

# INTERFERÓMETRO MICHELSON EN CUADRATURA PARA CALIBRACIÓN DE ACELERÓMETROS POR IMPACTO

Sergio R. Rojas, Guillermo Silva Pineda, Arturo Ruiz Rueda.  
 Centro Nacional de Metrología, km 4,5 carretera a los Cués, El Marqués, 76241 Querétaro México  
 Tel: +52 442 2110500. srojas@cenam.mx

## Resumen:

La realización de pruebas de impacto en productos ha adquirido importancia por la necesidad de comprobar que estos cumplen con requisitos que se exigen. Para satisfacer la demanda de la industria en cuanto a la calibración de bancos de prueba de este tipo, se desarrolló un sistema para calibración de acelerómetros por impacto que, como sistema de referencia, tiene un interferómetro láser tipo Michelson. Para medir en el intervalo de operación del sistema de excitación, es necesario emplear diferentes arreglos ópticos. Este trabajo presenta resultados preliminares en la calibración de acelerómetros utilizando un interferómetro Michelson en Cuadratura con la técnica de desdoblamiento de fase para una aceleración de  $500 \text{ m/s}^2$ , adicionalmente se presenta la estimación de incertidumbre y se compara con los resultados obtenidos utilizando la técnica de intervalos de tiempo.

## 1. INTRODUCCIÓN

Cuando se requiere evaluar la funcionalidad y especificaciones de seguridad en condiciones de impacto, es necesario medir la aceleración y estimación la incertidumbre de medición. La exactitud de las mediciones de aceleración está relacionada con la trazabilidad a patrones de referencia de las unidades del SI y al estado de calibración de los elementos que forman la cadena de medición.

El nivel de aceleración producido por un impacto puede ser varias veces mayor que el producido en condiciones estacionarias, los sistemas de calibración por impacto son empleados cuando se requieren altos niveles de aceleración, i.e. de varios cientos de metros sobre segundo al cuadrado.

Actualmente la industria en México está realizando pruebas de impacto con aceleraciones de hasta  $5000 \text{ m/s}^2$ . Se ha diseñado y fabricado un sistema de excitación de impactos en el intervalo de  $50 \text{ m/s}^2$  a  $5000 \text{ m/s}^2$ , el cual produce pulsos de aceleración con una forma similar a la función de un medio seno cuadrado, como referencia se tiene un sistema óptico que consiste de un interferómetro Michelson modificado en cuadratura y que se utiliza para medir el desplazamiento del yunque al cual se monta el acelerómetro.

En este artículo se analiza el método de medición y se presentan algunos resultados preliminares.

## 2. INTERFERÓMETRO EN CUADRATURA

Un interferómetro Michelson modificado con señales de salida en cuadratura, es utilizado para la medición del desplazamiento y estimación de la aceleración obtenida en el sistema de excitación. El arreglo óptico y el sistema de procesamiento de señales se muestran en la figura 1.

Como fuente de luz se utiliza un láser He-Ne con polarización lineal, con un divisor de haz se obtiene un haz de referencia y un haz de medición. El haz de referencia es reflejado en un espejo fijo que lo regresa al divisor y de forma similar el haz de medición se refleja en un espejo móvil, del cual se desea conocer su desplazamiento y en el cual esta montado el acelerómetro. Los haces de referencia y de medición se combinan para generar interferencia. Un divisor de haz polarizado se utiliza para obtener dos haces con polarización perpendicular, que producen interferencia con una diferencia de fase de aproximadamente  $90^\circ$ .

El espejo móvil es la superficie frontal del yunque con acabado de espejo, en la cual se monta el acelerómetro. El desplazamiento del yunque genera un patrón de franjas en los dos fotodiodos que puede ser descrita por las ecuaciones 1. [1, 2]

$$E_1(t) = E_1 \cos\left(\varphi_0 + \frac{4\pi}{\lambda} s(t)\right) + E_{1,0} \quad (1)$$

$$E_2(t) = E_2 \sin\left(\varphi_0 + \frac{4\pi}{\lambda} s(t) + \rho\right) + E_{2,0}$$

Donde  $t$  es tiempo,  $E_1$  y  $E_2$  son tensiones eléctricas pico,  $\varphi_0$  es el ángulo de fase inicial,  $\lambda$  es la longitud de onda del láser,  $s(t)$  es el desplazamiento del espejo móvil,  $\rho$  es un error de fase,  $E_{1,0}$  y  $E_{2,0}$  son componentes en corriente directa y el subíndice 1 y 2 indica el fotodiodo usado en el arreglo en cuadratura.

