

ANÁLISE MODAL OPERACIONAL: MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO BASEADOS EM TRANSMISSIBILIDADE

Iván Darío Gómez Araújo¹ & José Elias Laier²

Resumo

Recentes metodologias formuladas sobre conceitos de transmissibilidade têm surgido como alternativa para a identificação de parâmetros modais de estruturas sob excitações em condição de operação. A identificação nestas metodologias é independente das características do carregamento aplicado na estrutura, sendo uma vantagem importante com respeito a metodologias anteriores que supõem a excitação como ruído branco. Dessa forma, nesta pesquisa são propostas três novas alternativas para identificação modal (frequências naturais e modos de vibração) baseadas em funções de transmissibilidade. A primeira propõe a decomposição de valores singulares sobre matrizes de funções de transmissibilidade escalar com densidade espectral. A segunda propõe o conceito de funções de transmissibilidade multivariável com diferente referência. E a terceira é conduzida a combinar os métodos de identificação propostos com técnicas de separação modal no domínio do tempo. Além disso, uma ferramenta computacional para análise modal é desenvolvida como apoio para as simulações numéricas de verificação das metodologias propostas.

Palavras-chave: Transmissibilidade com densidade espectral de potência. Análise modal operacional. Parâmetros modais. Decomposição de valores singulares.

OPERACIONAL MODAL ANALYSIS: IDENTIFICATION METHODS BASED ON TRANSMISSIBILITY

Abstract

Latest methodologies based on transmissibility concepts have been arising as alternatives for modal parameter identification of structures under excitation in operating condition. Modal parameter identification in these methodologies is independent of the loading characteristic applied to the structure being an important advantage with respect previous methods that assume white noise excitation. Different alternatives of modal identification (natural frequencies and mode shapes) based on transmissibility functions are proposed in this research. The first of them proposes singular value decomposition on scalar transmissibility functions matrices with spectral density. The second proposes the concept of multivariable transmissibility functions with different reference. And third proposes a combination of the modal identification methods with modal separation techniques in time domain. Furthermore, computational tool for modal analysis is developed as a support for the numerical simulations of verification of modal identification methodologies proposed.

Keywords: Power spectrum density transmissibility. Operational modal analysis. Modal parameters. Singular value decomposition.

Linha de Pesquisa: Métodos Numéricos.

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, igomez19@usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, jelaier@sc.usp.br



1 INTRODUÇÃO

A Análise Modal Operacional (Operational Modal Analysis-OMA) conhecido também como análise de vibrações ambientais, excitação natural ou só saída (Output-Only), utiliza somente as medições de resposta da estrutura em condições de operação sujeita a excitações ambientais ou naturais (vento, tráfego, tremores, etc) para identificar as características modais. Recentemente têm surgido metodologias de identificação modal no domínio da frequência para OMA baseadas em conceitos de transmissibilidade. Nessa proposta para análise modal não é necessário que a força de excitação seja considerada como ruído branco, suposição realizada por anteriores metodologias de identificação no domínio da frequência. Neste novo enfoque a força pode ser arbitrária, como ruído colorido, barrido de senos ou impacto, etc, sempre que seja garantido que estas forças consigam excitar as frequências do sistema. As primeiras aproximações consideram a combinação de medições de transmissibilidade sob diferentes condições de carregamento para a identificação de parâmetros modais (Devriendt e Guillaume, 2008). Logo, uma aproximação baseada em transmissibilidade com densidade espectral (PSDT) pode avaliar parâmetros modais a partir de uma única condição de carregamento (Yan e Ren, 2012). Portanto, a partir de aproveitar os recentes trabalhos dirigidos a avaliar parâmetros modais com uso da transmissibilidade procura-se explorar novas alternativas de identificação modal que são mostradas a continuação.

2 MÉTODO BASEADO EM MATRIZES DE TRANSMISSIBILIDADE COM DENSIDADE ESPECTRAL VIA SVD (PSDTM-SVD)

Uma primeira proposta nesta pesquisa estabelece matrizes de transmissibilidade com densidade espectral para estimar frequências naturais e formas modais. As matrizes de transmissibilidade propostas são linearmente dependentes nas colunas ou de posto 1, quando convergem aos pólos do sistema, como mostrado na Equação (1).

