos a condições severas de serviço, como solicitações mecânicas associadas ou não a ambientes agressivos. Esta técnica permite a detecção e o dimensionamento de discontinuidades no interior do material [4]. Outra técnica é a da análise da deformação das linhas de campo magnético causadas por trincas ou falhas internas aos tubos, tais como bolhas ou fissuras. Nesta técnica induz-se no tubo de ferro ou aço um campo magnético, através da circulação de uma corrente elevada por uma sonda, e observam-se as deformações deste campo ao longo da superfície do tubo,

através da pulverização de limalhas de ferro, ocorrendo a deformação aí existe uma falha. Uma terceira técnica é a conhecida como Eddy-Current [1, 2, 3]. Esta técnica, utilizada, por exemplo, na inspeção dos tubos dos geradores de vapor de centrais nucleares, é uma das formas mais utilizadas no momento para a avaliação da condição operacional dos feixes tubulares [1]. Contudo vemos que as técnicas descritas acima têm sua principal aplicação na verificação da qualidade do material antes da instalação do tubo em campo e colocação em operação normal ou se utilizadas durante a operação da instalação requerem o desligamento da mesma para a execução da inspeção.

Um grande número de tecnologias para a detecção de vazamentos com várias aplicações e restrições é reportado na literatura. Tecnologias correntemente avaliadas incluem os seguintes métodos: balanço de volume-massa, monitoração da pressão com análise estatística e/ou padrão de compatibilidade e monitoração acústica. Um destes métodos, o qual é uma extensão do método de balanço volume-massa, é reportado por Fukushima et al [5]. Neste primeiro exemplo, o balanço de massa é modelado ao longo de uma linha de tubos. O modelo de simulação para a linha de tubo está baseado em um modelo de vazão transiente definido pelas equações de continuidade, momento e estado. Os autores apresentam o sistema de detecção de vazamento instalado e seu desempenho usando dados operacionais reais na linha de tubo de Niigata-Sendai. Esta é uma linha de gás natural de 250 Km de comprimento. A descoberta de vazamento na linha de tubo é executada pela medida da pressão e temperatura nas estações de válvulas as quais são espaçadas umas das outras com a distância média de 12 km. Em um primeiro passo, um balanço de pressão da linha de tubo é simulado baseado em um modelo. No segundo passo, diferença entre o balanço de pressão simulado e o real é avaliada para determinar um possível vazamento. A taxa mínima de vazamento para a detecção de um vazamento é 1,1% o que é equivalente a um buraco de 0,9 cm de diâmetro e a taxa mínima de vazamento para a estimação do ponto de vazamento é de 1,8% o que é equivalente a um buraco de 1,1 cm de diâmetro.

Outra técnica de detecção de vazamento em linha de tubos (relatada por Souza et al. [6]), é baseada em análise espectral de sinais de pressão medidos em seções de uma linha de tubos de PVC de 1250m de comprimento e 19 mm de diâmetro, onde os transientes de pressão são obtidos, durante as partidas e paradas da bomba, por 4 transdutores de pressão conectados a um computador PC, através de um conversor AD com frequência de amostragem de 550Hz. Na forma digital os sinais são tratados por um filtro de diferença inversa e transformados para o domínio da frequência via FFT. Deste modo, o sinal de pressão torna-se um sinal transitório, na forma adequada ao cálculo da sua densidade espectral de energia. Os resultados obtidos mostraram que as análises espectrais de transientes de pressão, junto com o conhecimento dos pontos de reflexão provêm um eficiente modo de identificar vazamentos durante a partida e parada das bombas na linha de tubos.

