

# Adaptación de impedancias mecánicas en procesos de transducción piezoeléctrica para visualización ultrasónica

J.L. San Emeterio, P.T. Sanz, A. Ramos  
Departamento de Señales, Sistemas y Tecnologías Ultrasónicas.  
Instituto de Acústica. C.S.I.C. Serrano 144, 28006 Madrid

## Introducción

Uno de los requisitos más importantes impuestos a los transductores piezoeléctricos por las aplicaciones de visualización ultrasónica es tener una gran anchura de banda en emisión / recepción para obtener señales de corta duración, aumentando así la resolución axial. Tres son los métodos clásicos para aumentar la anchura de banda de los transductores piezoeléctricos:

- 1) Amortiguamiento mecánico en la cara trasera del transductor;
- 2) Adaptación de impedancias mecánicas en su cara frontal,
- 3) Adaptación de impedancias eléctricas. En este trabajo, se hace hincapié en los sistemas  $\lambda/4$  de adaptación de impedancias mecánicas, y más concretamente en:

- a) el origen e interpretación de distintos criterios básicos de diseño;
- b) la utilización del modelo KLM de transducción piezoeléctrica en banda ancha, para un análisis de las respuestas temporales y frecuenciales, en modo pulso-eco, al variar el espesor de la capa de adaptación en el intervalo  $(0.2\lambda - 0.4\lambda)$ ; y
- c) un pequeño y seleccionado resumen bibliográfico.

## Criterios básicos de diseño

El elemento transductor piezoeléctrico utilizado para generar los ultrasonidos presenta normalmente una resonancia muy aguda y un notable desajuste entre su impedancia mecánica y la del medio irradiado. La utilización de secciones  $\lambda/4$  en cascada es un proce-

dimiento habitual en microondas para la adaptación de impedancias en un intervalo amplio de frecuencias [1-2]. En ultrasonidos se utiliza el mismo enfoque, aunque el desajuste de las impedancias a adaptar es, generalmente, mucho más notable en este caso.

Desde un punto de vista formal, existen varios criterios para diseñar un transformador de impedancias en banda ancha. Un primer criterio para optimizar el ancho de banda con un mínimo de tolerancia dentro de la banda lo estableció Collin [1], identificando la relación de pérdida de potencia  $P_L$  de la sección adaptadora, a un polinomio de Tchebycheff de grado  $n$  igual al número de secciones utilizadas:

$$P_L = 1 + k^2 T_n^2(\cos \theta / p) \quad (1)$$

donde  $T_n(x)$  es el polinomio de Tchebycheff de grado  $n$ ,  $\theta = (\pi / 2)(f / f_0)$ ,  $p$  es un factor de escala y  $k$  es una constante de tolerancia de la banda de paso. Este criterio proporciona adaptación optimizada en  $n$  frecuencias distintas.

Otro criterio es el conocido como *maximalmente plano*. Un transformador de  $n$  secciones se dice que tiene una banda de paso maximalmente plana si el coeficiente de reflexión y sus  $n-1$  primeras derivadas se anulan a una frecuencia  $f_0$ . Este criterio equivale a identificar la relación de pérdida de potencia a un polinomio par del tipo:

$$P_L = 1 + k^2 \cos^{2n} \theta \quad (2)$$

que tiene  $n$  dobles ceros en  $\theta = \pi / 2$  y por tanto produce adaptación perfecta a una frecuencia  $f_0$ . El ancho de banda que proporciona este criterio es

sensiblemente menor que el que proporciona el criterio anterior.

Sin embargo, el criterio básico de diseño tradicionalmente empleado para adaptar impedancias en banda ancha con secciones en cuarto de onda, ha sido el *binomial*. Este criterio consiste en elegir las impedancias características de las secciones de acuerdo a la siguiente ley empírica: "los logaritmos decimales de las relaciones entre las impedancias características de las secciones en cada discontinuidad siguen los coeficientes de la serie binomial",

$$\log(Z_{i+1} / Z_i) = 2^n C_i^n \log(Z_L / Z_0) \quad (3)$$

siendo  $Z_L$  y  $Z_0$  las impedancias a adaptar mediante  $n$  secciones en cuarto de onda, y  $Z_i$  la impedancia de la sección  $i$ . Para una y dos secciones, el método binomial coincide con el maximalmente plano, quedando definidas las impedancias características de las secciones de adaptación por:

$$\begin{aligned} \text{Una capa: } Z_1 &= (Z_0 Z_L)^{1/2}; \\ \text{Dos capas: } Z_1 &= Z_L^{1/4} Z_0^{3/4}, \\ Z_2 &= Z_0^{1/4} Z_L^{3/4} \end{aligned} \quad (4)$$