$$[T^{z_i}_{x_j, x_j}(i\omega)] = \begin{bmatrix} T^{z_1}_{x_1, x_1}(i\omega) & T^{z_2}_{x_1, x_1}(i\omega) & \dots & T^{z_L}_{x_1, x_1}(i\omega) \\ T^{z_1}_{x_2, x_2}(i\omega) & T^{z_2}_{x_2, x_2}(i\omega) & \dots & T^{z_L}_{x_2, x_2}(i\omega) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T^{z_1}_{x_L, x_L}(i\omega) & T^{z_2}_{x_L, x_L}(i\omega) & \dots & T^{z_L}_{x_L, x_L}(i\omega) \end{bmatrix} \rightarrow \lim_{i\omega \rightarrow i\omega_j} [T^{z_i}_{x_j, x_j}(i\omega)] = \begin{bmatrix} \phi^*_{1l} & \phi^*_{1l} & \dots & \phi^*_{1l} \\ \phi^*_{jl} & \phi^*_{jl} & \dots & \phi^*_{jl} \\ \phi^*_{2l} & \phi^*_{2l} & \dots & \phi^*_{2l} \\ \phi^*_{jl} & \phi^*_{jl} & \dots & \phi^*_{jl} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi^*_{1l} & \phi^*_{1l} & \dots & \phi^*_{1l} \\ \phi^*_{jl} & \phi^*_{jl} & \dots & \phi^*_{jl} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Em que, $T^{z_i}_{x_j, x_j}(i\omega)$ se define como a relação entre a densidade espectral cruzada das saídas x_o e x_k e a densidade espectral cruzada das saídas x_j e x_k , $i\omega_l$ são os polos do sistema e ϕ_{jl} é a amplitude do modo de vibração l no grau de liberdade j . Então, fazendo uma variação do ponto j na matriz de transmissibilidade, surgem L matrizes de transmissibilidade quadradas do tamanho $L \times L$, sendo L a quantidade de pontos de medição. Dessa forma, os valores singulares da matriz de transmissibilidade proposta a partir do segundo valor singular convergem para zero nos polos do sistema e podem ser usados para determinar frequências naturais. Então, no método PSDTM-SVD é proposto um cálculo entre valores singulares para avaliar as frequências naturais em dois passos: 1) calcular a média aritmética da inversa dos valores singulares, a partir do segundo valor singular em cada matriz de transmissibilidade, como.

$$\hat{\Sigma}(i\omega)^{-1} = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \frac{1}{\Sigma(i\omega)^j} \quad (2)$$

$$= \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \left[\frac{1}{\sigma(i\omega)^{j_2}} \quad \frac{1}{\sigma(i\omega)^{j_3}} \quad \dots \quad \frac{1}{\sigma(i\omega)^{j_L}} \right] = \left[\frac{1}{\hat{\sigma}(i\omega)_2} \quad \frac{1}{\hat{\sigma}(i\omega)_3} \quad \dots \quad \frac{1}{\hat{\sigma}(i\omega)_L} \right]$$

2) calcular um produtório entre as médias dos valores singulares de cada matriz de transmissibilidade.

$$\pi(i\omega) = \prod_{i=2}^L \frac{1}{\hat{\sigma}(i\omega)_i} \quad (3)$$

A função $\pi(i\omega)$ contém picos de ressonância que são as frequências naturais do sistema. Uma vez que as frequências de ressonância do sistema são conhecidas, é possível derivar as formas modais a partir do uso do primeiro vetor singular à esquerda na decomposição de valores singulares. Assim uma média dos diferentes vetores singulares faz uma estimativa da forma modal, como.

$$\hat{U}(i\omega)_1 = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L U^j(i\omega)_1 \tag{4}$$

O resultado de simulações numéricas sobre uma viga mostra que o método reduz ainda mais o risco de encontrar frequências naturais que não são parte do sistema em comparação com o método PSDT dado em Yan e Ren (2012). Igualmente, uma aplicação real sobre dados de vibração de uma ponte demonstrou que o método proposto pode ser utilizado para identificar os parâmetros modais de uma estrutura sob condições de carga operacional (ver Figura 1).

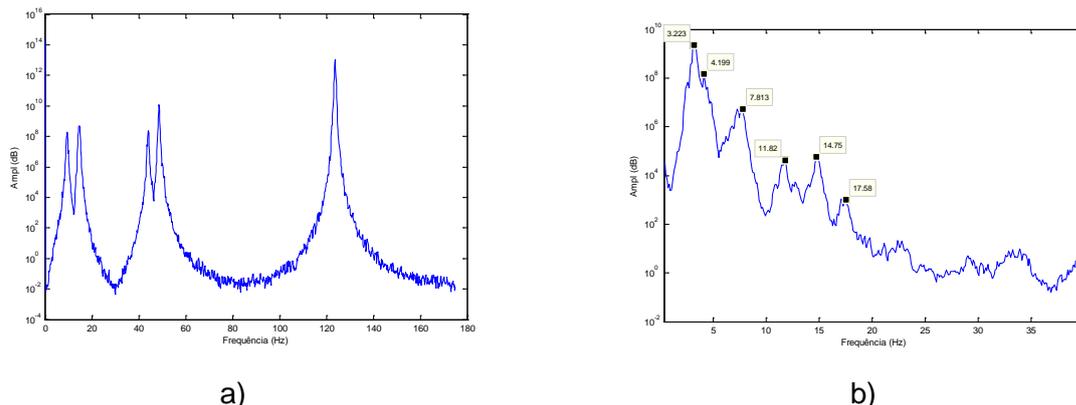


Figura 1 – Exemplo de identificação de frequências naturais com o método PSDTM-SVD a) em um exemplo numérico sobre uma viga e b) sobre dados reais de vibração de uma ponte.

