

DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE VUELO DE SEÑALES ULTRASÓNICAS, CON RESOLUCIÓN SUPERIOR A UN PERIODO DE MUESTREO, POR ANÁLISIS DE FASE

REFERENCIA PACS: 43.58.Dj

Ibáñez Rodríguez, A.; Parrilla Romero, M; García Izquierdo, M. A.; Martínez Graullera, O.
Instituto de Automática Industrial (CSIC)
Ctra. Campo Real, Km. 0,200. La Poveda
Arganda del Rey (Madrid)
España
Tel.: 34 91 871 19 00
Fax: 34 91 871 70 50
E-Mail: aibanez@jai.csic.es

ABSTRACT

Time delay measurements can be performed by frequency domain signal analysis. Estimation of time delays, with resolution lower than the sampling period, using the phase curve is analysed, and influence of noise in estimations is presented, in order to determine under what conditions the method can be applied.

RESUMEN

La medida del retardo entre señales puede ser realizada mediante su análisis en el dominio de la frecuencia. En este trabajo se estudia la estimación de estos tiempos, con resolución inferior a un periodo de muestreo, a partir de las curvas de fase de las señales. Se describen las condiciones en que puede ser utilizado, y se estudia la influencia que sobre las estimaciones tiene el ruido presente en la señal.

INTRODUCCIÓN

Determinar con precisión el retardo entre señales es un problema frecuente en multitud de aplicaciones: ultrasonidos, comunicaciones, biomedicina, caracterización de materiales, etc. El problema puede ser formulado en los siguientes términos: sean $x(t)$ y $s(t)$ señales formadas por una componente $r(t)$ común, salvo un retardo D y un factor de escala K , y componentes de ruido $g_x(t)$ y $g_s(t)$. Se muestrean las señales, con un periodo T_s , obteniéndose las secuencias:

$$x(n) = r(n) + g_x(n)$$

$$s(n) = K \cdot r(n - D) + g_s(n)$$

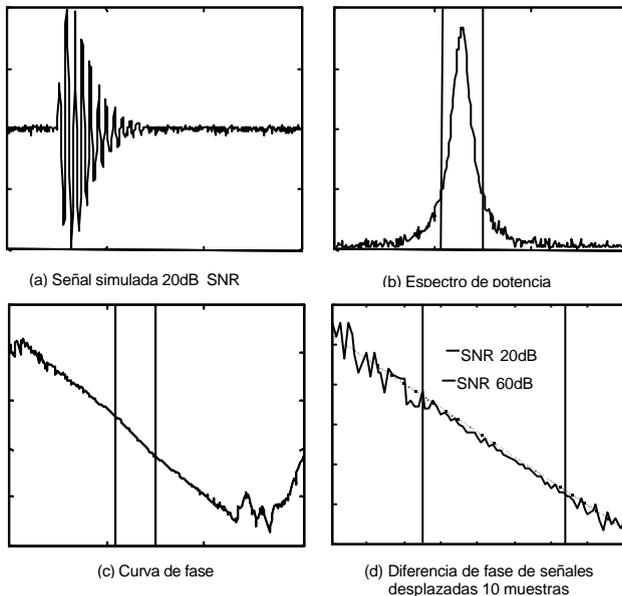
a partir de las que se pretende determinar el retardo D . Se han propuesto diferentes métodos para estimar este retardo: determinación del paso de la señal por un umbral o de la posición del máximo, métodos de Monte Carlo, estimadores basados en la correlación, en la transformada de Hilbert, estimación del cambio de fase, etc. [1]-[7]. En esta comunicación se estudia la viabilidad de efectuar esta estimación utilizando propiedades de la transformada discreta de Fourier.

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Dada una secuencia $x(n)$ cuya transformada de Fourier discreta es $X(\omega)$, la transformada de la misma secuencia $x(n-D)$ retrasada un tiempo D es: $e^{-j\omega D}X(\omega)$. Si escribimos estas transformadas en forma módulo-argumento, y restamos las curvas de fase de las transformadas de la señal de referencia y de la señal retardada se obtiene una recta, en el plano frecuencia-fase, cuya pendiente es el retardo buscado. A diferencia de otros métodos basados en desplazamiento de fase, el valor del retardo obtenido no es periódico, por lo que no existe indeterminación, ni el rango de medida está limitado por la longitud de onda de la señal utilizada. Además, al no realizar ninguna aproximación, en ausencia de ruido el valor obtenido es exacto. En los apartados siguientes analizamos, a través de simulación, la influencia en las estimaciones que tiene el ruido presente en las señales, y analizamos la precisión de método comparada con la obtenida utilizando estimadores basados en la correlación de las señales.

