

INSTITUTO MEXICANO DE ACUSTICA
ASOCIACION MEXICANA DE INGENIEROS Y TECNICOS EN
RADIODIFUSION (PUEBLA)
THE MEXICAN INSTITUTE OF ACOUSTICS
MEXICAN ASSOCIATION OF BROADCAST ENGINEERS AND TECHNICIANS
(Puebla)



18 CONGRESO INTERNACIONAL MEXICANO DE ACÚSTICA (18th MEXICAN
INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS)

CHOLULA, PUEBLA, MEXICO 16 - 18 NOVIEMBRE, 2011 (November)

AC2 PARÁMETROS DE RESONADORES ACÚSTICOS
EN UNA BASE DE DATOS DE RUIDOS

Maximino Peña Guerrero
José de Jesús Negrete Redondo
Manuel González Hernández

AC2 PARÁMETROS DE RESONADORES ACÚSTICOS EN UNA BASE DE DATOS DE RUIDOS

Maximino Peña Guerrero
José de Jesús Negrete Redondo
Manuel González Hernández

Academia de Acústica, Escuela Superior Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, Av. Instituto Politécnico Nacional S/N, Zacatenco D. F., México. Tel: 5 729 6000 - 54652 y 54616. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo . mail: mpenag@ipn.mx

RESUMEN

Se presenta una metodología para construir una base de datos utilizando un modelo con tubos acústicos de una fuente de señal de ruido. Cada sección del modelo es un tubo con un diámetro que cambia de acuerdo con el valor (coeficiente de reflexión) que se calcula con el método de correlación de dos señales: una original y la otra predecible (auto-correlación). Cada coeficiente calculado es la función de área de un tubo individual. La concatenación de varios tubos de diferente tamaño representan, de una manera aproximada, la figura geométrica de una fuente sonora, por ejemplo, el ruido de una máquina en funcionamiento normal. Los 10 coeficientes de reflexión que se obtienen por cada ruido se almacenan en una entrada de una base de datos de ruidos. Esto nos sirve para identificar y discriminar un ruido característico de otros muchos.

Palabras clave: mantenimiento automático, tubos resonantes, ruido, base de datos de ruidos.

ABSTRACT

A methodology is presented to build a database using a model with acoustic tubes of a noise signal source. Each section of the model is a tube with a diameter that changes agreement with the value (reflection coefficient) that is calculated with the method of correlation of two signals: an original one and the other one predictable (autocorrelation). Each calculated coefficient is an individual tube area function. The concatenation of several tubes of different size represents, in an approximate way, the geometric figure of a sound source, for example, the noise of a machine in normal operation. The 10 reflection coefficients that are obtained by each noise are stored in a noises database entrance. This is good us to identify and to discriminate against a characteristic noise of other many.

Palabras clave: automatic maintenance, resonant tubes, noise, noises database.

Introducción

Una máquina cuando funciona correctamente produce un ruido característico de su buen funcionamiento. A partir de este sonido, un experto humano puede inferir el estado funcional de dicha máquina. Sin embargo, para realizar lo anterior de una manera automática es necesario capturar el sonido y hacer un procesamiento digital de la señal con el fin de extraer algunos coeficientes numéricos, de tal forma que el sistema digital pueda distinguir entre una señal y la otra.

Con estos parámetros construimos un filtro para separar algunas frecuencias características de un tipo de sonido. Para diseñar un filtro analógico normalmente se utiliza las transformadas de Laplace y Fourier, mientras que para diseñar un filtro digital se utilizan la transformada discreta de Fourier y la transformada Z. Pero también podemos utilizar solamente las funciones de $\sin(x)$ y $\cos(x)$, entre otras menos conocidas [1].

Un filtro ya sea analógico o digital tiene sus representaciones equivalentes en la naturaleza de una manera física. Por ejemplo, un circuito resonante RLC (Figura [1]), un resonador Helmholtz, un sistema masa resorte, la sección de un tubo (Figura [2]), el tracto vocal, y en

general, cualquier fenómeno físico que involucre movimientos ondulatorios formales y físicos. En suma, cualquier filtro puede ser descrito por una función de transferencia que relaciona la salida con la entrada ($H(s)$, $H(z)$, etc.) [2].

