



CONTROLE ATIVO HÍBRIDO DE VIBRAÇÃO DE PLACA DE MATERIAL COMPÓSITO

Ivando S. Diniz, Sérgio Frascino M. de Almeida, Luiz Carlos S. Góes

Divisão de Engenharia Mecânica - Aeronáutica - IEMP

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA-CTA

CEP: 12228 – 900, São José dos Campos, SP, Brasil

Email: ivando@mec.ita.br, frascino@mec.ita.br, goes@mec.ita.br.

Fernando José O. Moreira

EMBRAER – Empresa Brasileira de Aeronáutica

São José dos Campos, SP, Brasil

Resumo. *Este trabalho apresenta técnicas experimentais de controle ativo de vibração híbrido tipo HFurRLS em placa de materiais compósito. A placa é constituída de três camadas e possui um atuador piezoelétrico funcionando como fonte primária e um segundo atuando como fonte secundária. Dois acelerômetros foram utilizados para medidas de sinais de referência e de erro. O controle implementado é do tipo híbrido (Feedforward e Feedback) implementado com técnicas recursivas “Recursive Least Square” (RLS). O algoritmo Feedback se caracteriza por processar apenas o sinal do sensor de erro, enquanto que a parte Feedforward processa sinais de dois sensores: referência e erro. Nos experimentos de controle em tempo real, utilizou-se um sistema de desenvolvimento: Ez kit Lite ADSP 21160 da Analog Device. Este processador digital de sinais (DSP) possui duas unidades de processamento funcionando em paralelo com 32/40 bits e capacidade de 600 MFlops. Os programas foram desenvolvidos em linguagem Assembler e C++. Nos testes para análise de desempenho dos algoritmos foram utilizadas entradas com sinais pulsado e pseudo-aleatório de banda larga. Os resultados mostram os espectros dos sinais com controle e sem controle ativo tanto com excitação em banda estreita como banda larga.*

Palavras chaves: *controle ativo, vibração, piezoelétrico, DSP, RLS.*

1. INTRODUÇÃO

O controle ativo de ruído foi concebido por volta de 1934 por Paul Lueg; entretanto, sua aplicação prática só foi possível com o surgimento dos modernos processadores digitais de sinais (Hansen, 1997). Neste trabalho, sinais aleatórios tipo ruído branco excitam os modos de vibração da placa e o algoritmo adaptativo além de identificar esses modos também procura atenuá-los.

No controle ativo estrutural, os atuadores secundários são fontes de vibrações mecânicas (atuadores eletrodinâmicos ou piezoelétricos) para cancelamento ativo do campo de distúrbio primário (Fuller,

Elliott & Nelson, 1996). O controle ativo possui um melhor desempenho no regime de baixas frequências, enquanto que o controle passivo atua melhor em altas frequências. Todavia, o controle ativo pode combinar técnicas passivas e ativas dentro da sua faixa de atuação (Kuo & Morgan, 1996).

O controle em dinâmica estrutural é uma área complexa para sua implementação, pois necessita de conhecimentos nas áreas de processamento digital de sinais, vibrações mecânicas, controle adaptativo, filtros adaptativo (Clark,1998).

A implementação prática comercial geralmente necessita de sistemas com múltiplos sensores e atuadores. Para isto são necessários conhecimentos práticos sobre processadores digitais de sinais especialmente adaptados para esta tarefa. Nos sistemas mais simples é possível desenvolver um modelo analítico utilizando o princípio dos trabalhos virtuais. Todavia em estruturas complexas, faz-se necessário a análise modal através de software de análise numérica via FEM como o Nastran/Patran.

2. DESCRIÇÃO DA MONTAGEM EXPERIMENTAL

O experimento descrito na Fig. (2.1) é constituído dos equipamentos necessários para análise e implementação de controle ativo de vibração em placa. O objetivo básico do experimento é estudar o cancelamento dos modos de vibração da placa em função dos posicionamentos dos sensores e atuadores.