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Para evaluar la calidad del método, hemos realizado una simulación consistente en determinar el retardo entre pulsos ultrasónicos en una hipotética determinación de la velocidad de propagación del sonido en un medio. En todas las simulaciones hemos supuesto que disponemos de una señal de referencia, libre de ruido, obtenida en un medio de velocidad conocida, que es utilizado como patrón. Los señales ultrasónicas se han modelado de acuerdo a la expresión:



$$r(n) = A \cdot n \cdot T_s \cdot e^{-\beta n T_s} \text{sen}(2\pi f(n \cdot T_s - D))$$

donde A es la amplitud de la señal, T_s el periodo de muestreo, f la frecuencia central de la señal, β una constante que controla la velocidad de amortiguamiento de la señal y D el retardo introducido. Los valores utilizados en la simulación, han sido $A=100$, $\beta=1E7$, $f=5\text{MHz}$, y $1/T_s=80\text{MHz}$.

Figura 1

A estas señales se les ha añadido una componente de ruido de media cero, incorrelado con la señal y con distribución normal. Para establecer la relación señal-ruido (SNR) de las muestras generadas se ha utilizado la siguiente definición:

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{n=0}^{N-1} r^2(n)}{\sum_{n=0}^{N-1} g_s^2(n)} \right)$$

Una vez generada la señal retardada (figura 1-a) se calcula su transformada de Fourier (figura 1-b y c) de la que se selecciona un subconjunto de puntos en torno a la frecuencia central, se resta la curva de fase de la de la señal de referencia, en el intervalo seleccionado (figura 1-d), y se determina la pendiente de la recta resultante mediante ajuste por mínimos cuadrados. Para evitar discontinuidades en la curva de fase el espectro de potencia de la señal, en el intervalo seleccionado, debe de ser distinto de cero.

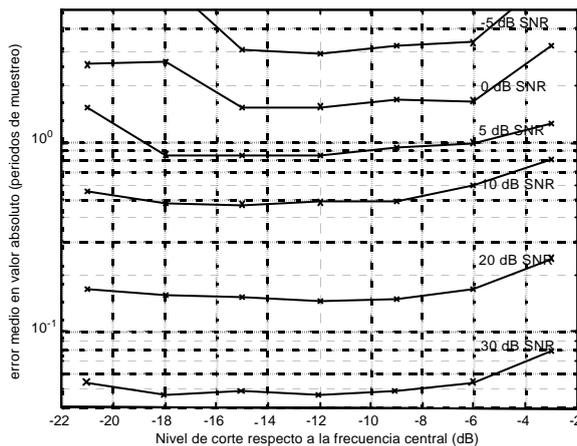


Figura 2

Para determinar el intervalo de frecuencias adecuado para ajustar la recta de fase se utiliza el espectro de potencia: nos situamos en la frecuencia central de señal, y nos desplazamos por el eje de frecuencias, en ambos sentidos, hasta que el espectro de potencia cae 12 dB. Para determinar la idoneidad de este umbral hemos generado series de señales con SNR desde -5dB a 30dB. Cada serie consta de 1000 señales con retardos aleatorios uniformemente distribuidos entre -50 y 50 periodos de muestreo y, para cada señal, se determina el error cometido en la estimación del retardo utilizando intervalos de corte desde -3 dB a -21 dB. Para cada nivel se calculó el valor medio del valor absoluto del error. En la figura 2 se muestran los resultados de estas simulación, en la que puede apreciarse la idoneidad de establecer el nivel de corte en -12 dB para el rango de ruido aplicado.

Influencia del ruido en la estimación

Los curvas de la figura 2 ponen de manifiesto la dependencia del método con la cantidad de ruido presente en las señales. Para cuantificar como afecta el ruido a la resolución y exactitud de la estimación se generaron nuevas series, de 1000 estimaciones cada una, para distintos valores de SNR y cinco retardos: $0T_s$, $0,2T_s$, $0,4T_s$, $0,6T_s$ y $0,8T_s$. En la figura 3-a se representan