Como já mencionamos, várias técnicas de detecção de vazamento por emissão acústica são estudadas. Conforme relatado por Rodriguez e Raj [3], técnicas de emissão acústica têm sido aplicada com sucesso para a detecção e localização da presença de vazamentos em um lado inacessível da blindagem final de uma unidade da "Rajasthan Atomic Power Station". Esta tecnologia foi baseada no fato que sinais de emissão acústica de vazamento de ar e água tem diferentes traços característicos. Durante a monitoração do vazamento sinais amplificados de tensões RMS da emissão acústica são continuamente registrados, enquanto o espectro de frequência para a tensão pico a pico da emissão acústica é periodicamente medido com um analisador de espectro. A análise resultou que um limiar confiável de detecção de vazamento é alcançado para um taxa de vazamento de 2Kg/h em uma pressão maior que 5MPa. Já, Hessel et al [7], mostram a combinação de rede neural com métodos acústicos para tornar possível a localização de vazamento e estimação da taxa de vazamento em estrutura geodésica complexa. Esta técnica combinada foi aplicada para o reator Soviético VVER, porque múltiplos vazamentos são conhecidos tendo ocorrido especialmente na região de "standpipe" da cabeça do vaso. A rede neural foi treinada

usando uma fonte móvel de som que simulava um vazamento junto a todas posições de risco. Os padrões de som foram medidos por uma matriz de 12 sensores de emissão acústica e 3 microfones. Valores RMS, componentes do espectro de potência, e valores de coerência são usados para obter vetores de características adequadas para a entrada da rede neural. Deste modo a eficiência da “rede de percepção de multi-camada para monitoração acústica” pôde ser experimentalmente comprovada.

O uso de ruído acústico passivo para detectar falhas tem muitas características atrativas. Primeiro, é fácil coletar formas de ondas acústicas em lugares inacessíveis de equipamentos. Segundo, o ruído acústico prove muito mais informações do que é obtida com outros processos tais como, temperatura e pressão. Terceiro, Ondas acústicas tem a propriedade de superposição de sistemas lineares. Isto significa que existindo a ocorrência de mais que um defeito, a presença de uma fonte de ruído não afeta a média ou perturba a outra fonte de ruído. Por causa desta propriedade, cada falha detectada individualmente também pode ser detectada quando ocorre simultaneamente com outras [8]. Contudo, a forma de onda é facilmente distorcida quando passa por diferentes meios ou reflexões na estrutura do equipamento. Estes ruídos estranhos corrompem a informação que é de interesse, fazendo o procedimento de extração da informação difícil. Portanto, o tratamento ou redução deste ruído estranho torna-se o maior problema quando se usa ruído acústico para detecção de falha. A forma de onda do ruído pode ser transformada dentro de densidade espectral de potência (PSD), espectro de potência cruzado, ou o cepstrum, a partir do qual características podem ser extraídas para diagnóstico [8].

Como sabemos, tubos pressurizados, tais como linhas de tubos de gás e tubulação de transporte de calor em estação de potência, são geralmente desenhados a satisfazer um conceito de vazar antes de quebrar. Contudo, este conceito é viável somente se um vazamento é detectado em um estágio precoce. Monitoração de emissão acústica é uma técnica potencial para vigilância de vazamentos.

O que pretendemos usar

O problema da detecção da direção de chegada (DOA) de um sinal é freqüentemente encontrado em situações em que temos uma fonte de sinal que desejamos determinar sua posição. Esta fonte pode ser fixa ou variável e pode ou não estar corrompida por ruídos. Estas situações são encontradas no mundo real em sonar, radar, geofísica, biomedicina, redes de telefones celulares, sistemas de antenas, ultra-sonografia, ciências dos materiais para estimativa de alguma propriedade intrínseca de um objeto e em muitas outras situações.

Pretendemos através da utilização de matrizes de sensores piezelétricos dos tipos acelerômetros, microfones e emissão acústica, instalados sobre o tubo ou nas suas imediações, determinar um vazamento e sua localização, analisando os sinais provenientes das propagações de ondas vibratórias causadas por este vazamento. Com este propósito aplicaremos técnicas de “Beam-Forming”, Estimativa do Tempo de Atraso (TDE - Time-Delay Estimation), Detecção da Direção de Chegada (DOA - Direction of Arrival Estimation) e Análise Espectral de Ordem e Superior (HOSA - Higher-Order Spectral Analysis) nestes sinais.