La relación de las tensiones eléctricas  $E_2$  y  $E_1$  de salida de los fotodiodos se establece como se señala en las ecuaciones 2. [1, 3]

$$r = \frac{E_2}{E_1} \quad \text{y} \quad \Delta r = 1 - r \quad (2)$$

En las mediciones presentadas en este trabajo, el valor mas alto de la relación de tensiones eléctricas es  $|\Delta r| = 0,06$ . Las componentes en corriente directa ( $E_{1,0}$  y  $E_{2,0}$ ) son minimizadas por medio del uso de filtros pasa altas en los acondicionadores de señal de los fotodiodos pero existe una componente de corriente directa por la alineación del interferómetro. El valor máximo de las tensiones eléctricas  $|E_{1,0}|$  y  $|E_{2,0}|$  es 0,08 para tensiones eléctricas pico normalizadas a 1. Si se conservan los valores de  $|\Delta r|$ ,  $|E_{1,0}|$  y  $|E_{2,0}|$  menores que los valores señalados y se realiza un muestreo simultáneo y a una velocidad constante, entonces se puede aplicar la ecuación 3 para obtener los valores de fase ( $\varphi_M$ ).

$$\varphi_M(t_j) = \arctan\left(\frac{E_2(t_j)}{E_1(t_j)}\right) + m\pi \quad (3)$$

para  $m = 0,1,2,\dots$

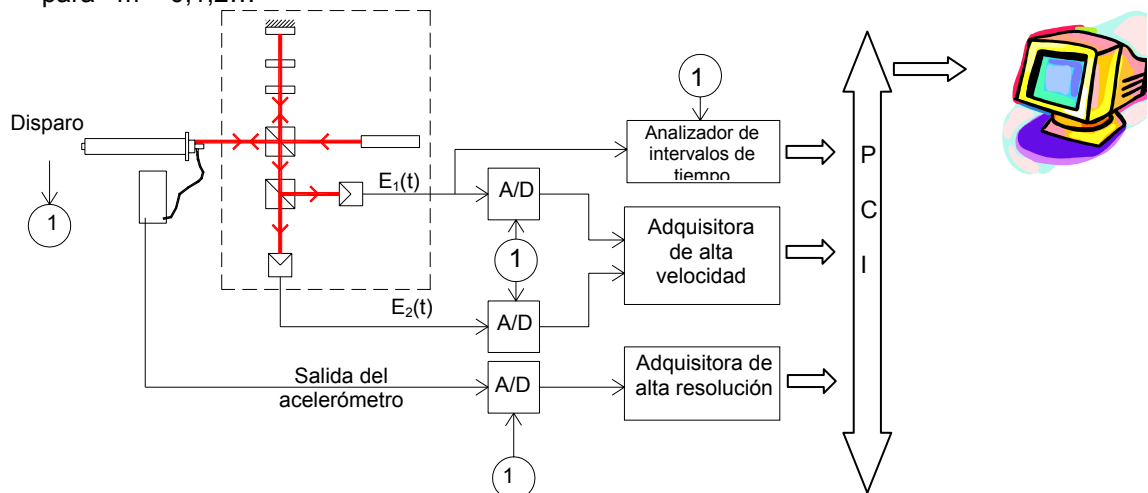


Figura 1. Arreglo experimental

Un algoritmo de desdoblamiento de fase se aplica a ( $\varphi_M$ ) para eliminar  $m$  y obtener una función sin cambios súbitos de amplitud. [1,2,4]

### 3. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

En la figura 2 se muestran las señales en cuadratura de los fotodiodos, una de estas se utiliza para el método de intervalos de tiempo (MIT) [5,6] y las dos en conjunto se utilizan para el método de desdoblamiento de fase (MDF), por lo tanto es posible realizar una comparación de la aceleración pico obtenida, en un mismo evento, por los dos diferentes métodos.