Para transformadores de 3 secciones y relaciones  $(Z_L / Z_0)$  menores de 5, el transformador binomial no se aparta apreciablemente del maximalmente plano.

## Simulación por ordenador de estructuras multicapas

En gran parte de las aplicaciones de imagen por ultrasonidos, el elemento

transductor piezoeléctrico puede ser representado, con buena aproximación, mediante un modelo unidimensional de transducción en banda ancha. En particular, el modelo KLM [3] tiene la ventaja de conservar explícitamente los aspectos de línea de transmisión presentes en la naturaleza del transductor piezoeléctrico, facilitando la interpretación física de los diferentes esquemas de adaptación de impedancias mecánicas. Una descripción de la estructura de este y otros modelos circuitales, así como la metodología matricial adoptada para el desarrollo de programas de simulación, puede encontrarse en trabajos previos [4-5].

Una capa de adaptación de impedancias puede considerarse como una línea de transmisión mecánica, que se acopla a la puerta mecánica frontal del elemento piezoeléctrico, y que queda caracterizada por:

- a) su impedancia característica  $Z_c = \rho v_c$ ;
- b) la velocidad de propagación  $v_c$ ;
- c) su espesor  $d_c$  (longitud de la línea).

Las ecuaciones que relacionan las fuerzas  $F$  y velocidades  $u$  en las caras  $i$ , e  $i+1$ , de una estructura multicapa son:

$$\begin{bmatrix} F_{i+1} \\ F_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AZ_c / (jtg\gamma_c) \\ AZ_c / (jsen\gamma_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{i+1} \\ u_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

siendo  $A$  el área de las secciones de adaptación, y  $\gamma_c = k d_c = w d_c / v_c$ .

En esencia, la capa de adaptación transforma la impedancia mecánica del medio irradiado en una carga compleja, cuyas características dependen de  $Z_c$ ,  $v_c$ , y  $d_c$ , con un notable efecto sobre la respuesta en frecuencia del transductor. Su tratamiento como cuádrupolo permite una fácil incorporación a los programas de simulación.

Los diversos criterios básicos de diseño y optimización de secciones de adaptación de impedancias mecánicas han hecho hincapié tradicionalmente en los aspectos relacionados con las impedancias características del material, prestándose en general escasa atención a la variabilidad en espesores. Sin

embargo, como en las aplicaciones ultrasónicas a alta frecuencia es difícil construir capas delgadas del material de adaptación con un espesor adecuadamente controlado, consideramos interesante analizar este aspecto.

En este sentido, considerando una única capa de adaptación cuya impedancia característica es la óptima de acuerdo al criterio clásico ( $Z_1 = (Z_0 Z_L)^{1/2}$ ), se analiza a continuación la evolución que presentan las respuestas frecuenciales y temporales de un transductor al variar el espesor de dicha capa. La Figura 1, muestra dichas respuestas, en modo pulso-eco, calculadas para un transductor piezoeléctrico previamente utilizado en la optimización de un proceso de inspección por ultrasonidos [6]. Se trata de un transductor de 1.1MHz, construido a partir de un disco cerámico tipo PZT de 20 mm de diámetro, con un amortiguamiento trasero moderado ( $Z_B = 5.4 \times 10^6 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), radiando en agua, y suponiendo unas condiciones eléctricas de circuito abierto en recepción y excitación impulsional en transmisión. Las respuestas que se presentan están calculadas, utilizando el modelo KLM [5], para espesores de la capa de adaptación en el in-