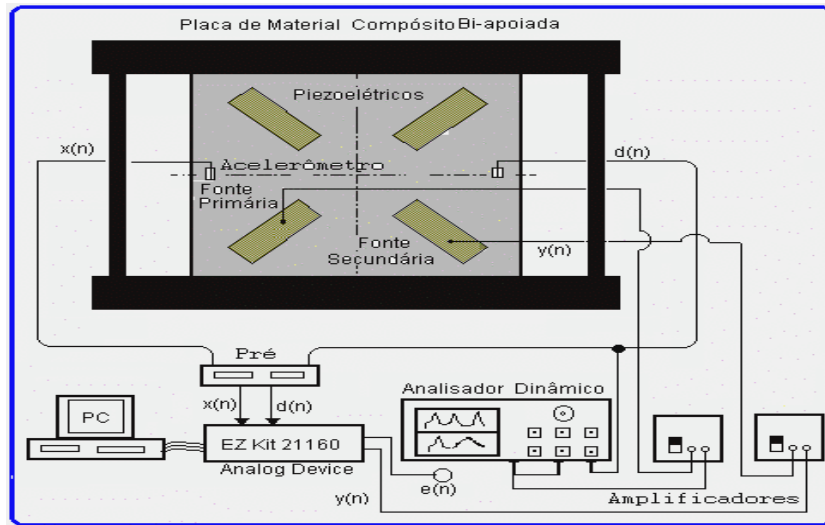


Figura 2.1 Sistema de controle da placa e os equipamentos utilizados.

A estrutura em questão é uma placa de fibra de vidro/epóxi, sendo esse um material representativo na indústria aeroespacial. Não escolhemos fibras mais nobres disponíveis, como de carbono por exemplo, visando economizar o número de atuadores na placa, pois são necessários menos deles para deformarem suficientemente as placas (Donadon, 2000). As propriedades das lâminas estão representadas na Tabela (1).

Tabela 1 Propriedades das lâminas

E_2	ν_{12}	G_{12}	G_{13}	G_{23}	ρ	e_{31}	e_{32}
(Mpa)		(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Ton/mm ³)	N/(V.mm)	N/(V.mm)
30100	0.140	5500	5500	5500	2.1e-09	0	0

Os atuadores piezoelétricos são acionados por amplificadores de potência, utilizados para amplificação do sinal de saída da placa de processamento "Ez kit Lite 21160", bem como para amplificação do sinal de saída do gerador de sinais (interno ao Analisador de Fourier). O analisador é mostrado na Fig.(2.2) que é utilizado para gerar sinais para excitação dos modos de vibração da viga e análise dinâmica espectral dos sinais monitorados.



Figura 2.2. Analisador dinâmico de Fourier

Os atuadores piezoelétricos utilizados para excitação da estrutura são do tipo ACX QP10N e possuem as seguintes especificações nominais :– dimensões: $50.8 \times 25.4 \times 0.381$ mm; peso: $2.8350 \cdot 10^{-3}$ kg; dimensão da cerâmica: $45.974 \times 20.574 \times 0.254$ mm; voltagem máxima: 200 V; força máxima: 62.275 N (200 V)

A tabela (2) mostra os atuadores piezoelétricos usados e as características mecânicas equivalentes baseadas nos dados do fabricante.

Tabela 2. Propriedades dos Atuadores piezoelétricos

E_1 (Mpa)	E_2 (Mpa)	ν_{12}	G_{12} (Mpa)	G_{13} (Mpa)	G_{23} (Mpa)	ρ (Ton/m ³)	e_{31} N/(V.m m)	e_{32} N/(V.m m)
34725.6	34725.6	0.3	13356	13356	13356	7.6e-09	.0127	.0127

Onde E_1 , E_2 são os módulos de elasticidade nas direções x e y respectivamente, ν_{12} é o módulo de Poisson, G_{12} , G_{13} e G_{23} os módulos de elasticidade transversal nos planos xy, xz e yz respectivamente, ρ a densidade, e_{31} e e_{32} são as constantes piezoelétricas.

2.1. EZ-KIT Lite ADSP-21160

O EZ-KIT Lite ADSP-21160 é uma placa de desenvolvimento baseado no ADSP-21160 e está representada na Fig.(2.3). Possui codec de 16 - bit estéreo programável e interfaceamento digital I/O (ADSP-21160M EZ-KIT, 2000).



Figura 2.3. Placa ADSP-21160 EZ-KIT Lite da Analog Device

A placa pode funcionar de maneira autônoma ou conectada à porta paralela de um PC. Um programa é executado no DSP em paralelo com um outro programa no PC, favorecendo a leitura de dados da memória e depuração dos programas em desenvolvimento. Estão incluídos no ADSP-21160 EZ-KIT: compilador de C/C++ e assembler, bibliotecas para processamento digital de sinais, “linker” e um “debugger”.

