

## VII. Sistemas interferométricos para la detección de variables físicas

Carlos Manuel García Lara

### Introducción

Las formas de colores que se pueden observar sobre las burbujas de jabón son el resultado del fenómeno conocido como interferencia. En 1801 el inglés Thomas Young dio un gran impulso a la teoría ondulatoria explicando el fenómeno y midiendo las longitudes de onda correspondientes a los distintos colores del espectro. Para ese entonces la teoría corpuscular era inadecuada para explicar el hecho de que dos rayos luminosos, al incidir en un punto, pudieran originar oscuridad. La interferencia de la luz ocurre cuando dos ondas mutuamente coherentes se superponen en algún lugar del espacio. Se considera que las ondas son mutuamente coherentes cuando el origen de estas es la misma fuente, son monocromáticas y tienen exactamente la misma frecuencia<sup>[1]</sup>.

Cuando dos o más ondas ópticas están presentes, simultáneamente en un mismo punto, la función de onda total es la suma de las funciones de onda individuales. Este principio básico de superposición está acorde con la linealidad de la ecuación de onda. Para ondas monocromáticas de igual frecuencia, el principio de superposición es también aplicable para amplitudes complejas. Esta es consistente con la linealidad de la ecuación de Helmholtz.

El principio de superposición no aplica para la intensidad óptica. La intensidad de la superposición de dos o más ondas no es necesari-

riamente la suma de sus intensidades. La diferencia es atribuida a la interferencia entre estas ondas. La interferencia no puede ser explicada con los fundamentos de óptica de rayos, toda vez que es independiente de la relación de fase entre las ondas superpuestas.

En general, las ondas que provienen de fuentes distintas son incoherentes entre sí, de hecho, la luz emitida por cada punto de una misma fuente es incoherente con la emitida por los otros puntos de la misma fuente. La luz es emitida por átomos y sus características dependen críticamente del estado dinámico del átomo, y cada átomo experimenta en general una dinámica completamente independiente de la de los átomos vecinos (colisiones, vibraciones, agitación térmica). La independencia estadística entre átomos resulta en incoherencia de la luz emitida. De lo anterior se debe inferir que coherencia está relacionada directamente con el ancho de banda finito de la fuente y con su extensión finita en el espacio<sup>[1]</sup>.

Para obtener ondas coherentes que puedan interferir se recurre a hacer interferir una onda consigo misma. Teniendo en cuenta que para las fuentes de luz comunes el tiempo de coherencia es muy corto, es decir, el intervalo temporal en el que podemos predecir razonablemente la fase de la onda luminosa en un punto dado del espacio. Para que exista interferencia la diferencia de tiempos  $\Delta\tau$ , entre el camino directo y el indirecto debe ser menor que el tiempo de coherencia  $\Delta\tau < \tau_c$ .

## Descripción general

A partir de la definición de interferencia, se tienen dos ondas descritas por

$$u_1 = U_1 e^{i\phi_1} \quad (1)$$

$$u_2 = U_2 e^{i\phi_2} \quad (2)$$

las cuales se traslapan. La teoría de ondas electromagnéticas predice que la simplificación del campo resultante es la suma de las ondas

$$u = u_1 + u_2 \quad (3)$$

Donde la cantidad observable es la intensidad, la cual está dada por

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi \quad (4)$$

Donde

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (5)$$

Como se observa la intensidad resultante no es únicamente la suma de las intensidades de las ondas incidentes, sino que las ondas interfieren y  $2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi$  es conocido como el término de interferencia. Se observa además que cuando

$$\Delta\phi = (2n + 1)\pi, \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots$$

Se tiene que  $\cos \Delta\phi = -1$ , por lo que la intensidad alcanza su mínimo. Las dos ondas están en antifase lo que indica que interfieren destructivamente. Sin embargo, cuando

$$\Delta\phi = 2n\pi, \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots$$

Se tiene que  $\cos \Delta\phi = 1$ , por lo que la intensidad alcanza su máximo. Por lo que ahora las dos ondas están en fase, lo que indica que interfieren constructivamente. Para el caso de dos ondas de igual intensidad, siendo  $I_1 = I_2 = I_0$ , la ecuación 4 se simplifica en

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (6)$$

donde la intensidad varía entre 0 y  $4I_0$ .