tervalo ( $0.2\lambda - 0.4\lambda$ ), siendo  $\lambda = v_c / f_0$ , y  $f_0$  la frecuencia de resonancia fundamental del elemento piezoeléctrico. La evolución que presentan los picos de la banda frecuencial en emisión/recepción es similar a la presentada por Silk [7], aunque en los ejemplos presentes el rango de variabilidad del espesor es más amplio. Se puede observar como la evolución temporal de las señales cambia poco, tanto en forma como en amplitud, al variar el espesor de la capa en el intervalo  $(\lambda_p/4 = 0.25\lambda) - (\lambda_s/4 = 0.277\lambda)$ . La consideración de condiciones eléctricas distintas, tanto para la excitación como para la recepción, puede modificar estos resultados mercediendo un estudio teórico/experimental específico.

### Otros aspectos específicos en visualización ultrasónica

Se incluye a continuación una selección de referencias bibliográficas de interés tanto en los aspectos teóricos como en los experimentales, específicas en adaptación de impedancias mecánicas en ultrasonidos [8-18]. Parte de estos trabajos analizan esquemas de

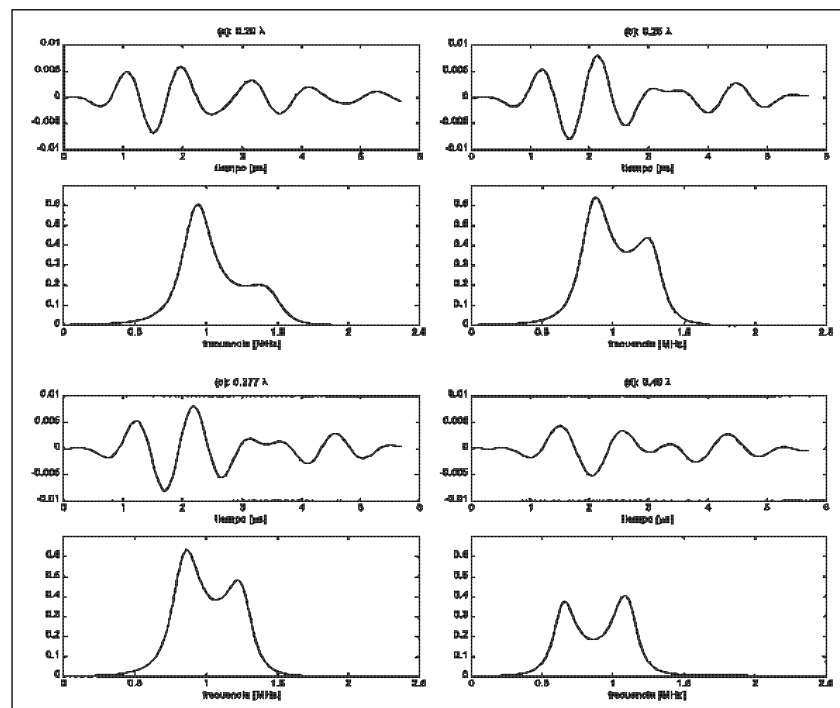


Figura 1. Evolución de las bandas frecuenciales y de las respuestas temporales, en modo pulso eco, de un transductor piezoeléctrico,  $f_0 = 1.1\text{MHz}$ , al variar el espesor de la capa de adaptación en el intervalo ( $0.2\lambda - 0.4\lambda$ ).

adaptación multicapa. Sin embargo, es difícil encontrar materiales adecuados para construir secciones múltiples de adaptación, con impedancias mecánicas adecuadas a los criterios de optimización. La dificultad de fabricar capas delgadas con el espesor adecuado, así como la influencia de las capas de pegamento a alta frecuencia, son también factores limitativos. Esto hace que, aunque es bien conocido el hecho de que en general el ancho de banda aumenta con el número de secciones en cuarto de onda empleadas, en la práctica es poco habitual construir transductores

con más de una capa de adaptación.