3 FUNCÕES DE TRANSMISSIBILIDADE MULTIVARIÁVEL COM DIFERENTE REFERÊNCIA

Uma segunda proposta estabelece o conceito de funções de transmissibilidade multivariável com diferente referência.

$$[T^z_{x_u x_k}(i\omega)] = [S_{x_z x_u}(i\omega)]^T \left[[S_{x_z x_k}(i\omega)]^T \right]^+ \tag{5}$$

A Equação (5) relaciona a matriz de densidade espectral cruzada entre as respostas Z e U com a matriz de densidade espectral cruzada entre as respostas Z e K. Uma avaliação numérica foi realizada a partir de verificar o cruzamento das funções de transmissibilidade multivariável na ressonância. Os resultados teóricos e de estimação a partir de dados de resposta de um modelo estrutural mostraram que as funções de transmissibilidade multivariável com diferentes referências propostas convergem à mesma amplitude quando se aproximam aos pólos do sistema, portanto, poderiam ser utilizadas para identificação de parâmetros modais. Um exemplo da convergência nos polos do sistema das funções de transmissibilidade propostas é mostrado na Figura 2

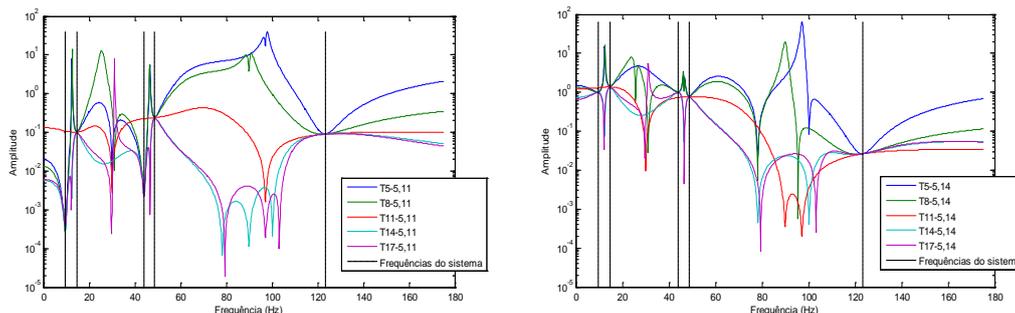


Figura 2 – Funções de transmissibilidade multivariável com diferentes referências.

4 COMBINAÇÃO DE TÉCNICAS DE SEPARAÇÃO MODAL COM METODOS DE IDENTIFICAÇÃO MODAL BASEADOS EM TRANSMISSIBILIDADE

Uma terceira proposta será conduzida a estabelecer uma combinação, ainda não estudada detalhadamente, entre técnicas de pré-processamento do sinal que fazem uma separação da resposta em componentes modais com os métodos de identificação modal baseados em transmissibilidade. Assim, dentro dessas técnicas de separação da resposta encontram-se: 1) as técnicas Blind Source Separation (BSS), (Belouchrani *et al.*, 1997), e 2) a técnica Empirical Mode Decomposition (EMD) (Huang *et al.*, 1998). A aplicação desta combinação pretende melhorar a identificação modal em condições quando as frequências de ressonância do sistema encontram-se muito próximas e com os sinais ruidosos

5 FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE MODAL MYFEM MODAL 2D

Finalmente, devido ao caráter numérico da proposta foi realizado pelo autor o desenvolvimento de uma nova ferramenta para análise modal teórica e de dados de resposta de modelos estruturais tipo pórtico no plano, implementada em MATLAB. A ferramenta chamada de Myfem Modal 2d servirá de apoio para a validação das novas propostas realizadas para identificação modal, visando facilitar a comparação com as características dinâmicas teóricas e os resultados obtidos por meio de outras metodologias de identificação modal, mediante dados de resposta adquiridos de uma análise dinâmica do mesmo modelo estrutural.

6 CONCLUSÕES PARCIAIS

O método PSDTM-SVD proposto reduz ainda mais o risco de estabelecer frequências naturais, que não são do sistema, em comparação com o método PSDT que utiliza uma média normalizada de funções de subtração inversa entre funções de transmissibilidade, que podem conter picos de ressonância não relacionadas às frequências naturais.

As funções de transmissibilidade multivariável propostas podem ser usadas para a identificação de parâmetros modais, já que foi demonstrado que elas convergem à mesma amplitude quando se aproximam aos polos do sistema.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES e CNPq pelo apoio financeiro desta pesquisa.

8 REFERÊNCIAS

BELOUCHRANI, A. et al. A blind source separation technique using second-order statistics. **Signal Processing, IEEE Transactions on**, v. 45, n. 2, p. 434-444, 1997.

DEVRIENDT, C.; GUILLAUME, P. Identification of modal parameters from transmissibility measurements. **Journal of Sound and Vibration**, v. 314, n. 1-2, p. 343-356, Jul 8 2008. ISSN 0022-460X. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000256195100021 >.

HUANG, N. E. et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 454, n. 1971, p. 903-995, 1998. ISSN 1364-5021.

YAN, W.-J.; REN, W.-X. Operational Modal Parameter Identification from Power Spectrum Density Transmissibility. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 27, n. 3, p. 202-217, Mar 2012. ISSN 1093-9687. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000299929700004 >.