### Interferencia entre dos ondas planas

En la figura 1, se muestran dos ondas planas  $u_1$  y  $u_2$  con direcciones de propagación  $n_1$  y  $n_2$  que viajan en el plano  $xz$  a un ángulo  $\theta_1$  y  $\theta_2$  respecto del eje  $z$ .

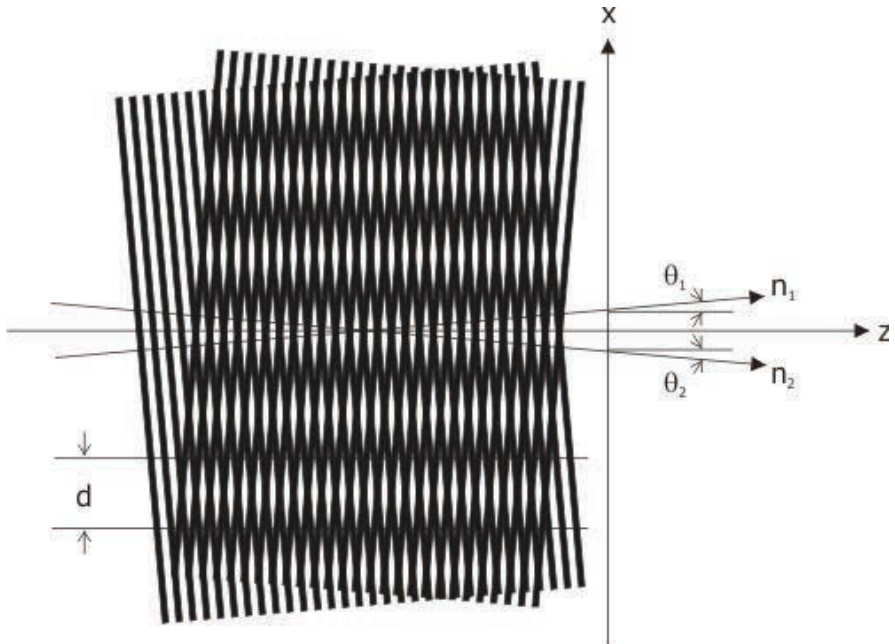


Figura 1. Patrón de interferencia generado por dos ondas planas que se propagan en las direcciones  $n_1$  y  $n_2$ .

De la figura 1, al ángulo que se observa entre las dos ondas planas que viajan en las direcciones  $n_1$  y  $n_2$ , se le denominará  $\alpha$  en el análisis, y al ángulo entre la línea bisectriz del ángulo  $\alpha$  y el eje  $z$  se le denominará,  $\theta$ , por lo que

$$\alpha = \theta_1 + \theta_2 \quad (7)$$

Asumiendo que las amplitudes complejas de las dos ondas planas están definidas según las ecuaciones (1) y (2), se tiene ahora que

$$\phi_1 = k \left[ x \operatorname{sen} \left( \theta - \frac{\alpha}{2} \right) + z \cos \left( \theta - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \quad (8)$$

y

$$\phi_2 = k \left[ x \operatorname{sen} \left( \theta - \frac{\alpha}{2} \right) + z \cos \left( \theta - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \quad (9)$$

Donde  $k$  es el número de onda. La intensidad está dada según la expresión general de la ecuación (4), y sustituyendo las expresiones (8) y (9) en (5) se obtiene

$$\Delta\phi = 2k \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (10)$$

Lo cual proporciona un término de interferencia de la forma

$$\cos\left[\frac{2\pi}{d}(z \operatorname{sen} \theta - x \cos \theta)\right] \quad (11)$$

utilizando una distancia entre franjas de

$$d = \frac{\lambda}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (12)$$

Por lo que la distancia entre las franjas de interferencia  $d$ , es dependiente únicamente del ángulo entre  $n_1$  y  $n_2$ .