Después del desdoblamiento de fase de  $\varphi_M(t_i)$  el desplazamiento se calcula con la ecuación 4. [4]

$$s(t_i) = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi_M(t_i) \quad \text{para } i=0 \text{ hasta } n \quad (4)$$

Si  $j$  toma valores en el intervalo  $[p, n-p]$  para  $p>0$ , y el vector  $s(t_j)$  es aproximado en el intervalo  $[j-p, j+p]$  por un polinomio de segundo orden de la forma de la ecuación 5 para cada  $j$ , entonces se obtiene un conjunto de funciones continuas  $s_j(t)$ .

$$P(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 \quad (5)$$

Se obtiene un vector de velocidad,  $v(t_j)$ , calculando la derivada del polinomio  $s_j(t)$  para cada  $t_j$  correspondiente.

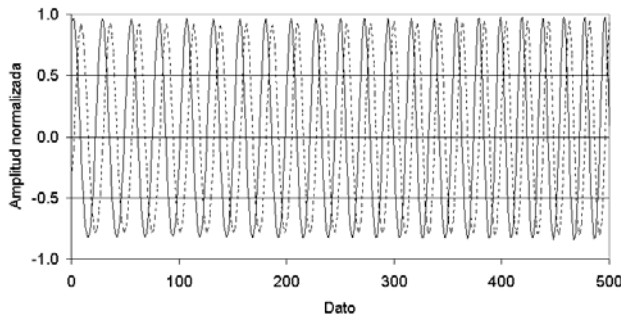


Figura 2. Señales en cuadratura a la salida de los fotodiodos

Si  $k$  toma valores en el intervalo  $[2p, n-2p]$ , y el vector  $v(t_k)$  es aproximado en el intervalo  $[k-p, k+p]$  por un polinomio de segundo orden de la forma de la ecuación 5 para cada  $k$ , entonces se obtiene un conjunto de funciones continuas  $v_k(t)$ . Se obtiene un vector de aceleración,  $a(t_k)$ , calculando la derivada del polinomio  $v_k(t)$  para cada  $t_k$ . En la figura 3, la curva del método de desdoblamiento de fase, muestra el resultado del vector de aceleración  $a(t_k)$ .

Para estimar la aceleración pico se realiza una aproximación de la curva del vector de aceleración,  $a(t_k)$ , alrededor del valor máximo. Si  $a(t_k)$  es máximo cuando  $k=d$ , la aceleración pico puede ser estimada por la aproximación de  $a(t_k)$  cuando  $k$  está en el intervalo  $[d-q, d+q]$  para  $q$  suficientemente grande para describir la curva del pulso de aceleración. El valor pico de una función de la forma de la ecuación 5 se obtiene a partir de sus coeficientes tal como se muestra en la ecuación 6.

$$P_{pico} = -\frac{c_1^2}{4c_2} + c_0 \quad (6)$$

La sensibilidad del acelerómetro se estima con la ecuación 7.

$$S = \frac{U_{pico}}{S_{amp} a_{pico}} \quad (7)$$

donde:  $U_{pico}$ , es la tensión eléctrica pico a la salida del acondicionador de señal,  $S_{amp}$ , es la sensibilidad del acondicionador de señal y  $a_{pico}$  es la aceleración pico determinada.

#### 4. RESULTADOS

Se presentan los resultados de la calibración de un acelerómetro B&K 8309 para  $a_{pico}=500 \text{ m/s}^2$ . Las señales de salida de los fotodiodos se muestrean a una velocidad de 5 MHz simultáneamente y con una resolución de 12 bits. La señal de salida del amplificador de carga se muestrea a una velocidad de 100 kHz con 16 bits de resolución.

Para esta medición, cuando  $a=500 \text{ m/s}^2$ , la velocidad es de aproximadamente 0,3 m/s, en consecuencia la resolución de la medición de desplazamiento es de aproximadamente 60 nm, ésta es la principal diferencia con el método de intervalos de tiempo el cual tiene una resolución de 316 nm ( $\lambda/2$ ).