2.2. Ambiente Integrado de Desenvolvimento

O VisualDSP++2.0 é um ambiente de desenvolvimento e depuração integrado de projetos que permite uma grande facilidade de gerenciamento através da integração das tarefas de edição, compilação, depuração, simulação e emulação de programas. O desenvolvimento de projeto em ambiente integrado minimiza a ocorrência de erros de programação e permite o fácil movimento entre a edição e a construção, eliminando erros de atividades.

2.3. Codec AD1881A

O conversor AD 1881A é um dispositivo para aplicações de alto desempenho. A sua arquitetura compreende dois circuitos independentes incluindo um controlador de áudio digital e um componente analógico de elevada precisão que inclui os conversores digital-analógico (DACs) e analógico-digital (ADCs), um misturador e dispositivos de I/O. Esta concepção de dispositivo favorece as aplicações devido à fácil programação de ganho e/ou atenuação de sinais de entrada e saída.

2.4. ADSP 21160

O ADSP-21160M representado na Fig. (2.4) é o primeiro processador digital de sinais da nova família de DSPs SHARC da Analog Device, otimizado para aplicações tais como o telefone, imagem médica, eletrônica de radar/sonar, comunicações e gráficos 3D (Data Sheet, 2001). O 21160M introduz uma nova arquitetura denotada “Single-Instruction-Multiple-Data (SIMD)”.

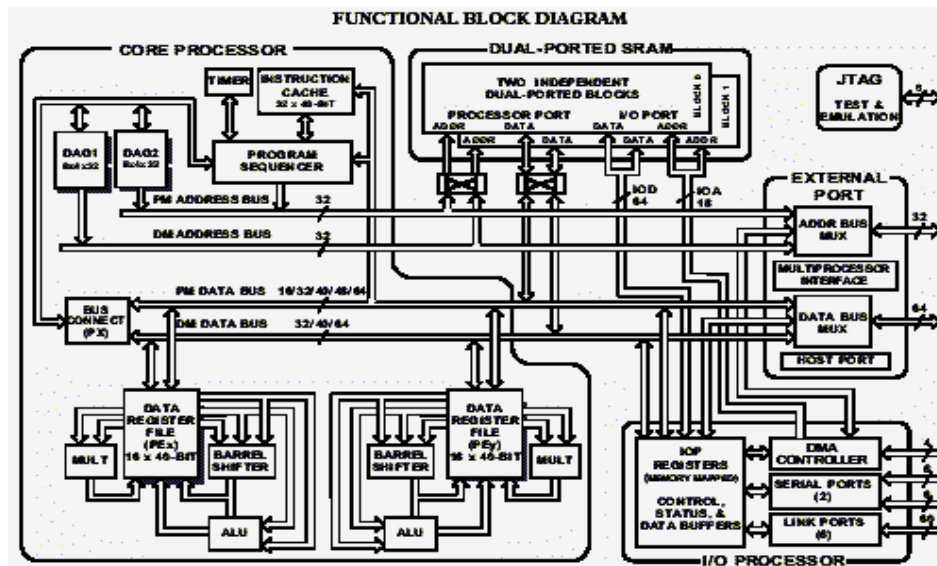


Figura 2.4. Diagrama de blocos do ADSP 21160 Analog Device

Este DSP possui duas unidades computacionais e cada uma consiste de: (1) unidade de lógica aritmética (ALU), (2) multiplicadores de deslocamento executando ambas instruções em um único ciclo. As três unidades dentro de cada central de processamento, são arranjadas na forma paralela, maximizando a capacidade computacional.

3. CONTROLE ATIVO DE VIBRAÇÃO DE UMA PLACA DE MATERIAL COMPÓSITO

A figura 3.1 mostra o esquema do controle ativo digital implementado no DSP, e a estrutura do algoritmo de controle para cancelamento das vibrações aplicado à placa de material compósito.