Um incontável número de publicações sobre algoritmos de “beam-forming” e aplicações envolvendo problemas de detecção da direção de chegada (DOA) e estimativa do tempo de atraso (TDE) são encontrados na literatura. Alguns destes trabalhos referem-se a estudos teóricos de algoritmos e outros a aplicações práticas em produtos ou soluções de problemas específicos. Observa-se também que HOSA, DOA, TDE e “Beam-forming” são assuntos correlacionados quando se deseja determinar a origem de uma fonte usando sensores.

Um “beamformer” é um filtro espacial que opera na saída de uma matriz de sensores para aumentar

a amplitude de uma frente de onda coerente relativa ao ruído de fundo e interferências direcionais [9]. O uso de "beamformer" é largamente difundido em telecomunicações, Matthew Hewitt [10] define "beam-forming" como um método de gerar um sinal altamente direcional pelo uso de um arranjo fixo de antenas verticais. Isto permite mudar a direção rapidamente ou até mesmo irradiá-la em várias direções imediatamente. O método "beam-forming" usa a propriedade que quando múltiplos sinais são recebidos em um certo ponto eles somam-se. Mudando o atraso em cada antena, pode ser gerado um sinal que maximize a associação em um ponto especificado. Uma aplicação em sentido oposto é relatada no trabalho de Stephen Blosser [11] que estuda a aplicação de "beam-forming" em dispositivos de escuta assistida. Um dispositivo de escuta assistida tem por objetivo fazer um som mais alto sem aumentar o nível de intensidade dos ruídos de fundo. A idéia consiste em uma matriz de sensores, uniformemente espaçados, receberem o som ambiente e através do tratamento das características deste sinal isolar um som específico dos outros.

Outro exemplo de aplicação destas técnicas é o Sistema de Vigilância por Som (SOSUS) relatado por Christopher Fox [12], o qual consiste de matrizes de sensores localizadas ao longo do Pacífico Norte e têm por objetivo a monitoração ambiental oceânica de abalos sísmicos e atividades vulcânicas. A natureza uni-direcional dos hidrofones permite a descoberta de fontes a qualquer direção, e a disponibilidade de um par de sinais permite o cálculo da direção de chegada. Combinando o tempo de chegada e a direção de chegada de várias matrizes, podem ser associados eventos comuns automaticamente através de software.

Conforme já comentamos a fonte de sinal pode ser corrompida por ruídos espacialmente correlacionados. Se o ruído espacial é fortemente direcional, estatísticas de segunda ordem classificarão este como uma fonte. Se o ruído espacial é Gaussiano e os sinais de fonte são não-Gaussianos, nós podemos usar cumulantes para calcular os comportamentos (sentido e direção) dos sinais de fonte. Nós observamos aí que estatísticas de ordens baixas não conseguem diferenciar o sinal do ruído estimando o ruído como uma fonte [13].

Liang e seus colegas [14], consideram dois casos para o problema de estimação do tempo de atraso (TDE) em ruídos espacialmente correlacionados: (i) TDE de sinal não-Gaussiano em ruídos Gaussianos espacialmente correlacionados, e (ii) TDE de sinal Gaussiano em ruídos espacialmente correlacionados não-Gaussiano. Para o primeiro caso é sugerido uma aproximação com base em estatística de ordem superior, para o segundo caso é sugerido uma aproximação híbrida usando estatística de segunda ordem e de ordens mais altas.

O fenômeno da propagação da onda de vibração

Acústica pode ser definida como a geração, transmissão, e recepção de energia na forma de ondas de vibração na matéria. Como os átomos ou moléculas de um fluido ou sólido são deslocados de sua configuração inicial, uma força de restauração elástica interna aparece. Esta força de restauração unida com a inércia do sistema, é que capacita a matéria de participar em uma vibração oscilatória e portanto gerar e transmitir ondas acústicas [15].

