

MEJORA EN LA EXACTITUD DEL PATRÓN NACIONAL DE ACELERACIÓN ALTERNANTE

Guillermo Silva Pineda, Sergio R. Rojas Ramírez, Arturo Ruiz Rueda y Noé Vidal Medina
 Centro Nacional de Metrología, División de Vibraciones y Acústica
 km 4,5 Carretera a los Cués, El Marqués, Querétaro, CP 76241, México
 Tel: (442) 2 110587 Fax: (442) 2 110553
 e-mail: gsilva@cenam.mx

Resumen: El Patrón originalmente empleó un interferómetro láser tipo Michelson como sistema de referencia, este sistema fue comparado con otros de Laboratorios Nacionales de Metrología en la comparación clave CCAUV.V-K1, se muestran resultados de esta comparación. El desarrollo del Patrón ha conducido a emplear un interferómetro Michelson modificado en cuadratura ampliando el alcance y la resolución de medición, en este trabajo se comparan los métodos utilizados inicialmente (conteo de franjas y desaparición de franjas) con el interferómetro en cuadratura (aproximación senoidal con desdoblamiento de fase). Recientemente se ha desarrollado un interferómetro tipo Mach-Zehnder que ha permitido ampliar adicionalmente el alcance del Patrón.

1. INTRODUCCIÓN

El laboratorio del Patrón Nacional de Aceleración Alternante inició su operación en septiembre de 1993 con el sistema primario de reciprocidad electromecánica. Posteriormente, en septiembre de 1995 se instaló el sistema primario para calibrar acelerómetros por interferometría láser. Con estos sistemas de calibración se ha participado en una serie de comparaciones inter laboratorios, tanto nacional como internacionalmente, tal como se muestra en la tabla 1.

Desde la inauguración del CENAM, en abril de 1994, se ofrecen servicios de calibración de transductores y equipos para medir vibraciones a los sectores usuarios disseminando así la exactitud del Patrón. Con las acciones y actividades realizadas se ha logrado tener un reconocimiento global de las capacidades instaladas.

En el ámbito internacional, en 1998 se formó el Comité Consultivo en Acústica, Ultrasonido y Vibraciones, CCAUV, por el Comité Internacional de Pesas y Medidas. El CENAM ha participado en muchas de las actividades coordinadas por dicho comité como miembro fundador, entre los logros que se tienen a la fecha está el Acuerdo de Reconocimiento Mutuo por medio del cual los servicios incluidos en las capacidades de calibración y medición (CMC, por sus siglas en Inglés) tienen un reconocimiento internacional.

Más aún, los sectores usuarios del país han sido los principales beneficiarios del desarrollo del Patrón Nacional de Aceleración Alternante ya que a través de los diversos servicios ofrecidos, como son calibración, medición, ensayos, consultoría, cursos, entrenamiento y publicaciones, por mencionar algunos, se han disseminado los conocimientos, técnicas y exactitud del Patrón.

Tabla 1 Comparaciones inter laboratorios con participación del Patrón Nacional de Aceleración Alternante

Participantes	Alcance	Fecha
Nacional. Volkswagen, Tremec, DirecSpicer, Velcon, F012-Cenam	160 Hz, 1 kHz	1996
Euromet. EAL ILC A1. Alemania (piloto), Suecia, Francia, Inglaterra, Suiza, Australia, Eslovaquia, España, Dinamarca y México	20 Hz, 160 Hz, 1250 Hz	1997
SIM-AUV.V-K1 EUA (piloto), Canadá, México, Brasil, Argentina	50 Hz – 5 kHz	1998 - 1999
CCAUV.V-K1 Alemania (piloto), Francia, México, República Checa, Sudáfrica, Australia, Corea, EUA, Holanda, Canadá, Japón, Rusia	40 Hz – 5 kHz	2001 - 2002
EUA, México, Brasil	3 kHz – 10 kHz	2002
México, Corea	20 Hz – 5 kHz	2004
SIM. México (piloto), EUA, Canadá, Brasil, Argentina. Corea	2 Hz – 160 Hz	2005

Tal como se observa en la tabla 1, en el año 2001, se participó en una comparación clave en aceleración, CCAUV.V-K1 del BIPM [1]. Los resultados obtenidos en este ejercicio se consideran satisfactorios, tal como se muestran en la figura 1.