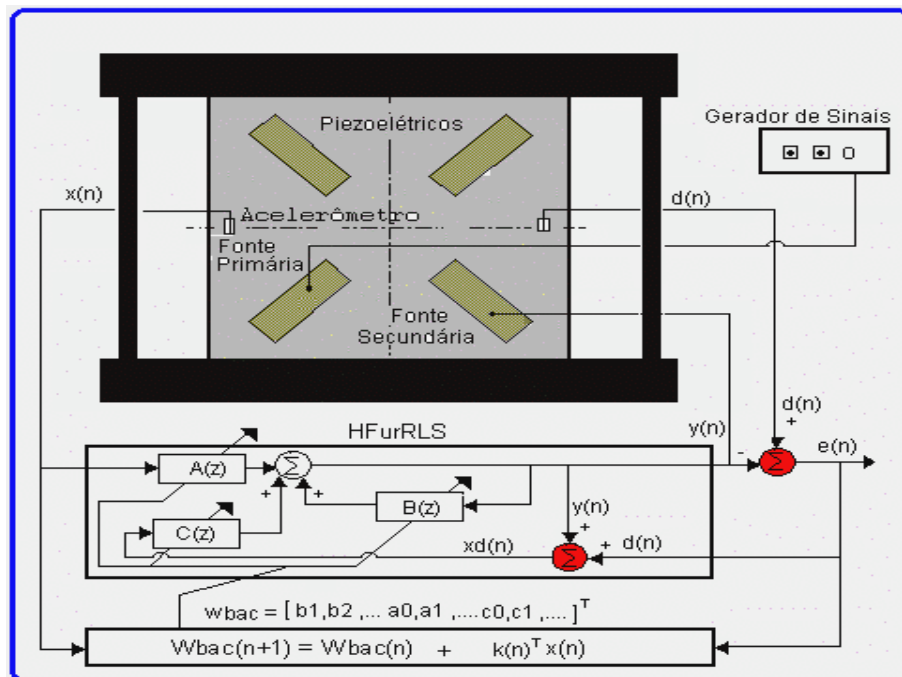


Figura 3.1 Controle ativo de vibração utilizando estrutura "Feedforward" e "Feedback"

O sistema utiliza um ou mais atuadores piezoelétricos como fonte primária de vibração, cuja assinatura é detectada por um acelerômetro, denotado de sinal de referência, $x(n)$. O sinal de vibração a ser minimizado é monitorado com outro acelerômetro, denotado de sinal de distúrbio, $d(n)$. O sinal de referência é processado pelo algoritmo de controle gerando o sinal de controle ativo, $y(n)$. O sinal de controle é amplificado e enviado ao atuador piezoelétricos secundário, responsável pelo cancelamento ativo das vibrações excitadas pela fonte primária. O algoritmo de controle implementado em tempo real é do tipo mínimos quadrados recursivo (RLS) com inclusão de filtros adaptativos na estrutura de realimentação, chamado de algoritmo de mínimos quadrados recursivo híbrido filtrado - HFurRLS (Kuo & Morgan, 1996)

3.1. Descrição do Algoritmo de Controle Digital -HFurRLS

O algoritmo HFurRLS aplicado ao controle ativo de vibração se caracteriza por implementar a dinâmica do atuador, cuja dinâmica foi modelada com fase zero ganho unitário. O diagrama de blocos do sistema está representado na Fig.(3.2)