Como vimos, todo material tem a capacidade de propagar ondas de vibração, alguns com maior outros com menor facilidade. A propagação da onda de vibração se caracteriza pela velocidade de deslocamento no meio e pela sua frequência, as quais são funções das características do material tais como, a densidade, o coeficiente de propagação ou módulo de Young e a geometria do material. Em nosso caso vamos considerar inicialmente um tubo contendo gás ou vapor pressurizado, e que este tubo apresente um furo muito pequeno o qual gerará um sinal de vibração que se propagará pelas paredes do tubo. Neste caso devemos levar em conta que esta onda pode se propagar de modo longitudinal e de modo transversal ao longo do material. Como nos interessa a propagação de onda

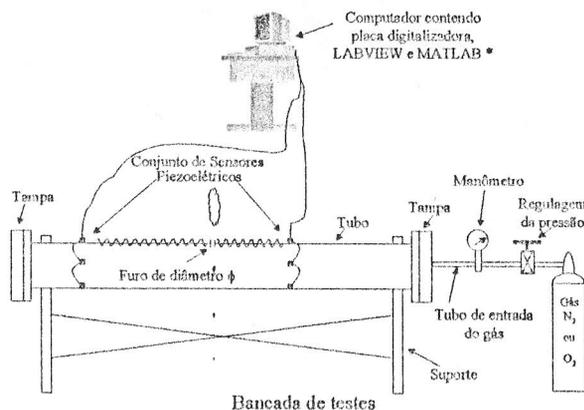
nas paredes do tubo, quando este é excitado por uma fonte de vazamento do tipo $\phi(x) \text{sen} \omega t$, vamos considerá-lo em primeira aproximação como sendo equivalente a uma barra. Deste modo a propagação de onda longitudinal será dada pela equação 1 e a propagação de onda transversal pela equação 2.

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \phi(x) \text{sen} \omega t \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -k^2 c^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \phi(x) \text{sen} \omega t \quad (2)$$

Onde, $c = \sqrt{Y/\rho}$, sendo Y o módulo de Young e ρ a densidade do material e k uma constante que para uma barra circular de raio "a" vale $k=a/2$.

O objetivo nesta etapa é estabelecermos um modelo do fenômeno, utilizando ferramentas matemáticas computacionais, para prevermos o comportamento das ondas de vibração geradas pela falha, visando a uma pré-seleção dos tipos de sensores mais adequados (acelerômetro, emissão acústica, microfone, deslocamento ou pressão) e analisar a sensibilidade do sistema quanto aos parâmetros geométricos e físicos. Para tanto estamos concebendo a bancada de testes esboçada na figura a seguir, a qual tem por finalidade validarmos o modelo computacional do fenômeno de propagação de ondas, além de gerar sinais sintéticos para testarmos e validarmos a metodologia de processamento de sinal utilizando HOSA.



* LABVIEW é marca registrada na National Instruments. MATLAB é marca registrada da The Math Works, inc.

Estatísticas de Ordem Superior

Recentemente Estatísticas de Ordem Superior têm encontrado campo em várias aplicações como, por exemplo: sonar, radar, física do plasma, biomedicina, processamento de dados sísmicos, reconstrução de imagens, detecção de tempo de atraso (TDE), processamento de matriz, análise de sistemas não lineares, detecção e recuperação harmônica, processamento de sinal multidimensional, entre outros. Estas estatísticas, conhecidas como cumulantes, e suas transformadas de Fourier associadas, conhecidas como poliespectro, não revelam somente informações de amplitude sobre um processo, mas também revelam informações da fase. Isto é importante, porque, as estatísticas de segunda ordem (correlação) são transparentes à fase [16]. Já poliespectro preserva a verdadeira natureza da fase do sinal [17].

De outro modo, Cumulantes são transparentes a qualquer espécie de processo Gaussiano, ao passo que correlação não; portanto métodos de processamento de sinais baseados em cumulantes tratam de medidas de ruído Gaussiano colorido automaticamente, ao passo que métodos baseados em correlação não. Ou seja, para processos puramente Gaussianos, todos cumulantes de ordem maior que dois são identicamente zeros. Se um sinal não Gaussiano é recebido junto com ruído

Gaussiano, uma transformação para um domínio de cumulantes de ordem superior eliminará (na teoria) o ruído. Conseqüentemente, métodos baseados em cumulantes aumentam a relação sinal ruído quando os sinais são corrompidos por ruídos Gaussianos, ou de outro modo, cumulante pode extrair sinais não Gaussianos para fora de ruídos Gaussianos [16, 17]. Estatísticas de Ordem Superior são interessantes quando estamos tratando com processos não Gaussianos (ou, possivelmente, não lineares), e muitas aplicações do mundo real são verdadeiramente não Gaussianas.