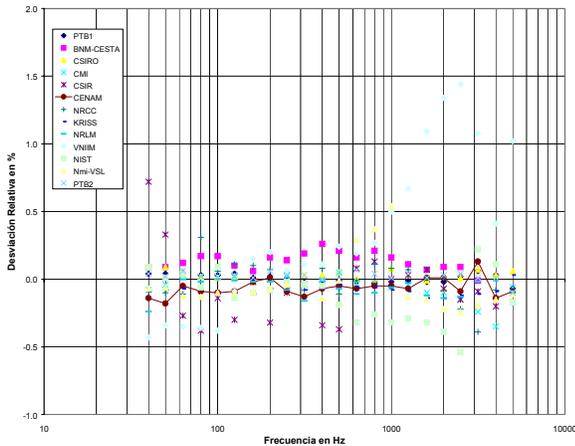


Fig. 1 Resultados de la comparación CCAUV.V-K1

Sin embargo, los sectores usuarios liderados por el automotriz, demandaban mayor alcance y exactitud del Patrón Nacional de Aceleración Alternante, por ejemplo, para calibrar vibrómetros láser de alta exactitud. Esto justificó la inversión de recursos para alcanzar un mayor desarrollo de las capacidades instaladas ampliando los alcances y mejorando la exactitud tal como se muestra en las siguientes secciones.

2. Introducción a la interferometría láser

Actualmente la interferometría láser es una técnica muy usada en mediciones de longitud de alta exactitud tales como metrología de semiconductores, aplicaciones de litografía, metrología dimensional y medición de vibraciones, entre otras. El alcance actual de las mediciones por interferometría láser va desde fracciones de nanómetro hasta alrededor de 60 metros, resaltando la alta exactitud y una resolución casi ilimitada.

En general existen dos métodos para dividir un haz de luz y éstos dan la base para clasificar los tipos de interferómetros. En un método, llamado división del frente de onda se hace pasar la luz a través de dos aperturas colocadas en un mismo

plano, éste método es útil sólo con fuentes lo suficientemente pequeñas que puedan ser consideradas como fuentes puntuales. El otro método, llamado división de amplitud, emplea superficies parcialmente reflejantes conocidas como divisores de haz, se puede usar con fuentes extendidas y por tanto, los efectos pueden tener mayor intensidad que los del otro método. Los interferómetros analizados en este trabajo emplean el método de división de amplitud.

La estabilidad de la fuente láser, los errores de alineamiento, vibración, variación en la temperatura y/o presión atmosférica y turbulencia del aire son las principales fuentes de variación en los interferómetros láser. Cuando todos los factores anteriores se pueden controlar dentro de límites adecuados, entonces las principales limitaciones prácticas estarán relacionadas con el ruido y la no linealidad de la unidad de detección del interferómetro láser.

2.1 Método de conteo de franjas

Consiste en medir dos frecuencias diferentes que tienen una relación directa con el desplazamiento del espejo móvil localizado en el brazo de medición del interferómetro, ver figura 2. Una de las frecuencias medidas es la frecuencia del movimiento del espejo móvil, la segunda frecuencia es la frecuencia de corrimiento de las franjas de interferencia debido al cambio de posición del espejo móvil [2]. Cuando el espejo se desplaza una distancia de $\lambda/2$, se tiene el corrimiento de una franja, donde λ es la longitud de onda del láser.

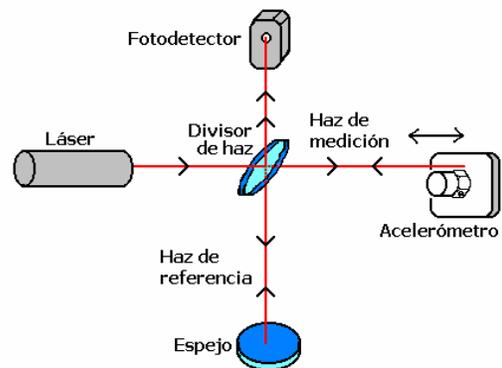


Fig. 2 Interferómetro láser tipo Michelson

El número de franjas de interferencia es proporcional al desplazamiento, x , del espejo móvil, tal como

$$x = \frac{\lambda}{8} \cdot \frac{F_C}{f} \quad (1)$$

donde F_C es la frecuencia de corrimiento de las franjas de interferencia, y f es la frecuencia del espejo móvil [3]. De la ecuación 1 se observa que la resolución del método de conteo de franjas es de $\lambda/8$ aproximadamente.