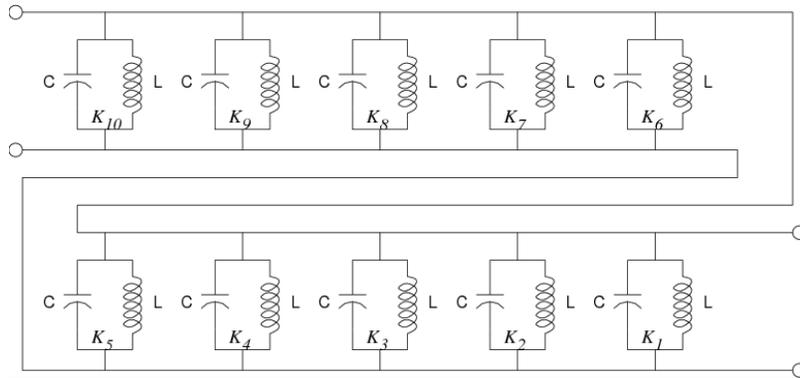


Figura 1: Modelo eléctrico equivalente

Utilizando el análisis de predicción lineal es posible extraer de una señal varios componentes numéricos que pueden servir para el reconocimiento de patrones de señal de sonido: (a) los coeficientes de predicción lineal; (b) las raíces de un polinomio predictor; (c) coeficientes *cepstrales*; (d) la respuesta a un impulso del filtro; (e) coeficientes de autocorrelación; (f) coeficientes de autocorrelación de los coeficientes; (g) coeficientes de una función logarítmica del área de un tubo acústico; (h) la energía de la señal; y (i) los coeficientes de reflexión de una onda sonora dentro de un tubo [4][5].

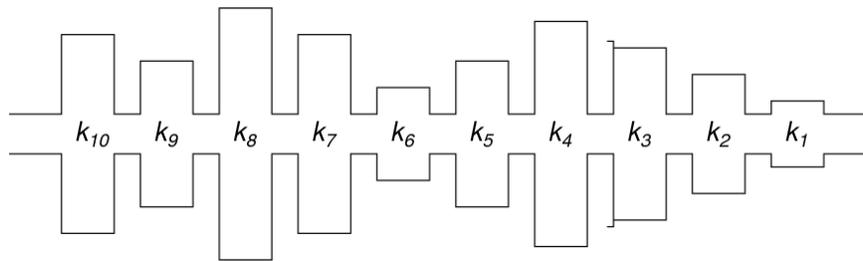


Figura 2: Modelo con tubos

Extracción de los parámetros del ruido

Para construir nuestro modelo necesitamos los coeficientes de reflexión. Éstos se obtienen extrapolando el valor de una muestra de señal $x(n)$ desde k muestras anteriores $x(n-1)$, $x(n-2)$, ..., $x(n-k)$. Para ello se minimiza el error que existe entre $x(n)$ y $x(n-i)$ utilizando *mínimos cuadrados* para calcular el *error cuadrático medio* E dentro de un intervalo n de N muestras máximo. De esta manera, los coeficientes así obtenidos a_i forman un vector representativo de una señal sonora de entrada [3].

$$\tilde{x}(n) = \sum_{i=1}^k a_i \cdot x(n-i)$$

$$E = \sum_n e^2(n) = x(n) - \sum_{i=1}^k a_i \cdot x(n-i)$$

para $0 \leq n \leq N-1$

donde:

$x(n)$	muestra de referencia (señal original)
$\tilde{x}(n)$	muestra predicha
n	intervalo de las muestras
i	índice de una muestra anterior
k	máximo de muestras anteriores
a_i	coeficiente de una muestra
N	tamaño de un conjunto de muestras
E	mínimo valor cuadrático medio.

Resolviendo E para $a_j \mid 1 \leq j \leq k$

$$\frac{\partial E}{\partial a_j} = 0 \quad 1 \leq j \leq k$$

$$\begin{aligned} & \sum_n x(n-j) \cdot \left[x(n) - \sum_{i=1}^k a_i \cdot x(n-i) \right] = \\ & \sum_n x(n-j) \cdot x(n) - \sum_{i=1}^k a_i \cdot \sum_n x(n-j) \cdot x(n-i) = \\ & C_{j0} - \sum_{j=1}^k a_i \cdot C_{ji} \end{aligned}$$

donde:

$$C_{ji} = \sum_n x(n-j) \cdot x(n-i)$$

Colocando una ventana rectangular en el intervalo $0 \leq n \leq N-1$, se anulan las muestras que se encuentran fuera de dicho intervalo limitando el valor de n . Si de esto resulta que $C_{ij} = C_{ji} = r_{|i-j|}$, entonces los valores de $r_{|i-j|}$ son los *coeficientes de una matriz de autocorrelación* (Toeplitz) que se resuelve con el método recursivo de *Levinson-Durbin*.

