

Interferómetro láser y conteo de franjas aplicado a la calibración de acelerómetros y calibradores de vibraciones

Ricardo Ruiz Boulosa y Antonio Pérez López

*Sección de Acústica, Centro de Instrumentos,
Universidad Nacional Autónoma de México,
Apartado postal 70-186, C.P. 14059, Coyoacán, México D. F.*
(Recibido el 25 de abril de 1990; aceptado el 28 de agosto de 1990)

Resumen. Para realizar mediciones de aceleración en términos absolutos utilizando acelerómetros, se debe conocer, o determinar en caso contrario, su calibración. La calibración consiste esencialmente, en medir el valor de su sensibilidad: razón de la salida eléctrica a la entrada mecánica aplicada a su base, expresada en términos de mV por m/s^2 , a cierta frecuencia. Con un láser y un arreglo interferométrico se puede medir la amplitud de desplazamiento e inferir la aceleración de una señal armónica, en términos absolutos. En este trabajo se describe el desarrollo de un sistema, utilizando un interferómetro de Michelson para la medición de la aceleración por conteo de franjas, y su aplicación a la calibración de acelerómetros y calibradores.

PACS: 43.50.+y; 43.60.+d

Fundamentos

El método utilizado en este sistema es el llamado de desaparición de franjas para la medición de pequeñas amplitudes de desplazamientos [1]. Tiene la ventaja de tener gran exactitud por estar referido a una frecuencia muy estable, esto es, a la frecuencia o longitud de onda de una línea espectral, en este caso, del láser de Helio-Neón (6328 Å). Con este método es posible medir, en las mejores condiciones, amplitudes mínimas de alrededor de 1500 Å (0.15 μ m).

El arreglo óptico utilizado consiste en un interferómetro de Michelson, mostrado en la Figura 1, donde se ve un fotodetector conectado a un amplificador de voltaje de bajo ruido. Uno de los espejos está fijo y el otro lo constituye una superficie pulida o un espejo adherido al sistema vibrante. Para las condiciones de un interferómetro típico se utiliza la técnica del batimiento óptico (o heterodyno). Un sensor detecta una señal de batimiento, de baja frecuencia, causada por la interferencia de los dos haces de luz que se cruzan en una región del espacio. El haz reflejado por el espejo en movimiento tiene una frecuencia ligeramente mayor debido al efecto Doppler. Para el caso mostrado en la Figura 1, la frecuencia de vibración del objeto es $f_v = 2\pi\omega$, la amplitud pico de la vibración es A_0 , y la longitud de onda del láser es λ . La

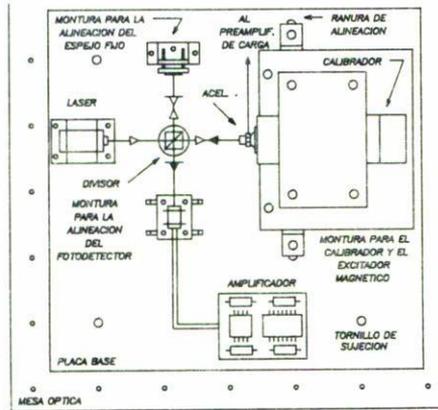


FIGURA 1. Disposición de los componentes ópticos, mecánicos y electrónicos del sistema.

distancia $d(t)$ entre los espejos es variable en el tiempo, ya que se considera que la superficie de vibración se moverá armónicamente

$$d(t) = L + A_0 \cos(\pi\omega)$$

y el cambio de fase

$$\theta = \frac{2d(t)2\pi}{\lambda},$$

por lo tanto,

$$\theta = \left[\left(\frac{4\pi L}{\lambda} \right) + \left(\frac{A_0 4\pi}{\lambda} \right) \cos(\omega t) \right]$$

en consecuencia la parte variable de la salida del fotodetector es [2]

$$\delta I \cos(\theta) = \delta I \cos \left(\phi + \left(\frac{4\pi A_0}{\lambda} \right) \cos(\omega t) \right),$$

donde $\phi = 4\pi L/\lambda$, es el cambio de fase de propagación total, constante, cuando la superficie vibrante tiene desplazamiento cero. Si la amplitud pico de la vibración es A_0 , el número de fluctuaciones en la intensidad o número de franjas que pasan por el detector en un ciclo completo es

$$N = \frac{8A_0}{\lambda}.$$

Si se determina la razón de la frecuencia de la señal del fotodetector f_t , a la frecuencia de vibración f_v , se puede obtener la amplitud A_0 de la vibración ya que esta relación es el número de cuentas que ocurren en cada ciclo de la vibración. Si $f_t/f_v = N_0 = 8A_0/\lambda$, entonces la amplitud de la vibración es

$$A_0 = \frac{1}{8} N_0 \lambda$$

y la aceleración

$$A_0 = (2\pi f)^2 A_0.$$

Implementación del Sistema

Consta de: una placa metálica, de aproximadamente $3/8''$ de espesor, que sirve como base para sujetar rígidamente las monturas. Estas sirven para sostener firmemente los componentes ópticos, electrónicos y mecánicos y tienen la posibilidad de ajustarse para alinear el sistema, que se encuentra aislado de vibraciones por medio de bases de neopreno.