El método de conteo de franjas se usa cuando el movimiento del espejo tiene frecuencias desde fracciones de Hertz hasta aproximadamente 800 Hz con desplazamientos mayores a 32 μm . A frecuencias mayores ó desplazamientos menores la exactitud del método se degrada considerablemente.

2.2 Método de desaparición de franjas

Consiste en medir la intensidad del patrón de interferencia con la unidad de detección (ver figura 2) y analizar el contenido de frecuencia de la señal de salida. La señal de salida, I , se puede representar por la siguiente ecuación [4]

$$I(t) = A + B \cos \frac{4\pi\delta}{\lambda} \left[J_0 \left(\frac{4\pi x}{\lambda} \right) + 2J_2 \left(\frac{4\pi x}{\lambda} \right) \cos 2(2\pi ft) + \dots \right] \quad (2)$$

$$- B \sin \frac{4\pi\delta}{\lambda} \left[2J_1 \left(\frac{4\pi x}{\lambda} \right) \cos(2\pi ft) + 2J_3 \left(\frac{4\pi x}{\lambda} \right) \cos 3(2\pi ft) + \dots \right]$$

donde las J_n son funciones de Bessel de orden n de primer tipo, f es la frecuencia del espejo móvil, δ es la diferencia en trayectoria óptica entre los brazos del interferómetro y t es el tiempo.

La implementación experimental del método de desaparición de franjas requiere de mediciones en bandas de frecuencias que van desde cd, equivalente al término J_0 , a la frecuencia del espejo móvil, equivalente al término J_1 y a armónicos de la frecuencia del espejo móvil para el resto de los términos J_n , ver figura 3.

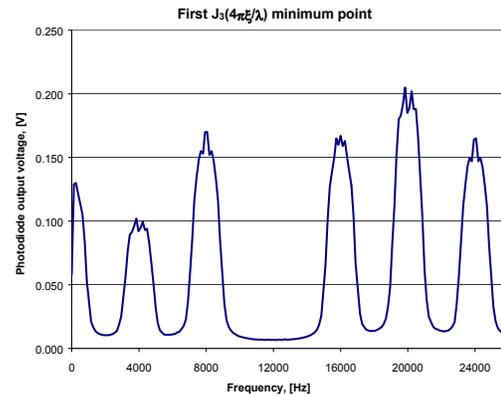


Fig. 3 Espectro de la señal de salida cuando el espejo se mueve a 4 kHz con $x=321$ nm.

El método de desaparición de franjas se aplica desde 1 kHz hasta 10 kHz, dependiendo de la estabilidad y nivel de desplazamiento del espejo móvil.

2.3 Método de aproximación senoidal

El método de aproximación senoidal se distingue de los dos métodos descritos anteriormente debido a la división de la fase de las franjas de interferencia por medio de un divisor polarizador colocado antes de las dos unidades de detección, ver figura 4. Para lograr esto se requiere que en el brazo de referencia del interferómetro se coloque una placa de un cuarto de onda para invertir la polarización original del haz y su posterior condición en cuadratura ($\pi/2$) una vez que se produce la interferencia después del divisor de haz.

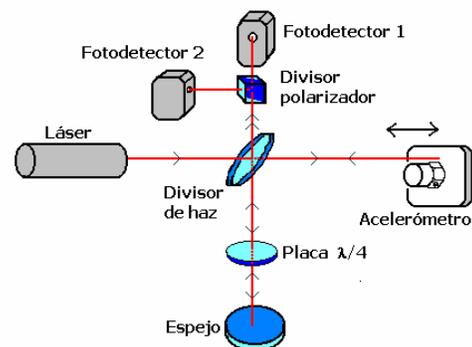


Fig. 4 Interferómetro tipo Michelson modificado en cuadratura.

El arreglo experimental mostrado en la figura 4 presenta algunas deficiencias que limitan la exactitud en las mediciones, entre ellas están desviaciones en la cuadratura entre las señales de las unidades de detección y que el contenido entre las dos señales tenga diferente nivel en cd y en ca. Los efectos anteriores son no linealidades que se presentan con frecuencia en los interferómetros en cuadratura y en los interferómetros heterodinos [5,6]. Estas limitaciones originan que al desplegar las señales de las dos unidades de detección no describan un círculo sino una elipse, ver figura 5.