Na realidade existem muito mais informações em um sinal não Gaussiano estocástico ou determinístico do que é transportado por sua autocorrelação ou espectro de potência. Espectros de Ordem Superior, que são definidos em termos dos momentos de ordem superior ou cumulantes de um sinal, contém esta informação adicional [13].

Através de estatísticas de ordem superior, nos referimos aos momentos de ordem superior e a certas combinações não lineares dos momentos, chamadas cumulantes. Portanto cumulantes são combinações não lineares dos momentos do processo [13]. O cumulante de $k^{\text{ésima}}$ ordem é definido em termos da combinação linear de seus momentos de ordens até k . Para variáveis aleatórias reais de média zero, os cumulantes de segunda, terceira e quarta ordens são dados, em [16], por:

$$\text{cum}(x_1, x_2) = E \{ x_1 x_2 \}$$

$$\text{cum}(x_1, x_2, x_3) = E \{ x_1 x_2 x_3 \}$$

$$\text{cum}(x_1, x_2, x_3, x_4) = E \{ x_1 x_2 x_3 x_4 \} - E \{ x_1 x_2 \} E \{ x_3 x_4 \} - E \{ x_1 x_3 \} E \{ x_2 x_4 \} - E \{ x_1 x_4 \} E \{ x_2 x_3 \}$$

Seja $\{x(t)\}$ um processo aleatório estacionário de $k^{\text{ésima}}$ ordem de média zero. O Cumulante de $k^{\text{ésima}}$ ordem deste processo, indicado por $C_{k,x}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1})$, é definido como a combinação do cumulante de $k^{\text{ésima}}$ ordem das variáveis aleatórias $x(t), x(t + \tau_1), \dots, x(t + \tau_{k-1})$, ou seja:

$$C_{k,x}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) = \text{cum}(x(t), x(t + \tau_1), \dots, x(t + \tau_{k-1}))$$

Por causa da estacionaridade, o cumulante de $k^{\text{ésima}}$ ordem é unicamente uma função dos $k-1$ atrasos τ . Os espaços $\tau_1 - \tau_2 - \dots - \tau_{k-1}$ constituem o domínio de suporte para $C_{k,x}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1})$.

O cumulante de primeira ordem de um processo estacionário é a média. O cumulante de segunda ordem é chamado de seqüência de autocovariância [13] ou autocorrelação [16].

Para um processo aleatório os cumulantes provêm não somente o valor da correlação de ordem superior mas também a medida da distância do processo aleatório da sua Gaussianidade. Logo se $x(t)$ é Gaussiano os cumulantes são zeros para todos os k . Portanto se recebermos um sinal de fonte não Gaussiano junto com ruído Gaussiano podemos separá-los. Ou de outro modo os ruídos serão excluídos ou minimizados em favor do sinal.

Conclusões

Como vimos a detecção e localização de vazamentos é um problema pertinente e importante do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança, o qual têm sido abordado em várias frentes de pesquisa. Em muitos casos observamos a utilização de técnicas de monitoração das vibrações geradas por estes vazamentos, reforçando a validade destas como meio de aquisição de informações sobre a integridade da instalação. Contudo, vemos que tais informações chegam corrompidas por ruídos, fazendo necessário o uso de ferramentas matemáticas para os seus tratamentos. "Beam-forming" associado com HOSA demonstram, por similaridade com outras aplicações, possuírem um grande potencial não só para a detecção como também para a localização bastante precisa de uma fonte de vazamento, de modo remoto e "on-line", principalmente quando esta informação está corrompida por ruídos.