Coherencia

En la parte relativa a los fundamentos del sistema, se supone, implícitamente, que las señales incidentes están en fase en toda la superficie del detector, esto es válido únicamente cuando las dimensiones del fotodetector son pequeñas comparadas con $\lambda/2$, lo cual obviamente es difícil de lograr.

Es necesario ajustar la alineación del interferómetro para minimizar los cambios de fase en la superficie del fotodetector, ya que de otra manera, las contribuciones de las diferentes partes del fotodetector se anularían y la salida resultante se vería fuertemente reducida. Esto se logra cumpliendo con la condición de coherencia [3], que establece que el ángulo (α) del cono de incidencia de los haces debe ser tal que

$$\text{sen } \alpha < \frac{\lambda}{2d},$$

donde d es la dimensión máxima del fotodetector, Figura 2.

Como el fotodetector es mucho mayor que λ , $\lambda/2d$ es mucho muy pequeño. Por ejemplo, si $d = 1$ mm (el ancho efectivo del fotodiodo utilizado en nuestro caso), $\beta = 0.000316$ rads, o 1.2 minutos de arco. Esto se traduce en que la alineación tiene que ser extremadamente buena, algo muy difícil de lograr en la práctica. Si el sistema no está bien alineado, se tienen muchas líneas de interferencia en la zona del detector. Si se utiliza un lente (objetivo de microscopio $40\times$ o $60\times$) para expandir esta zona, se puede hacer que únicamente incida una franja, de brillantez o de

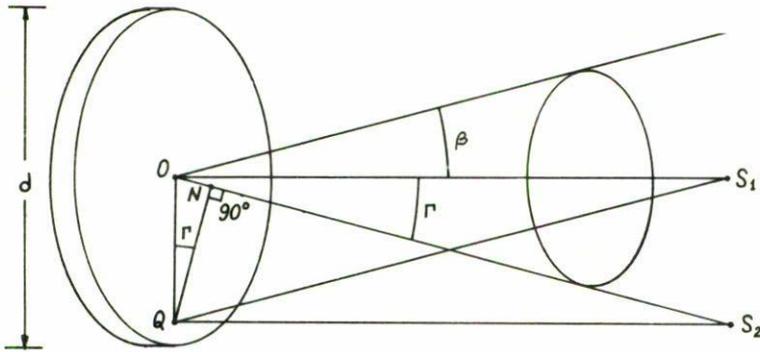


FIGURA 2. Incidencia de dos fuentes de luz en el fotodetector.

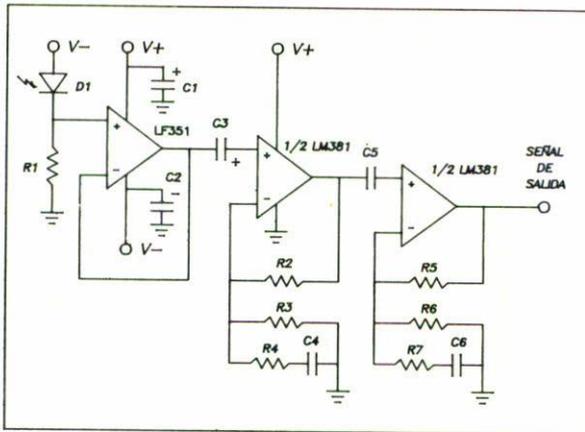


FIGURA 3. Circuito de fotodetección y amplificación.

sombra, en el fotodetector. Con esta opción se pierde algo de la intensidad total del haz de luz, sin embargo, como el sistema se utiliza para diferentes acelerómetros o calibradores y se debe alinear en cada caso, se adoptó esta solución.

Fotodetector y Amplificador

El fotodetector es la primera etapa del circuito electrónico que consta de un fotodiodo de silicio BPX65, un acoplador de impedancias y un amplificador con una ganancia de 40 dB. El diagrama esquemático del circuito se muestra en la Figura 3.