Con los coeficientes de reflexión que se han obtenido construimos un filtro digital que sirve para reconstruir la señal original. En la Figura [6] se muestra el ruido que produce un motor en funcionamiento normal. En los cuadros [1] y [2] se presentan los coeficientes de reflexión de la señal de ruido [6].

$$\sum_{i=1}^k r_n(|j-i|) \cdot a_i = r_n(j) \quad 1 \leq j \leq k$$

o de manera matricial.

$$\begin{bmatrix} r_n(0) & r_n(1) & r_n(2) & \dots & r_n(k-1) \\ r_n(1) & r_n(0) & r_n(1) & \dots & r_n(k-2) \\ r_n(2) & r_n(1) & r_n(0) & \dots & r_n(k-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_n(k-1) & r_n(k-2) & r_n(k-3) & \dots & r_n(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_n(1) \\ r_n(2) \\ r_n(3) \\ \vdots \\ r_n(k) \end{bmatrix}$$

Un filtro todo polos es un filtro FIR (*Finite Impulse Response*) que en nuestro caso funciona como un filtro inverso. En la Figura [4] se muestra la estructura de este filtro. Un filtro *lattice* todo polos es una cascada de redes de dos puertos. Una red de dos puertos se define por el valor de sus coeficientes de reflexión. En la Figura [3] se muestra la estructura *lattice* con 10 coeficientes de reflexión. La función que relaciona la entrada con la salida es

$$H(z) = \frac{1}{A(z)}$$

Para 10 coeficientes, la ecuación de diferencias correspondiente es:

$$y(n) = b_0x(n) - a_0y(n) - a_1y(n-1) - a_2y(n-2), \dots, -a_9y(n-9)$$

Además de lo expuesto anteriormente, existe una equivalencia entre una estructura de filtro *lattice* (Figura [4]), una red eléctrica que contiene varios circuitos tanque resonantes (Figura [1]), y un modelo de tubos resonantes (Figura [2]). Utilizando la aplicación de Ananya Misra, Ge Wang y Perry Cook *rt_lpc: real time LPC+analysis +syntesis+visualization* (http://soundlab.cs.princeton.edu/software/rt_lpc) se muestra un patrón de ruido capturado en tiempo real (Figura [5]). Por otro lado, la Figura [6] se muestra una señal de ruido original, la señal de error que se obtiene calculando los coeficientes de predicción, y la señal de salida que se obtiene con un filtro que utiliza como parámetros a dichos coeficientes

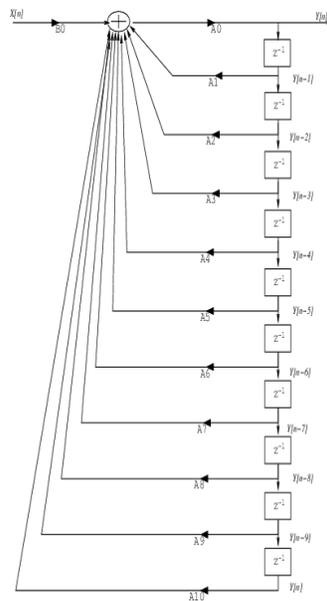


Figura 3: Modelo en forma directa del filtro todo polos.

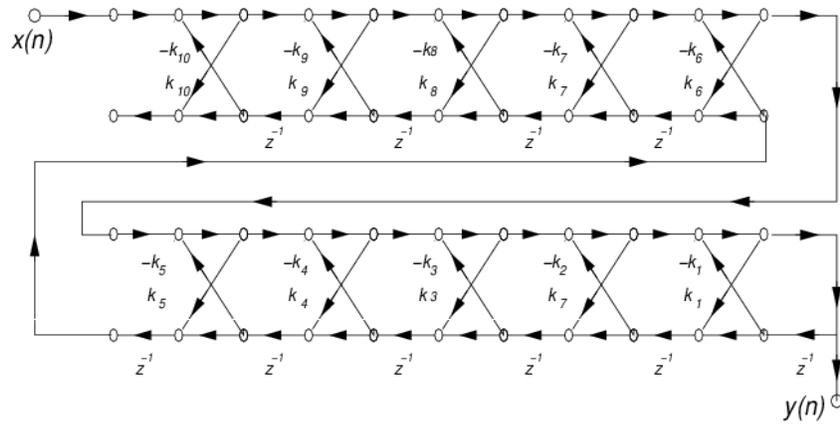


Figura 4: Modelo con filtro celosía (*lattice*) todo polos

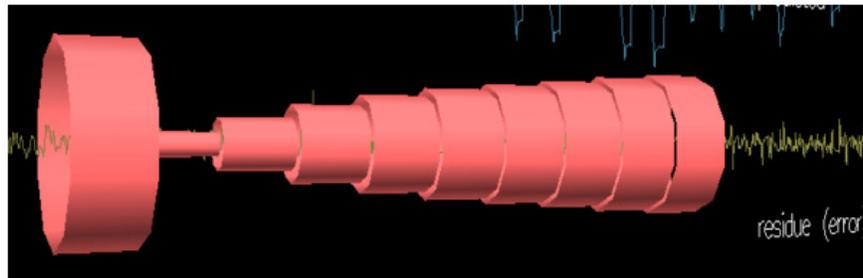


Figura 5: Modelo con tubos celosía en tiempo real con `rt_lpc.exe` (cortesía)