## Interferometría

Los sistemas experimentales empleados para poder producir interferencia son conocidos como interferómetros. Básicamente existen dos tipos, los de división de frente de onda y los de división de amplitud. En el primer tipo, dos frentes de onda secundarios son generados a partir de un frente de onda primario, éstos son superpuestos posteriormente, generando un patrón de interferencia. En el segundo tipo, la amplitud de un frente de onda primario es dividida en dos partes, éstas se superponen posteriormente, generando también un patrón de interferencia.

De estos dos tipos se han diseñado una gran cantidad de interferómetros, con los que se pueden efectuar medidas sumamente precisas de longitudes de onda, distancias muy pequeñas y de determinados fenómenos ópticos. La figura 2 presenta dos interferómetros muy conocidos, el primero es el sistema de dos rendijas de Young, que produce interferencia por división del frente de onda y el segundo es el de Michelson, que produce interferencia por división de amplitud.

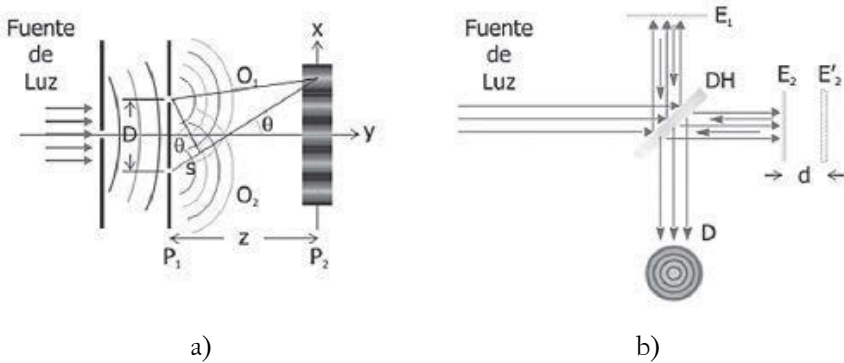


Figura 2. a) Interferómetro de Young b) Interferómetro de Michelson

De la figura 2a, se observa que el frente de onda incidente es dividido en dos ondas  $O_1$  y  $O_2$  al pasar a través de dos huecos pequeños ubicados en una pantalla  $P_1$ . Las ondas esféricas resultantes interferirán, y el patrón de interferencia resultante será observado en la pantalla  $P_2$ . Se puede observar además la diferencia de camino óptico  $s$ , de la luz alcanzando un punto arbitrario  $x$  sobre la pantalla  $P_2$ . Cuando la distancia  $z$  entre  $P_1$  y  $P_2$  es mucho mayor que la distancia  $D$ , se tiene que

$$\frac{s}{D} = \frac{x}{z} \text{ por lo que } s = \frac{D}{z}x \quad (13)$$

la diferencia de fase es por tanto

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}s = \frac{2\pi D}{\lambda z}x \quad (14)$$

La cual, al sustituirla en la expresión general para la distribución de intensidad resultante, se obtiene

$$I(x) = 2I\left(1 + \cos\left(2\pi\frac{D}{\lambda z}x\right)\right) \quad (15)$$

El resultado son franjas de interferencia paralelas al eje  $y$ , con periodo espacial de  $\lambda z/D$  el cual decrece cuando la distancia entre  $O_1$  y  $O_2$  se incrementa. El contraste de las franjas de interferencia sobre  $P_2$  es una medición del grado de coherencia del haz de luz<sup>[2]</sup>.

De la figura 2.b, se observa que la luz procedente de la fuente de luz incide sobre un divisor de haz que produce dos ondas coherentes, una transmitida y otra reflejada. Las ondas se reflejan cada una en los espejos  $E_1$  y  $E_2$ , y vuelven sobre el divisor de haz, DH, a partir del cual interfieren.