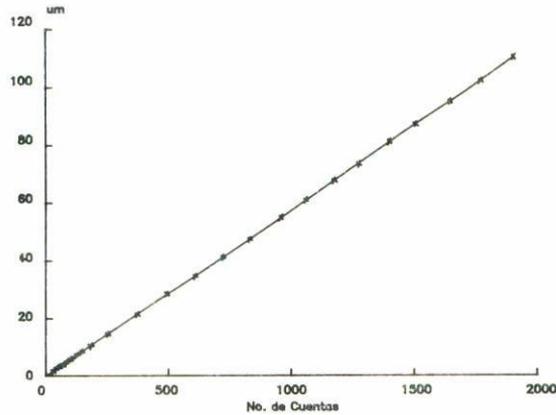


FIGURA 4. Desplazamiento de una rama del interferómetro vs. no. de cuentas (mínimos cuadrados).

Resultados

La Figura 4 muestra una gráfica típica de la relación de las mediciones de amplitud de desplazamiento, obtenidas directamente, contra las cuentas de franjas correspondientes a estos desplazamientos. Se calculó el coeficiente de correlación entre estos datos, el valor fue de $r = 0.999$, lo que indica una correlación lineal perfecta. Se hizo una regresión lineal y se encontró

$$Y = 0.0576 \times 10^{-6} N_0 - C$$

donde Y es el valor rcm de la amplitud del desplazamiento y N_0 el número de cuentas dadas por el contador. La constante C se refiere a un factor de descalibración, de valor muy pequeño, introducido por el amplificador de medición. Para el caso específico de los datos con que se obtuvo la ecuación anterior, $C = 0.006 \mu\text{m}$. La pendiente m relaciona a la amplitud (en este caso rcm) del desplazamiento con el número de cuentas medido. El valor teórico de esta pendiente se obtiene de la ecuación

$$A_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} 0.6328 \times 10^{-6} = 0.05593 \times 10^{-6} N_0$$

y se ve que la concordancia, con el valor medido, es muy buena.

El límite inferior en la medición de las amplitudes ocurre cuando la amplitud es $\lambda/4$. El límite superior ocurre cuando la señal del fotodetector está tan deformada que el contador no funciona adecuadamente. La amplitud que corresponde a este límite es de aproximadamente $(110 \pm 2) \mu\text{m}$. Estas pruebas se hicieron a varias frecuencias hasta una frecuencia máxima de 3,000 Hz, y los resultados fueron similares.

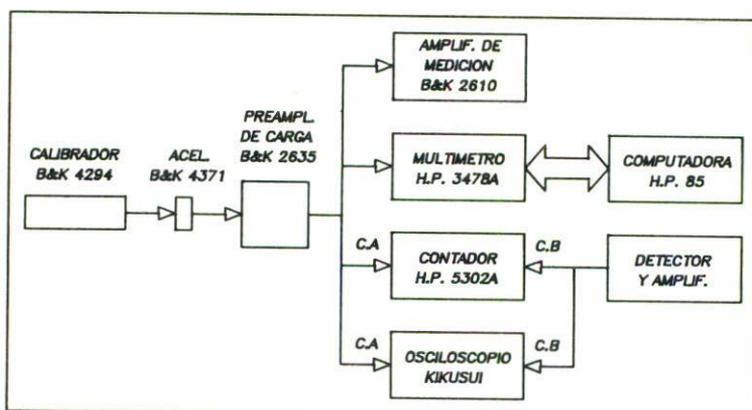


FIGURA 5. Diagrama de bloques de la instrumentación utilizada para la medición de la sensibilidad de acelerómetros.

Si consideramos el límite inferior como $0.1 \mu\text{m}$ y el límite superior como $100 \mu\text{m}$, el intervalo dinámico en la medición de amplitud es

$$ID = 20 \log \left(\frac{110}{0.1} \right) = 60.83 \sim 61 \text{ dB}$$

que es suficientemente grande para la mayoría de las mediciones de interés utilizando este método.

Aplicaciones

Para la medición de la aceleración dada por un calibrador de aceleración (B&K 4294), se utilizó un pequeño acelerómetro (B&K4375, masa de 14 g), para no cargarlo. El procedimiento fue el siguiente: el calibrador se montó en un aditamento especial, y se pegó un pequeño espejo (un fragmento de vidrio de cubreobjetos de microscopio, aluminizado) en el acelerómetro. El período de la señal proporcionada por el acelerómetro se utilizó como reloj externo para determinar la razón de conteo durante un período de la vibración del calibrador. Se hicieron varias series de lecturas (de 100 mediciones cada una) del despliegue del contador, con lo que se obtuvo la aceleración correspondiente. Para una serie de 3 corridas (con 6 cifras de lectura en el contador) se obtuvo

$$N_0 = 180.230 \pm 0.360$$

de donde

$$A_0 = 0.6328 \times 10^{-6} (180.230/8) = 1.426 \times 10^{-5} \pm 0.00029 \times 10^{-5} \text{ m}$$

la aceleración pico es

$$A_0 = (2\pi 158.72)^2 1.426 \times 10^{-5} = 14.182 \pm 0.00028 \text{ m/s}^2$$

el error porcentual en este valor es de aproximadamente 0.2%. El valor de la aceleración pico especificado por el fabricante para este calibrador es de $14.1 \text{ m/s}^2 \pm 3\%$.