En la figura 3 se presenta una frecuencia de aproximadamente 14 kHz que se debe a la resonancia del yunque. La figura 4 muestra el espectro de la señal de salida del amplificador de carga, en donde existe un pico a 14 kHz, mostrándose de esta forma la influencia de la resonancia del yunque en el acelerómetro.

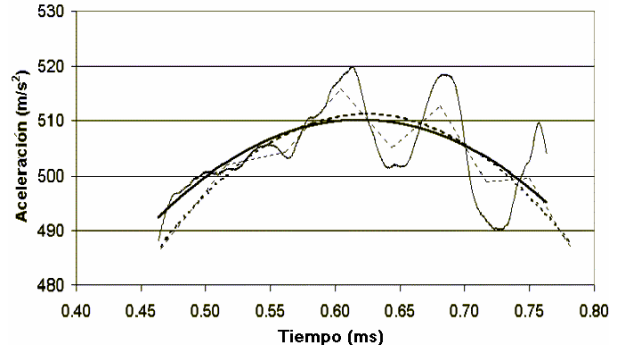


Figura 3. Aceleración y ajuste de curva.  
 — Método de desdoblamiento de fase,  
 - - - Método de intervalos de tiempo.

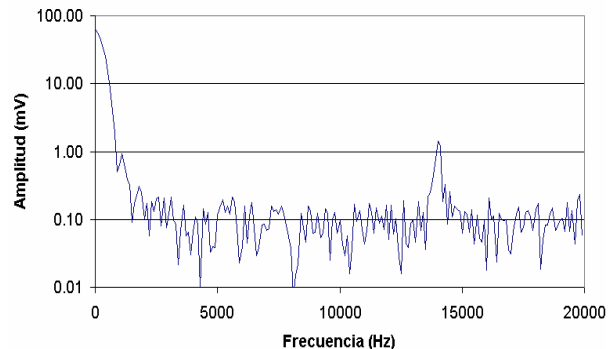


Figura 4. Espectro de la señal de salida.

Una vez determinados los valores pico de aceleración,  $a_{pico}$ , por ambos métodos, se estima la sensibilidad del acelerómetro de acuerdo a la ecuación 7. En la figura 5 se comparan los valores de sensibilidad del acelerómetro obtenidos por el método de desdoblamiento de fase e intervalos de tiempo, en donde se detecta una diferencia de 0,26%.

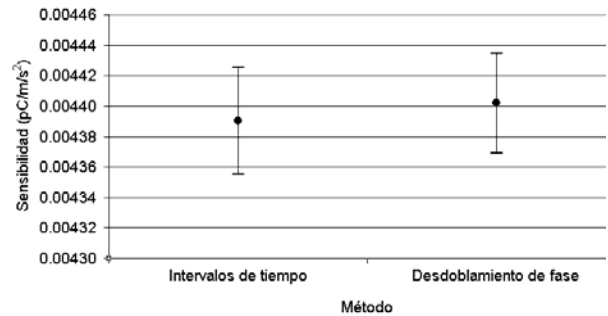


Figura 5. Sensibilidad del acelerómetro

En la tabla 1 se muestran los resultados de la estimación de incertidumbre.

Tabla 1. Presupuesto de incertidumbre para la calibración de acelerómetros por impacto