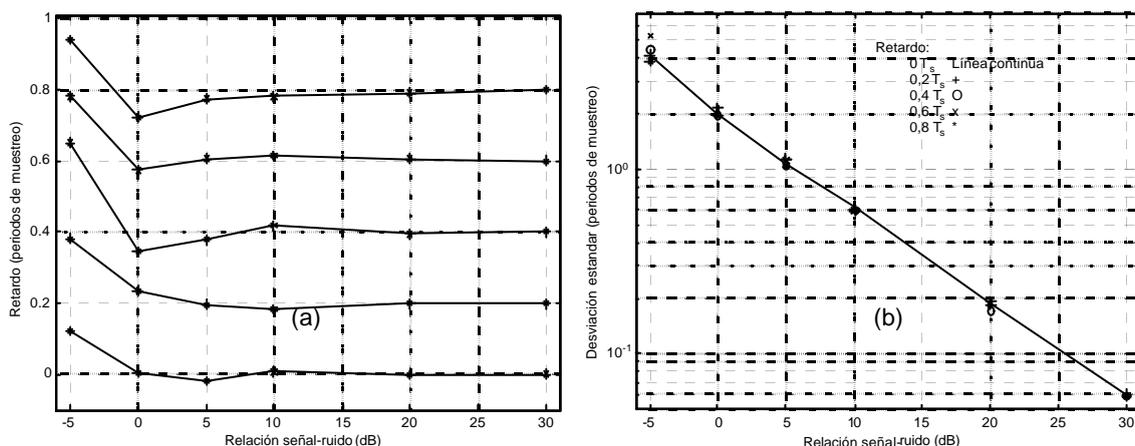


Figura 3

los valores medios de las estimaciones de cada serie y, en la figura 3-b, la desviación estándar.

Se observa que la precisión de las estimaciones no está polarizada por el valor de retardo elegido, y que, para el tamaño de muestra elegido, el error máximo cometido en la estimación, con una confianza del 95%, es inferior a 0.4 muestras para -5dB SNR y a 0.004 muestras con 30 dB SNR (la distribución de los errores en cada serie es normal). Como era de esperar, la desviación estándar de la señal decrece exponencialmente con la SNR.

Comparado con los estimadores habituales basados en la correlación de señales e interpolación cuadrática en la vecindad del máximo, para conseguir resoluciones inferiores al periodo de muestreo, el método de la recta de fase es algo menos robusto frente al ruido. En la figura 4 se presentan los resultados de realizar estimaciones mediante ambos procedimientos sobre series de 1000 muestras con diferentes SNR y retardo fijo de $1.12345 T_s$, con línea continua se han representado las estimaciones realizadas, las líneas de puntos corresponden al error máximo de la estimación mediante la correlación, y las líneas de trazos al error máximo de las estimaciones por recta de fase (margen de confianza del 95%).

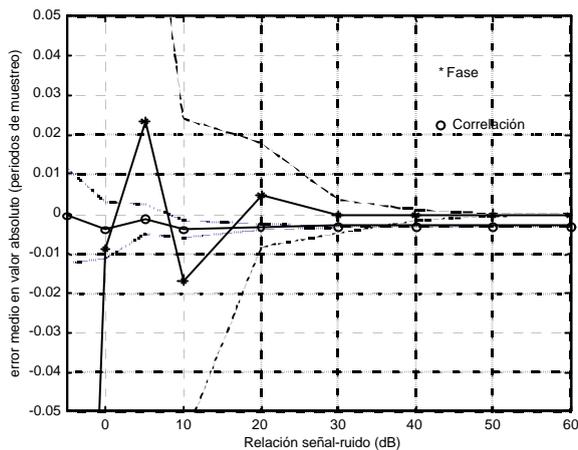


Figura 4

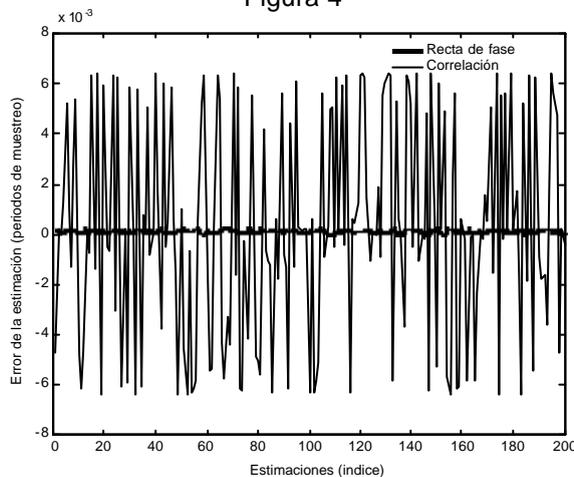


Figura 5

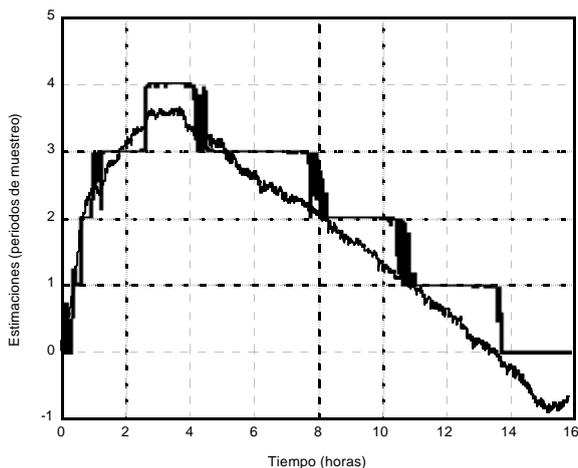


Figura 6

obtenido promediando 32 pulsos ultrasónicos muestreados a 80 Mmuestras/s. Mediante el detector de picos del SENDAS se puede obtener la posición del máximo de los ecos recibidos con resolución de un periodo de muestreo.