Para el análisis, se considera la fuente de iluminación puntual, por lo que los espejos forman dos imágenes coherentes de la fuente, separadas una distancia  $2d$ , donde  $d$  es la diferencia de longitudes de los brazos del interferómetro, es decir, el camino óptico desde DH hasta cada uno de los espejos. Si la interferencia se forma en el plano focal imagen de una lente convergente, se observará simetría cilíndrica en torno al eje  $y$  y con lo que la distribución de intensidad serán anillos en torno al eje  $x$ .

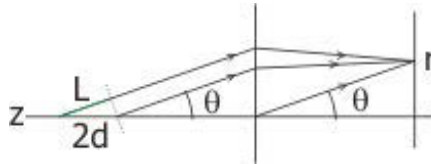


Figura 3. Trazo de rayos en un interferómetro de Michelson

De la figura 3, por el teorema de Malus Dupin, si tomamos la trayectoria de caminos ópticos iguales desde la fuente al plano focal imagen,  $r$ , el cual será un lugar geométrico constituido por una superficie perpendicular a todos los rayos, conocida como superficie de onda<sup>[3]</sup>, se puede determinar la diferencia de fase o camino óptico entre dos ondas que interfieren, denotado por  $L$ , suponiendo el mismo índice de refracción de los dos brazos

$$L = 2d \cos \theta \quad (16)$$

Con lo que la condición de máximos es

$$m\lambda = 2d \cos \theta \quad (17)$$

Siendo  $m$  números enteros llamados órdenes de interferencia. Esta variación en el camino óptico se logra desplazando uno de los espejos,  $E_1$  o  $E_2$ , como se observa en la figura 2.b. Si existe una distancia  $d$ , entre  $E_2$  y  $E_1'$ , se generará una diferencia de fase de

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2d \quad (18)$$

Lo que resulta en una distribución de intensidad de

$$I(d) = 2I \left( 1 + \cos \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \right) \quad (19)$$

Conforme el espejo  $E_2$  se mueve, el desplazamiento es medido contando el número de máximos registrados por un detector D. Contando el número de máximos por unidad de tiempo se puede determinar la velocidad de desplazamiento del espejo.

## Aplicaciones

La Interferometría es una herramienta útil para realizar mediciones de alta precisión. Por ejemplo, si se quiere conocer la longitud de coherencia del haz o medir distancias con una precisión de media longitud de onda, esto es posible con un interferómetro de Michelson, midiendo los cambios de fase provocados por el movimiento de uno de los espejos que integran el arreglo.

Otra aplicación es la medida de deformaciones de una superficie como se observa en la figura 4, las cuales pueden ser causa de fracturas sobre elementos mecánicos, calentamiento normal o anormal de circuitos eléctricos o piezas mecánicas sujetas a fricción. Esta aplicación de las técnicas interferométricas es especialmente útil y poderosa si se apoya con técnicas holográficas. La facilidad de emplear esta técnica radica en que a simple vista es posible observar estas alteraciones al



hacer incidir el patrón de interferencia sobre la superficie de prueba y observar las variaciones de las franjas debido a dichas alteraciones. Posteriormente, utilizando técnicas de procesamiento de imágenes es posible analizar e interpretar la información.

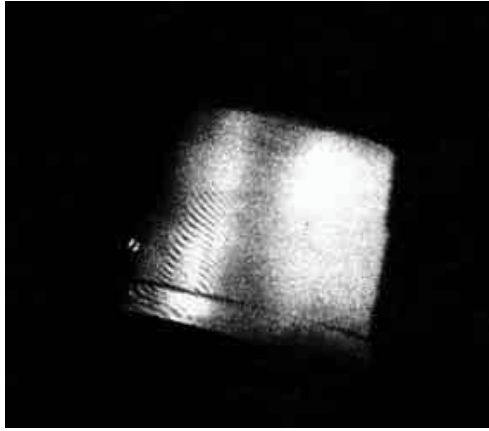


Figura 4. Detección interferométrica de deformaciones.