Referências Bibliográficas

- [1] LOPES, L. A. N., TING, D. K. S.. Ensaios de Eddy-Current na Avaliação do Estado Operacional de Tubos de Geradores de Vapor de Centrais Nucleares. National Conference of Mechanical Engineering, CONEM 2000, Natal Brazil, August 7-11, 2000.
- [2] CIZELJ, L., HAUER, I., ROUSSEL, G., CUVELLIEZ, C.. Probabilistic Assessment of Excessive Leakage Through Steam Generator Tubes Degraded by Secondary Side Corrosion. Nuclear Engineering and Design, n.185, p. 347-359, 1998.
- [3] RODRIGUEZ, P., RAJ, B.. Development of In-service Inspection Techniques for Nuclear Power Plants in India. Int. J. Pres. Ves. & Piping, Northern Ireland, Nº 73, p. 59-68, 1997.
- [4] PÁDUA, Germano X.. Focalização do Feixe Ultra-Sônico Utilizando Lentes Acústicas Aplicadas à Detecção e Dimensionamento de Trincas de Hidrogênio no Aço. UFRJ. Prêmio PETROBRAS de Tecnologia de Dutos, PRODUT 1998, Rio de Janeiro.
- [5] FUKUSHIMA, Kenya, et al. Gas Pipeline Leak Detection System Using the Online Simulation Method. Computers and Chemical Engineering, n.24, p. 453-456, 2000.
- [6] SOUZA, A.L., CRUZ S.L., PEREIRA, J.F.R.. Leak Detection in Pipelines Through Spectral Analysis of Pressure Signals. Brazilian Journal of Chemical Engineering, São Paulo, V.17, n.4-7, Dec. 2000.
- [7] HESSEL, G., et al. A Neural Network Approach For Acoustic Leak Monitoring in the VVER-440 Pressure Vessel Head. Progress in Nuclear Energy, Great Britain, V.34, n.3, p.173-183, 1999.
- [8] HSIUNG, J. T., HIMMELBLAU, D. M.. Detection of Leaks in a Liquid-Liquid Heat Exchanger Using Passive Acoustic Noise. Computers and Chemical Engineering, V.20, n.9, p.1101-1111, 1996.
- [9] ALLEN, Greg. Beamforming Background Information. The University of Texas at Austin, Applied Research Laboratories, USA. <http://www.ece.utexas.edu/~allen/Beamforming/>
- [10] HEWITT, Matthew. Phased Array Beam-forming. Santa Clara University, 1999. www.wgz.org/dircery/am/
- [11] BLOSSER, Stephen. Assistive Listening Devices. Michigan State University, 2000. www.msu.edu/user/blossers/ald.html
- [12] FOX, Christopher G.. U.S. Navy Sound Surveillance System (SOSUS). Pacific Marine Environmental Laboratory, 1999. http://newport.pmel.noaa.gov/geophysics/sosus_system.html
- [13] SWAMI, A., MENDEL, J. M., NIKIAS, C. L.. Higher-Order Spectral Analysis Toolbox User's Guide. The Math Works, inc. 1998.
- [14] LIANG, Ying-Chang, LEYMAN, A. R., SOONG, Boon-Hee. Multipath time delay estimation using higher order statistics. Sch. of Electr. & Electron. Eng., Nanyang Technol. Univ., Singapore. Proceedings of the 1997 IEEE Signal Processing Workshop on Higher-Order Statistics (SPW-HOS '97).
- [15] KINSLER, Lawrence E., et al.. *Fundamentals of Acoustics*. 3rd Edition. USA: John Wiley & Sons, 1982. 480 p. ISBN 0-471-02933-5.
- [16] MENDEL, Jerry M.. Tutorial on Higher-Order Statistics (Spectra) in Signal Processing and System Theory: Theoretical Results and Some Applications. Proceedings of the IEEE, v.79, n.3, p.278-305, March 1991.
- [17] NIKIAS, Chrysostomos L., PETROPULU, Athina P.. *Higher-order spectra analysis: a nonlinear signal processing framework*. New Jersey: Prentice-Hall, 1993. 537 p. ISBN 0-13-678210-8.