Sensibilidad de un acelerómetro

Un acelerómetro piezoeléctrico es un dispositivo autogenerador cuya salida eléctrica, de alta impedancia, es proporcional a la aceleración que se le aplica. Normalmente un amplificador de carga (o voltaje) transforma la salida en una señal de baja impedancia, lo cual permite conectarlo a un instrumento de medición. La exactitud en la determinación de la sensibilidad de carga de un acelerómetro descansa, en nuestro caso, en la exactitud de la calibración del preamplificador ya que el voltaje de salida del preamplificador se puede expresar como [4]

$$e = L_q a k$$

donde a = aceleración a que se somete el acelerómetro (m/s^2); k = factor de amplificación; L_q = sensibilidad de carga del acelerómetro (pC/ms^{-2}). Se ve que la k puede no tener el valor apropiado de la amplificación especificada [5] en el aparato (1 mV/pC , 3.16 mV/pC o 10 mV/pC).

Debido a que en el laboratorio no se cuenta, por el momento, con un dispositivo patrón o una fuente de voltaje de referencia, hubo de suponerse que el acelerómetro o el preamplificador (ambos de reciente adquisición) de la cadena del sistema de medición funcionaban adecuadamente. Esto se verificó midiendo directamente la aceleración del calibrador con el amplificador de medición. Se comprobó que, al ajustar la sensibilidad de carga del transductor en el preamplificador de carga, se obtenía la lectura correcta de la aceleración, determinada como se mencionó anteriormente.

El sistema para la medición de la sensibilidad se muestra en la Figura 5. El canal A del osciloscopio se conectó para monitorear la forma de onda de la señal del acelerómetro y el canal B para monitorear la salida del fotodetector; el amplificador de medición B&K 2610, previamente calibrado, para medir directamente la aceleración y verificar el funcionamiento, tanto del preamplificador como del acelerómetro; el contador universal HP-5302A, para determinar la relación entre la señal proporcionada por el fotodetector (canal B) y la del acelerómetro (canal A), obteniendo el número de cuentas; y un multímetro digital HP-3478A, para medir el voltaje de salida del preamplificador de carga. Este multímetro se conectó

a una microcomputadora, y se hizo un programa para controlarlo y procesar los datos. Se hicieron varias corridas de 90 mediciones de voltaje cada una. Con el multímetro y la computadora, se obtuvo el valor promedio de (10.152 ± 0.028) mV. Simultáneamente, con cada corrida, se obtuvo el valor de la aceleración por conteo de franjas y se obtuvo un valor similar, dentro del error mencionado anteriormente. Con estos valores de voltaje y aceleración se obtuvo el valor de la sensibilidad del acelerómetro: $10.152/10.028 = 1.012$ mV/ms⁻², la cual es muy aproximada a la especificada por el fabricante (0.9 mV/ms⁻²).

Conclusiones

Con este sistema se pueden medir amplitudes de desplazamiento de vibraciones senoidales, de 0.15 μm a 100 μm con un error mínimo de λ/4 en el intervalo de frecuencias entre 0 y 3 kHz. Esta permite medir la aceleración en calibradores de vibración y calibrar o determinar la sensibilidad de acelerómetros.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con apoyo del CONACYT con No. de proyecto P126CCOT894367.

Referencias

1. V.A. Schmidt, S. Edelman, E.R. Smith y E. Jones; Optical Calibration of Vibration Pickups at Small Amplitudes. *The Journal of the Acoustical Society of America* **33** 6 (1961) 748.
2. Robert H. Katyl, Measurement with a Laser Interferometer, *Noise Control Engineering Journal* **26** January-February (1986) 44.
3. L.E. Drain, *The Doppler Laser Technique*, John Wiley & Sons (1986) 57.
4. Mark Serridge, Torben R. Licht, *Piezoelectric Accelerometer and Vibration Preamplifier Handbook*, Brüel & Kjaer (1987) 26.
5. Torben R. Licht, Recent Developments in Accelerometer Design, *Technical Review* **2** (1987) 29.

Abstract. In order to measure acceleration with an accelerometer in absolute terms one needs to know its calibration. The calibration of an accelerometer involves mainly the determination of its sensitivity by some reliable method. The sensitivity is defined as the ratio of the electrical output to the mechanical input applied at its base, expressed in terms of mV per m/s², at a specified frequency. In this work a system for measuring acceleration and calibrating accelerometers and vibration calibrators is described. The system consists mainly of a laser interferometer and associated electronics. The fringe disappearance method is utilized to measure displacement and calculate acceleration.