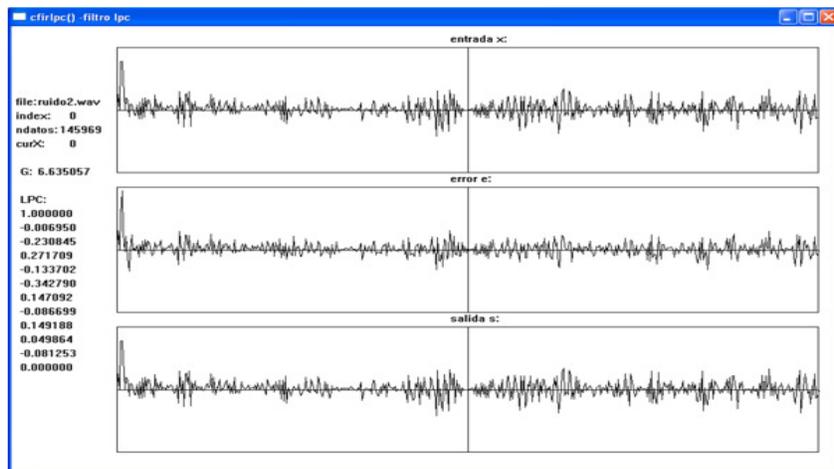


Figura 6: Señal original, de error, y la señal reconstruida.

Resultados y conclusiones

En el laboratorio de acústica y utilizando el método de *Levinson-Durbin* calculamos 10 coeficientes de reflexión y 10 coeficientes de predicción. Para esto, programamos en C/C++, las siguientes funciones: (a) *getfac()*, calcular los valores de autocorrelación de la señal; (b) *getcref()*, calcular los coeficientes de reflexión; (c) *getlpc()*, calcular los coeficientes de reflexión. Estas y otras funciones de apoyo son controladas por un programa principal (*test.c*). En la Figura [6] se puede ver tres señales: la señal original, el error producido al calcular los coeficientes, y la señal de salida la cual se recupera utilizando un filtro cuyos parámetros son los coeficientes de predicción lineal. Por otro lado en el Cuadro [1] se muestran los coeficientes de reflexión obtenidos, y en el Cuadro [2] se muestran los coeficientes de predicción que se obtuvieron a partir de una fuente de señal ruidosa producida por un motor de inducción. Con una aplicación externa (*rt_lpc*) se puede apreciar en la Figura [5] un tubo el cual corresponde a la susodicha señal ruidosa. Finalmente, en el anexo se muestra el código fuente mas relevante de nuestro sistema.

RC[1] = -0.999814	A[1] = 1.000000
RC[2] = 0.300585	A[2] = -0.895069
RC[3] = 0.394866	A[3] = -0.220949
RC[4] = 0.302412	A[4] = -0.012718
RC[5] = 0.231131	A[5] = -0.030027
RC[6] = 0.395477	A[6] = -0.178566
RC[7] = -0.034947	A[7] = 0.393647
RC[8] = 0.084053	A[8] = -0.136563
RC[9] = 0.121510	A[9] = -0.049742
RC[10] = 0.102158	A[10] = 0.028803

Cuadros 1 y 2 : Coeficientes de reflexión y coeficientes de predicción lineal para un tubo.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo proporcionado por las autoridades del Instituto Politécnico Nacional, la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas, la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación., así como a las autoridades de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Referencias y bibliografía

- [1] Hamming R. W., *Digital Filters*, 3rd. ed., Dover, 1989. 284 pgs. Bell Laboratories.
- [2] Hayes H. Monson., *Theory and Problems of Digital Signal Processing*, Schaum's McGraw-Hill, 1999. 432 pgs.
- [3] Ingle Vinay K., John G. Proakis., *Digital Signal Processing using MATLAB*, 2nd. ed., CENEAGE Learning Bookware Companion Series, 2007. 605 pgs.
- [4] Rabiner L. R., R. W. Schafer, *Digital Processing of Speech Signals*, Prentice, Hall, 1978.
- [5] Rabiner L. Juang, *Fundamentals of Speech Recognition*, Prentice Hall, 1993.
- [6] Rodríguez M., E. Iglesias, R. Martínez, E. Muñoz, "Alternativas para síntesis de voz", *Mundo Electrónico*, No. 144, 1984, pp. 67-79.