| Aceleración (pico)<br>Método de intervalos de tiempo (MIT) |                      | Aceleración (pico)<br>Método de desdoblamiento de fase (MDF) |                      | Contribución $u_i(S)$                          |  |                                |
|--|----------------------|--|----------------------|--|--|--------------------------------|
| Analizador de intervalos de tiempo                         |                      | Tarjeta adquisitora  |                      | MIT  | MDF  |                                |
| Resolución   | 50 ps                | Resolución   | 0,046 mV             | $6,7 \times 10^{-6}$<br>pC/(m/s <sup>2</sup> ) | $3,5 \times 10^{-6}$<br>pC/(m/s <sup>2</sup> ) |                                |
|  |                      | Error máximo   | 0,36 mV              |  |  |                                |
| <b>Láser</b>   |                      | <b>Láser</b>   |                      |  |  |                                |
| Incertidumbre de longitud de onda                          | 0,000501 nm          | Incertidumbre de longitud de onda                            | 0,000501 nm          |  |  |                                |
| <b>Estimación de la aceleración pico</b>                   |                      | <b>Estimación de la aceleración pico</b>                     |                      |  |  |                                |
| Desviación estándar de la media                            | 1,6 m/s <sup>2</sup> | Desviación estándar de la media                              | 1,5 m/s <sup>2</sup> |  |  |                                |
| <b>Amplificador de carga</b>                               |                      |  |                      |  |  |                                |
| Incertidumbre de la capacitancia                           |                      | 0,005 pF   |                      | $13,4 \times 10^{-6}$ pC/(m/s <sup>2</sup> )   |  |                                |
| Incertidumbre de la tensión de entrada                     |                      | 0,1 mV   |                      |  |  |                                |
| Tarjeta adquisitora (dos canales)                          |                      | 0,305 mV   |                      |  |  |                                |
| Incertidumbre de la tensión de salida                      |                      | 1 mV   |                      |  |  |                                |
| <b>Estimación de la tensión pico</b>                       |                      |  |                      |  |  |                                |
| Desviación estándar de la media                            |                      | 0,8 mV   |                      | $8,557 \times 10^{-6}$ pC/(m/s <sup>2</sup> )  |  |                                |
| Resolución   |                      | 0,305 mV   |                      |  |  |                                |
| Incertidumbre de calibración de la tarjeta adquisitora     |                      | 0,4 mV   |                      |  |  |                                |
|  |                      |  |                      | S  | $0,004390$ pC/m/s <sup>2</sup>                 | $0,004402$ pC/m/s <sup>2</sup> |
|  |                      |  |                      | U (S)  | 0,80 % (k=2)                                   | 0,74 % (k=2)                   |

### 5. CONCLUSIONES

En el CENAM se ha implementado un interferómetro Michelson en cuadratura y un algoritmo de desdoblamiento de fase para calibración de acelerómetros a 500 m/s<sup>2</sup> y con posibilidades de emplearlo desde 50 m/s<sup>2</sup>. Es necesario utilizar una tarjeta adquisitora de alta velocidad para mejorar la resolución y para medir aceleraciones más altas con el interferómetro Michelson en cuadratura.

La resolución en la medición del desplazamiento se incrementa de  $\lambda/2$  (MIT) hasta  $\lambda/10$  (MDF) con el interferómetro Michelson en cuadratura para

una aceleración de 500 m/s<sup>2</sup>. Se estima que para un nivel de confianza del 95% se reduce la incertidumbre de 0,80% (MIT) hasta 0,74% (MDF) para una aceleración de 500 m/s<sup>2</sup>.

Esta mejora en la resolución de las mediciones permitirá realizar calibraciones de instrumentos de mayor exactitud como pueden ser vibrómetros láser.

### REFERENCIAS

[1] Alfred Link, Joachim Gerhardt, Hans-Jürgen von Martens. Amplitude and phase calibration of accelerometers in the nanometer range. SPIE Vol. 2868, pp 37-48. 1996.

- [2] Marek Dobosz, Takashi Usuda and Tomizo Kurozawa. Methods for the calibration of vibration pick-ups by laser interferometry: I. Theoretical analysis. Meas. Sci. Technol. 9 (1998), pp 232-239.
- [3] Peter L. M. Heydemann. Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers. Applied optics. Vol. 20, No. 19. October 1981.
- [4] ISO 16063-13. Methods for the calibration of vibration and shock transducers, part 13: Primary shock calibration using laser interferometry. First edition 2001-12-01.
- [5] Sergio Rojas-Ramirez, Alfredo Elias-Juarez, Hans- Joachim Schlaak, Hans- Jüergen von Martens. Shock measurements with a homodyne interferometer for accelerometer calibration. SPIE Vol 4072 pp 146-157.
- [6] W. Wabinski, H-J von Martens. Time interval analysis of interferometer signals for measuring amplitude and phase of vibrations. SPIE Vol. 2868 pp 166-177.