Existen otros aspectos que pueden modificar los análisis anteriores y que no están contemplados en los trabajos clásicos. Por ejemplo, cuando el transductor piezoeléctrico actúa como receptor en un proceso pulso-eco, en un contexto de laboratorio, trabaja normalmente en condiciones próximas al circuito abierto, obteniéndose el máximo de la función de transferencia en recepción para la frecuencia de antiresonancia. Esto determina que la frecuencia adecuada para una adaptación óptima de la banda en emisión, sea muy distinta a la

frecuencia adecuada para una adaptación óptima de la banda en recepción, presentándose así una complejidad adicional. Estas frecuencias de adaptación dependen también de la posible conexión de circuitos de amplificación, sintonización y acoplamiento, con carácter frecuentemente reactivo [6].

### Agradecimiento

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto CICYT TAP94-0812-C02-01

### Bibliografía

- [1] R.E. Collin, "Theory and design of wide-band multisection quarter-wave transformers", Proc. IRE, pp. 179-185 (1955).
- [2] G.Matthaei,L.Young,E.M.T.Jones,"Microwave filters, impedance matching networks, and coupling structures", Artech House (1980).
- [3] R. Krimholtz, F. Leedom, G. Matthaei, "New equivalent circuits for elementary piezoelectric transducers", Electronics Letters, pp. 398-399 (1970).
- [4] J.L. San Emeterio, P.T. Sanz, A. Ramos, E. Riera, "Modelado de transductores piezoeléctricos multicapa para ecografía. I.- Análisis en el dominio de la frecuencia; II.- Representaciones circuitales equivalentes", Mundo Electrónico, N° 186 y N° 187, pp. 85-90 y pp. 159-165 (1988).
- [5] J.L. San Emeterio, P.T. Sanz, E. Riera, A. Ramos, "Una implementación del modelo KLM para transductores piezoeléctricos en modo espesor", Anales de Física, Vol. 84, pp. 11-19 (1988).
- [6] A. Ramos, J.L. San Emeterio, P.T. Sanz, "Electrical matching effects on the piezoelectric transduction performance of a through-transmission pulsed process", Ferroelectrics (aceptado) (1997).
- [7] M.G. Silk, "Predictions of the effect of some constructional variables on the performance of ultrasonic transducers", Ultrasonics, pp. 27-33 (1983).
- [8] P.J. Highmore, "Impedance matching at ultrasonic frequencies using thin transition layers", Ultrasonics International 1973 Conference Proceedings, pp. 112-118 (1973).
- [9] J.H. Goll, B.A. Auld, "Multilayer impedance matching schemes for broadbanding of water loaded piezoelectric transducers and high Q electric resonators", IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-22, pp. 52-53 (1975).
- [10] F. Lakestani, J.C. Baboux, P. Fleischmann, "Broadening the bandwidth of piezoelectric transducers by means of transmission lines", Ultrasonics, pp. 176- 180 (1975).
- [11] J. H. Goll,"The design of broad-band fluid-loaded ultrasonic transducers",IEEE Trans.Sonics and Ultrason., pp. 385-393 (1979).
- [12] C. S. Desilets, J.D. Fraser, G.S. Kino, "The design of efficient broad-band piezoelectric transducers", IEEE Trans. Sonics and Ultrason., pp. 115-125 (1978).
- [13] J. Souquet, P. Defranould, J. Desbois, "Design of low-loss wide-band ultrasonic transducers for noninvasive medical applications", IEEE Trans.Sonics and Ultrason., pp. 75-81 (1979).
- [14] Y. Jayet, F. Lakestani, M. Perdrix, "Simulation and experimental study of the influence of a front face layer on the response of ultrasonic transmitters", Ultrasonics, pp. 177-183 (1983).
- [15] F. Chinchurreta, "Modelos teóricos para sistemas de adaptación de impedancia acústica en transductores ecográficos". Informe técnico. Instituto de Acústica (C.S.I.C.) (1985).
- [16] H.W. Persson, C.H. Hertz, "Acoustic impedance matching of medical ultrasound transducers", Ultrasonics, pp. 83-89 (1985).
- [17] T. Inoue, M. Ohta, S. Takahashi, "Design of ultrasonic transducers with multiple acoustic matching layers for medical applications", IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, N° 1, pp. 8-15 (1987).
- [18] T. L. Rhyne, "Computer optimization of transducer transfer function using constraints on bandwidth, ripple, and loss", IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, N° 6, pp. 1136-1149 (1996).