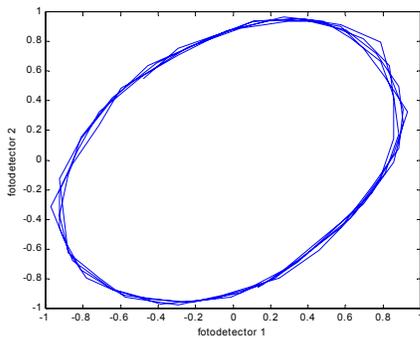


Fig. 5 Señales de salida de las dos unidades de detección de un interferómetro en cuadratura.

La respuesta no lineal del interferómetro láser tipo Michelson modificada en cuadratura, en la actualidad no es posible corregirla experimentalmente, por lo que se requiere implementar un algoritmo para corregir la no linealidad en la señal digitalizada proveniente de las unidades de detección.

El algoritmo de corrección consta de dos pasos que se ejecutan en forma secuencial; primero se compensa la desviación de la fase en cuadratura entre las dos señales por medio de la función tangente de la relación entre las dos señales; después se corrige el nivel en cd y la diferencia en amplitudes en las dos señales provenientes de las unidades de detección. Una vez corregidas estas no linealidades se obtienen las señales en cuadratura y se aplica la siguiente relación,

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_1}{I_2}\right) + n\pi, \text{ para } n=0,1,2,\dots \quad (3)$$

donde, I_1 e I_2 son las intensidades de las señales de las unidades de detección del interferómetro y φ es la fase del desplazamiento del espejo móvil. Para eliminar las discontinuidades generadas por los ciclos de las franjas de interferencia, $n\pi$, se aplica a la ecuación 3 un algoritmo de

desdoblamiento de fase, de esta forma se obtiene la fase del movimiento del espejo móvil alcanzando resoluciones de $\lambda/2048$ aproximadamente.

El interferómetro Michelson modificado en cuadratura, mostrado en la figura 4, tiene un alcance en frecuencia de 2 Hz a 10 kHz empleando el método de aproximación senoidal. Sin embargo, cuando el espejo móvil se excita a frecuencias por debajo de 8 Hz hasta frecuencias muy cercanas a cd, entonces es más recomendable emplear un interferómetro heterodino, tal como el interferómetro láser tipo Mach-Zehnder, ver figura 6.

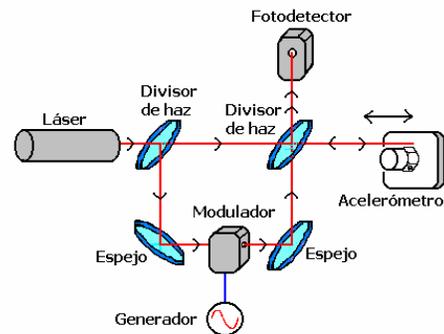


Fig. 6 Interferómetro láser heterodino tipo Mach-Zehnder.

3. RESULTADOS

En esta sección se presentan resultados de calibraciones empleando los métodos descritos en la sección 2. Se muestran resultados de calibraciones de un vibrómetro láser de alta exactitud y un acelerómetro patrón, respectivamente. En los resultados mostrados se comparan los niveles de sensibilidad y la incertidumbre estimada para las calibraciones realizadas.

3.1 Calibración de un vibrómetro láser

En esta sección se presentan resultados de la calibración de un vibrómetro láser de alta exactitud. Se comparan los resultados obtenidos con el método de conteo de franjas y con el método de aproximación senoidal, ver figura 7.

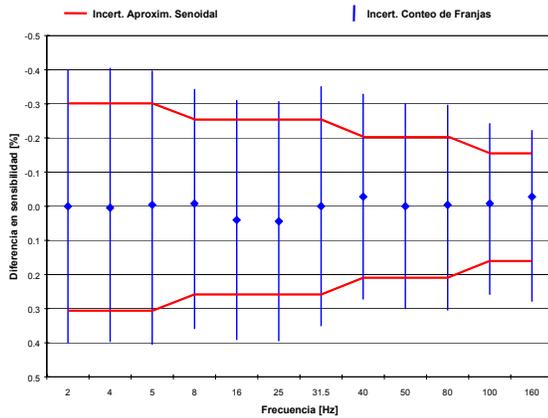


Fig. 7 Calibración de un vibrómetro láser.