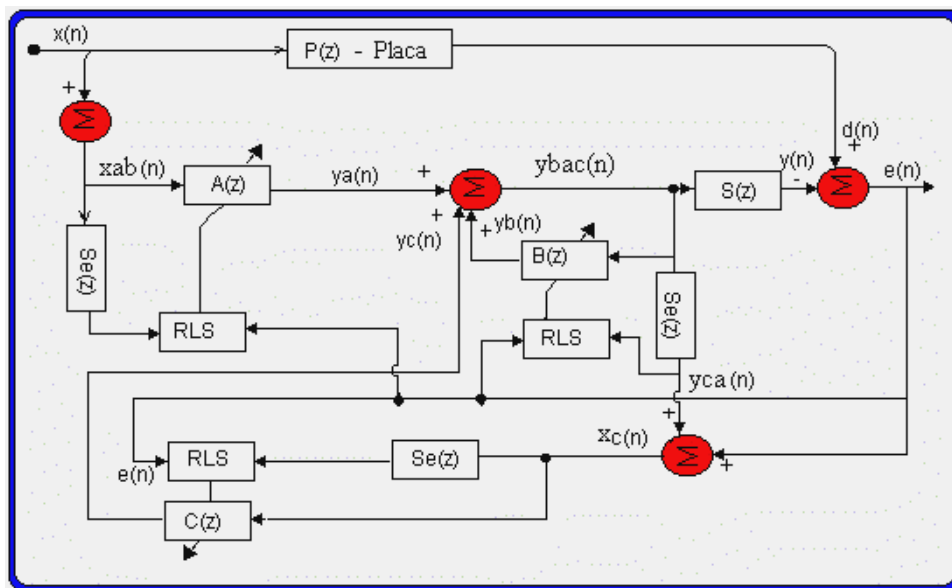


Figura 3.2. Diagrama de blocos do controle ativo de vibração HFurRLS

O sinal de referência, $x(n)$, deve ser armazenado em um vetor e atualizado a cada amostra. O sinal de distúrbio $d(n)$ é utilizado apenas uma vez no cálculo do erro. A idéia básica do controle ativo de vibração com algoritmo "Feedback" e "Feedforward" é obter a saída $y(n)$ a partir dos valores dos sinais $x(n)$, $d(n)$ e $e(n)$. A planta e o atuador são representados por funções de transferências discretas, $P(z)$, e $Se(z)$, respectivamente.

3.2. Algoritmo HFurRLS

Os passos do algoritmo estão resumidos abaixo na seqüência abaixo:

1. Aquisição dos sinais de referências e erros $e(n)$
 $x_{ab}(n)$ e $d(n)$

2. Estimaco do sinal de referência

$$x_c(n) = e(n) + y_{ca}(n)$$

3. Atualizaco do vetor de sinais de referências $x_{ab}(n)$

$$x_{ab}(n+1) = x_{ab}(n); \quad \text{com } 0 \leq n \leq N; x_{ab}(0) = \text{entrada recente};$$

4. Atualizaco do vetor de sinais de saída $x_c(n)$ e N_c o comprimento do filtro.

$$x_c(n+1) = x_c(n); \quad \text{com } 0 \leq n \leq N_c;$$

$$x_c(0) = \text{estimaco recente do sinal de referência } x_x(n);$$

5. Atualizaco do vetor de sinais de saída $y_{bac}(n)$

$$y_{bac}(n+1) = y_{bac}(n); \quad \text{com } 0 \leq n \leq Nb;$$

Nb = comprimento do filtro.

$$y_{bac}(0) = \text{saída recente de } y_{bac}(n);$$

6. Atualizaco do vetor $y_{bac}x_{abc}(n)$ que contm sinais: $y_{bac}(n)$, $x_c(n)$ e $x_{ab}(n)$.

$$y_{bac}x_{abc}(n) = y_{bac}(n); \quad \text{com } 0 \leq n < Nb;$$

$$y_{ca}x_{ac}(n) = x_c(n - Nb); \quad \text{com } Nb \leq n < N_c + Nb;$$

$$y_{bac}x_{abc}(n) = x_a(n - Nb - N_c); \quad \text{com } Nb + N_c \leq n < Nb + N_c + N_a$$

7. Cculo do sinal de saída do filtro $y_{bac}(n)$ para aplicaco no atuador piezoelétrico.

$$y_{bac}(n) = wbac^T(n) y_{bac}x_{abc}(n)$$

8. Cculo do sinal de erro $e(n)$

$$e(n) = d(n) - y_{bac}(n)$$

9. Cculo do vetor temporrio $z(n)$.

$$z(n) = \lambda^{-1}Q(n-1) y_{bac}x_{abc}(n)$$

10. Cculo do ganho de Kalman $k(n)$.

$$k(n) = \frac{z(n)}{y_{bac}x_{abc}(n)^T z(n) + 1}$$

11. Cculo a priori dos pesos do filtro correspondente aos pólos, zeros e realimentaco.

$$wbac(n+1) = wbac(n) + k(n)e(n)$$

12. Cculo a priori da matriz de covarincia

$$Q(n) = \lambda^{-1}Q(n-1) - k(n)z^T(n)$$

13. Retorna ao item 1

3.3. Teste do Algoritmo

O algoritmo HFurRLS foi desenvolvido e testado em linguagem assembler e C++ utilizando o ambiente VisualDSP++2.0 da Analog Device. Os resultados obtidos com a identificação paramétrica de filtros ARMA (Autoregressive Moving Average) para um modelo conhecido e para a placa de material compósito estão apresentados na Fig. (3.3). A figura esquerda mostra os resultados simulados com um modelo conhecido a priori, enquanto que o gráfico do lado direito mostra os resultados experimentais obtidos com o sistema físico real. Em ambos os casos o sinal de erro tende a zero mostrando a eficiência do cancelamento ativo de sinais.