Debido a la alta precisión con la cual deben ser pulidas las superficies ópticas de algunos instrumentos modernos, de tal forma que no tengan desviaciones mayores a una fracción de la longitud de onda de la luz con respecto a la forma ideal requerida, se hace necesaria la determinación de la forma exacta de dichas superficies. Una técnica empleada para este propósito es empleando franjas de interferencia, las cuales al presentar deformaciones o alteraciones en su periodo, determinarán la calidad de la superficie a prueba.

Otra aplicación básica es la alineación de objetos sobre una línea recta perfecta, tal como en la plataforma de un torno de alta precisión, en donde esta alineación determinará la calidad del trabajo realizado.

Los vidrios ópticos, plásticos o cristales que se utilizan para crear lentes, prismas o cualquier otro tipo de material óptico transparente, requieren de una elevada homogeneidad tanto en su transparencia como en su índice de refracción, por lo que se requiere utilizar técnicas que determinen de forma muy precisa cambios muy pequeños de índice

de refracción y la homogeneidad de estos materiales transparentes con la tolerancia que se requiera, lo anterior se logra empleando técnicas de interferometría. Los índices de refracción de una sustancia se calculan a partir del desplazamiento de las franjas de interferencia causado por el retraso del haz.

Otra aplicación es la de detectar y medir variaciones muy pequeñas de longitud de onda, lo que permite detectar movimientos o cambios, de igual forma, muy pequeños, en la velocidad de un objeto. Lo anterior se logra apoyándose en el efecto Doppler, el cual se observa cuando una fuente luminosa se mueve respecto de un observador, la longitud de onda de la luz tendrá un cambio aparente, alargándose o acortándose; según si la fuente luminosa se aleja del observador o se acerca a él, respectivamente. Esta propiedad se utiliza para una gran variedad de aplicaciones, como por ejemplo la medida de la velocidad de flujo de líquidos o gases<sup>[4]</sup>.

Una última aplicación puede ser la de utilizar un interferómetro de Michelson para la medición de la aceleración por conteo de franjas, y como calibración de acelerómetros. El método es conocido como desaparición de franjas para la medición de pequeñas amplitudes de desplazamientos, 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, como la de un láser. Con esta técnica se han registrado amplitudes mínimas de medición de alrededor de 150 nm<sup>[5]</sup>.

### Velocimetría por láser Doppler

Es una técnica para medir la velocidad de objetos o partículas en movimiento, con precisión y de un modo no invasivo. Está basada en el efecto Doppler, que explica el hecho de que la luz cambia su frecuencia (longitud de onda) cuando es detectada por un observador estacionario, después de ser dispersada por un objeto en movimiento<sup>6</sup>.

En la figura 5 se observa una partícula en movimiento en una unidad de prueba donde dos ondas planas interfieren incidiendo a un ángulo  $\alpha$ , formando franjas brillantes y oscuras separadas a una distancia  $d$ , según la ecuación 12.

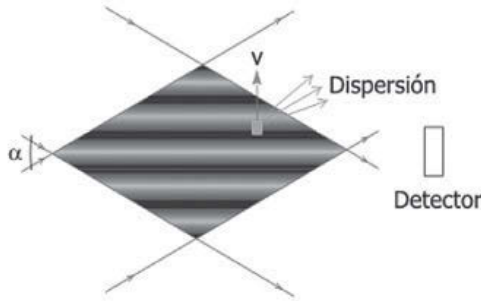


Figura 5. Velocimetría por Laser Doppler

Cuando la partícula se mueva en la unidad de prueba, ésta dispersará luz cuando pase a través de una franja de interferencia brillante y cuando pase por una franja de interferencia oscura no provocará dispersión de la luz<sup>[6]</sup>. El pulso de luz resultante puede ser observado por un detector ubicado según se observa en la figura 5.