La mayor sensibilidad al ruido del método de recta de fase se ve compensada por el menor coste computacional de la transformada rápida de Fourier frente a la correlación, lo que permite ampliar el tamaño de la muestra. Así, con las señales utilizadas en la simulación, formadas por 2048 muestras, en un procesador Pentium 133 MHz se emplean 0.6 segundos de procesador en realizar 100 transformadas de Fourier, mientras que se necesitan 53 segundos para realizar el mismo número de correlaciones (tiempos medidos con la versión 5 del programa Matlab).

En estimaciones que requieran muy alta precisión el método de la recta de fase presenta ventajas frente a la correlación, al ser intrínsecamente exacto, mientras que la aproximación cuadrática utilizada para la curva de correlación introduce errores en las estimaciones, como puede apreciarse en la figura 4. Esto se pone más claramente de manifiesto en la figura 5, en la que se representa el error, individual de, 200 estimaciones mediante ambos métodos, con retardos aleatorios uniformemente distribuidos entre $-50T_s$ y $50T_s$, usando señales sin ruido. La correlación produce errores en la estimación distribuidos entre $-6E-3T_s$ y $6E-3T_s$, mientras que los errores de las estimaciones por recta de fase son un orden de magnitud inferiores y se deben a errores de redondeo en los cálculos.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para comprobar la capacidad discriminación del método descrito al aplicarlo a señales reales, colocamos en una cubeta llena de agua un transductor piezoeléctrico, de frecuencia nominal 5MHz, se excita en banda ancha el transductor para emitir un pulso sobre un reflector plano y se recibe, con el mismo transductor el eco, procediéndose a determinar el tiempo de vuelo del pulso mediante la técnica descrita. Para excitar el transductor, amplificar y digitalizar los ecos se ha utilizado el equipo de ultrasonidos para ensayos no destructivos SENDAS [8]. Utilizando la capacidad de procesamiento del equipo SENDAS las señales utilizadas se han

Utilizando como referencia la señal obtenida al inicio del experimento, y efectuando una estimación cada 20s, se determinó la variación, a largo plazo, del tiempo de vuelo de los pulsos debida al cambio de velocidad del sonido con la temperatura, dilataciones de la cubeta y de los soportes de los distintos elementos, y derivas del sistema electrónico. En la figura 6 se han representado la variación del tiempo de vuelo medida con el detector de picos (línea escalonada) y la estimación realizada mediante la recta de fase. Se observa la concordancia entre ambas medidas y la mayor capacidad de resolución de la recta de fase, equivalente a utilizar el detector de picos con una frecuencia de digitalización de 1,6 GHz.

REFERENCIAS

- [1] Asoke K. Nandi, "On the Subsample Time Delay Estimation of Narrowband Ultrasonic Echoes". IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. Vol. 42, pp. 993-1001, November 1995.
- [2] [G. Bucci, "Numerical Method for Transit Time Measurement in Ultrasonic Sensor Applications". IEEE Transactions on instrumentation and measurement. Vol. 46, pp. 1241-1246, December 1997.
- [3] H. J. McSkimin, "Pulse Superposition Method for Measuring Ultrasonic Wave Velocities in Solids". The Journal of the acoustical society of America. Vol. 33, pp. 12-16, January 1961.
- [4] M. Parrilla, J. Anaya, C. Fritsch. "Digital signal processing techniques for high accuracy ultrasonic range measurements". IEEE Transactions on instrumentation and measurement. Vol. 40, pp. 759-763, August 1991.
- [5] Francis E. Gueuning, M. Varlan, C. E. Eugène, P. Dupuis. "Accurate Distance Measurement by an Autonomous Ultrasonic System Combining Time-of-Flight and Phase-Shift Methods". IEEE Transactions on instrumentation and measurement. Vol. 46, pp. 1236-1240, December 1997.
- [6] B. Audoin, J. Roux. "An innovative application of the Hilbert transform to time delay estimation of overlapped ultrasonic echoes". Ultrasonics. Vol. 34, pp. 25-33, 1996.
- [7] M. A. Postigo. "Medición de la velocidad del sonido en líquidos puros y sus mezclas". Trabajo de licenciatura, Universidad Nacional de San Juan (Argentina), Facultad de ingeniería, Departamento de Electrónica y Automática. 2000.
- [8] L. G. Ullate, A. Ibáñez, J.J. Anaya, M.T. Sánchez. "Performances of remote digital processing in automated non-destructive evaluation". Sensors and Actuators A, Vol. 68, pp. 447-453, 1998.

Agradecimientos: este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación CAM07T/0041/98 y TIC-2F97-2290.