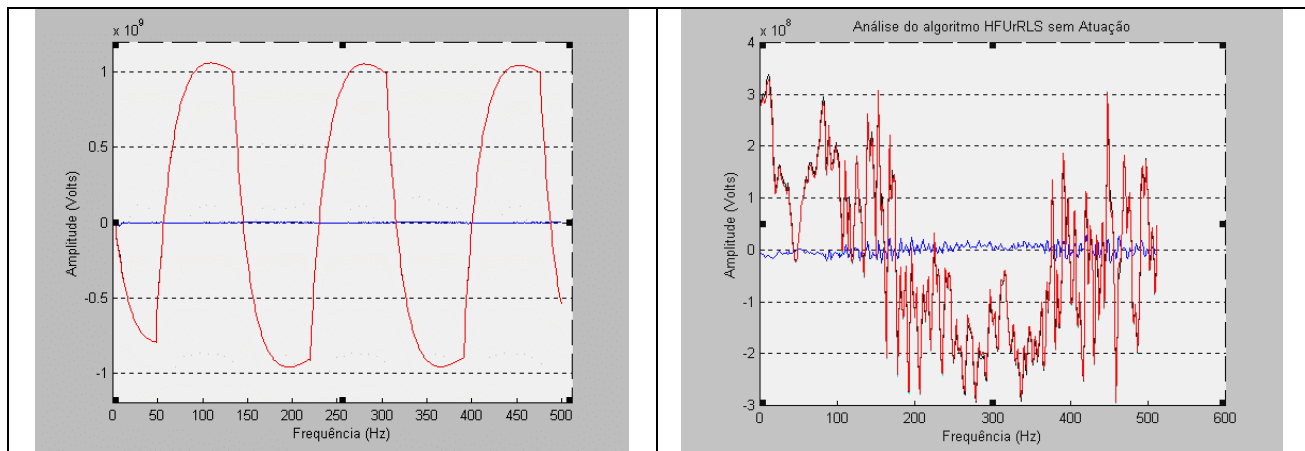


Figura.3.3. Sinais de erro em (azul), de saída y_n (vermelho) e de perturbação, d_n (preto)

4. RESULTADOS

Os gráficos da Fig. (4.1) mostram os espectros dos sinais obtidos com o controle ativo de vibração aplicado nos atuadores individualmente. O gráfico correspondente a linha vermelha representa o sistema sem controle, e o gráfico com linha azul o sistema controlado por um PZT fixado no lado direito inferior, gráfico com linha verde mostra o sistema controlado com o PZT fixado no lado esquerdo inferior e o preto com o PZT fixado no lado esquerdo superior.

5. CONCLUSÃO

O controle ativo de vibração utilizando sistema híbrido HFurRLS apresentou excelentes resultados com a implementação de um filtro de comprimento 06 para sinais em banda larga. Esses estudos mostraram que a aplicação de um algoritmo para detecção do fator de esquecimento é fundamental para redução de tempo no desenvolvimento do algoritmo de controle. O controle ativo de vibração utilizando processador digital de sinais de alto desempenho, como o ADSP 21160 é fundamental para trabalhar com algoritmos de controle mais complexos como o HFurRLS. Todavia, em aplicações profissionais, o cancelamento ativo de vibrações deve ser realizados com vários sensores e atuadores.