En la figura anterior los puntos representan la diferencia en los resultados de calibración entre el método de aproximación senoidal y el de conteo de franjas. Las barras verticales representan las incertidumbres de los puntos de calibración con el método de conteo de franjas y la línea quebrada representa la incertidumbre de los puntos de calibración con el método de aproximación senoidal. Se puede observar que las desviaciones entre los métodos de conteo de franjas y de aproximación senoidal es menor a $\pm 0,05\%$ en el alcance en frecuencia mostrado en la figura 7.

3.2 Calibración de un acelerómetro patrón

En la figura 8 se muestran los resultados de la calibración de un acelerómetro patrón. Se comparan los resultados obtenidos con el método de desaparición de franjas y con el método de aproximación senoidal.

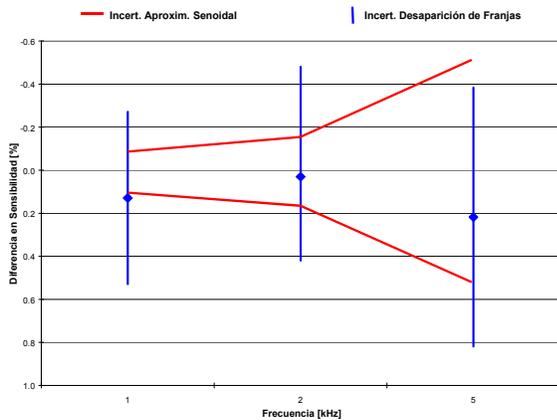


Fig. 8 Calibración de un acelerómetro patrón.

En la figura anterior los puntos representan la diferencia en los resultados de calibración entre el método de aproximación senoidal y el de desaparición de franjas. Las barras verticales representan las incertidumbres de los puntos de calibración con el método de desaparición de franjas y la línea quebrada representa la incertidumbre de los puntos de calibración con el método de aproximación senoidal. Se puede observar que las desviaciones entre los métodos de desaparición de franjas y de aproximación senoidal es de alrededor de $0,2\%$ en el alcance en frecuencia mostrado en la figura 8.

4. CONCLUSIONES

El Patrón Nacional de Aceleración Alternante tiene ahora mayor exactitud y resoluciones que superan a las instaladas originalmente en tres órdenes de magnitud aproximadamente. Esto permite calibrar instrumentos que están a nivel del estado del arte como son los vibrómetros láser de alta exactitud. La calibración de este tipo de instrumentos los demandan los sectores usuarios, tal como el automotriz.

Actualmente el Patrón cuenta con diversos interferómetros láser, como son el tipo Michelson modificado en cuadratura y el interferómetro heterodino tipo Mach-Zehnder que son equivalentes a los de mayor exactitud reportados internacionalmente.

La participación exitosa en comparaciones internacionales, formar parte del CCAUV del CIPM como uno de los miembros fundadores, atención a la demanda de servicios de los sectores usuarios y el desarrollo de las capacidades técnicas y científicas son la base del reconocimiento alcanzado por el CENAM en la magnitud de Aceleración Alternante.

REFERENCIAS

- [1] von Martens, H.-J., Elster, C., Link, A., Täubner, A., Wabinski, W., KEY COMPARISON CCAUV.V-K1 Final Report, www.bipm.org/kcdb Metrologia, Vol. 40, Tech. Suppl. 09001, 2003.
- [2] Silva Pineda G., Ferrer Argote L. On the estimation of uncertainties for the accelerometer calibration using laser interferometry, SPIE, Vol. 4072, pp. 137-145, 2000.

- [3] Silva Pineda G., Ferrer Argote L. Vibration measurement using laser interferometry, SPIE, Vol. **3831**, pp. 308-318, 1999.
- [4] Silva Pineda G., Ferrer Argote L. Development of interferometric fringe disappearance method used to calibrate accelerometers, Proceedings of the SEM Annual Conference on Experimental Mechanics, pp. 141-144, 2001.
- [5] Rojas Ramirez S., Silva Pineda G., Ruiz Rueda A. Quadrature Michelson interferometer used for shock calibration of accelerometers, SEM Annual Conference on Experimental Mechanics, Costa Mesa, California, USA, 2004.
- [6] Chien-ming Wu and Ching-shen Su Nonlinearity in measurements of length by optical interferometry, Meas. Sci. Technol. **7**, 1996.