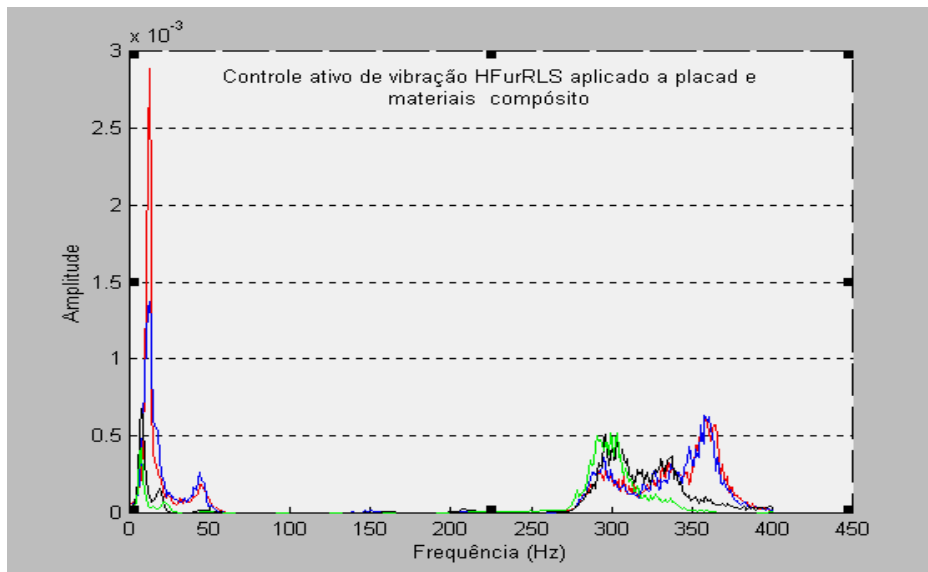


Figura 5.1. Atenuação dos modos de vibração com o algoritmo HFurRLS.

6. AGRADECIMENTOS

A Analog Device (www.analog.com) pela doação dos EZ-KIT Lite ADSP-21160, EZ-KIT Lite ADSP-21065 e todos os livros sobre DSP para realização dos experimentos.

7. REFERÊNCIAS

- ADSP-21160M EZ-KIT Lite Users Guide, 2001, Analog Device, Inc.
 AD1881 Serial Port 16-Bit AC'97 SoundMAX CODEC Data Sheet, 2001, Analog Device, Inc.
 C/C++ Compiler Guide & Reference for the ADSP-2106x Family DSPs, 2001, Analog Device, Inc.
 Data Sheet, 2000, ADSP-21160 DSP Microcomputer Analog Device, Inc,
 Clarc, L. R., and all; 1998, Adaptive Structures – Dynamics & Control, John Wiley & Sons Ltd.
 Development Tools Data Sheet, 2001, ADSP-21000 Family Hardware and Software, Analog Device Inc.
 Fuller C., R. & Elliott S., J. & Nelson P., A., 1996, Active Control of Vibration, Academic Press Limited.
 Hansen, Colin H., & Snyder D., Scott, 1997, Active Control of Noise and Vibration.
 Hardware Reference Manual ADSP-21160, 2001, Analog Device, Inc,
 Instruction Set Reference Manual ADSP-21160, 2001, Analog Device, Inc
 Kuo, Sem M. & Morgan Dennis R., 1996, Active Noise Control Systems: Algorithm and DSP implementations, John Wiley & Sons Ltd.
 Mountain-ICE™ Emulator Hardware User's Guide, 2001, Analog Device Inc.
 Donadon, Mauricio V., 2000, Vibração de Placas Laminadas na Presença de Tensões Induzidas Piezoeletricamente, tese de mestrado, ITA.
 Nelson, P., A. & Elliott S., J., 1992, Active Control of Sound - Academic Press Limited.
 Reference Manual, 1995, DSP / MSP Products, Analog Device, Inc.
 Regalia, Phillip A., 1995, Adaptative IIR Filtering in Signal Processing and Control, Marcel Dekker, Inc.
 VisualDSP++ User's Guide & Reference, 2001, Analog Device, Inc.

HYBRID ACTIVE VIBRATION CONTROL APPLIED TO COMPOSITE PLATES

Ivando S. Diniz, Sérgio Frascino M. de Almeida, Luiz Carlos S. Góes

Divisão de Engenharia Mecânica - Aeronáutica - IEMP

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA-CTA

CEP: 12228 – 900, São José dos Campos, SP, Brasil

Email: ivando@mec.ita.br, frascino@mec.ita.br, goes@mec.ita.br.

Fernando José O. Moreira

EMBRAER – Empresa Brasileira de Aeronáutica

São José dos Campos, SP, Brasil

Abstract. *This work presents the implementation of hybrid active vibration control techniques applied to composite plates. The plate has three layers fiberglass reinforced epoxy with a PZT actuator as the primary source and another one as the secondary source. Two accelerometers were used to measure the reference and error signals. The control system is based on a feedforward and feedback algorithm implemented with a “Recursive Least Square” (RLS) algorithm. The feedback algorithm is characterized by requiring only the error signal whereas the feedforward algorithm requires both the reference and error signals. The development system Ez kit Lite ADSP 21160 from Analog Device was used to develop the control system for the experiments. This digital signal processor has two processing units working in parallel with 32/40 bits at 600 MFLOPS. The codes were developed using Assembler e C++ programming languages. Random and pulsed input signals were used in the tests to assess the performance of the control algorithm. The results compare the plots with and without active control for narrow and broadband excitation.*

Key words: *active control, vibration, piezoelectric, DSP, RLS.*