Para una partícula moviéndose en la dirección normal al plano de interferencia con una velocidad  $v$ , el lapso de tiempo entre pulsos sucesivos de luz es

$$t_D = \frac{d}{v} \tag{20}$$

por lo que la frecuencia esta expresada como

$$f_D = \frac{1}{t_D} = \frac{2v \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\lambda} \tag{21}$$

Si existen muchas partículas de diferentes velocidades, se observaran diferentes frecuencias. Estas pueden ser detectadas utilizando un analizador espectral y el espectro de frecuencias resultante servirá para determinar cómo las partículas están distribuidas en las diferentes velocidades.

Esta técnica no distingue partículas moviéndose en direcciones opuestas. Si la dirección del movimiento es desconocida, se puede

modular la fase de una de las ondas planas, por ejemplo utilizando un modulador acusto-óptico, de tal forma que se muevan los planos de interferencia paralelamente a estos a una velocidad conocida. Esta velocidad será disminuida cuando las partículas se muevan en la misma dirección e incrementada cuando se muevan en dirección opuesta.

En la figura 5 se observan las partículas pasando entre la fuente de luz y el detector. Si las partículas dispersan suficiente luz, el detector puede ser colocado en el mismo lado que la unidad de prueba y la fuente de luz.

La velocimetría por láser Doppler puede ser aplicada para medir la velocidad de superficies en movimiento, turbulencia en líquidos y gases, la velocidad de vehículos utilizados para el control de tráfico, etcétera. Al utilizar esta técnica, en ocasiones el líquido o gas a analizar, debe ser alterado con partículas conocidas. Por ejemplo como velocímetro<sup>[7]</sup>, en mediciones de velocidad de sedimentación<sup>[8]</sup>, hidrodinámica de barcos<sup>[9]</sup>, distribuciones de velocidad de gotas de aceite en máquinas de combustión a gasolina y diesel, en medicina se utiliza para medir con alta resolución el flujo sanguíneo en arterias delicadas como la femoral y coronaria<sup>[10]</sup>, como dispositivo para medir pequeñas oscilaciones<sup>[11]</sup> y como sismógrafo<sup>[12]</sup>, además se puede utilizar para determinar curvas de resonancia de sistemas oscilatorios, como piezoeléctricos, entre otros.

### Interferómetro de Michelson de doble frecuencia

También conocido como interferómetro de corriente alterna, proporciona el desplazamiento en función de variaciones en frecuencia, en vez de variaciones en intensidad como en un interferómetro de Michelson. Sin embargo, este interferómetro es menos afectado por variaciones, como turbulencias de aire en el camino óptico<sup>[13]</sup>.

El principio de funcionamiento se basa en que dos ondas de diferente frecuencia no producen interferencia observable, al combinar dos ondas

$$u_1 = e^{i2\pi[(\nu_1) - \nu_2]t} \quad (22)$$

$$u_z = e^{i2\pi\left(\frac{z}{\lambda_2} - \nu_2 t\right)} \quad (23)$$

de diferente frecuencia, la intensidad resultante es

$$I = 2 \left[ 1 + \cos 2\pi \left( \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) z - (\nu_1 - \nu_2) t \right) \right] \quad (24)$$

Si la diferencia de frecuencia  $\nu_1 - \nu_2$  es muy pequeña y constante, la variación de la intensidad  $I$  con respecto del tiempo puede ser detectada. Lo anterior es utilizado en este tipo de interferómetros para medición de longitudes o desplazamientos, los cuales se determinan a partir de la expresión

$$d = \nu t = \frac{\Delta f \lambda t}{2} \quad (25)$$

Donde  $\Delta f$  es la diferencia en frecuencias,  $\lambda$  es la longitud de onda del haz laser y  $t$  el tiempo. Este tipo de interferómetros puede medir distancias mayores a 60 m con una resolución de  $\lambda/4$  ( $\sim 0.16\mu\text{m}$ ), la cual puede ser ampliada electrónicamente por un factor tan alto como cien. La precisión es de  $5 \times 10^{-7}$  y la velocidad puede ser medida a partir de valores superiores a 0.3 m/s, hasta valores que dependen del equipo de medición empleado. La técnica de doble frecuencia, también es conocida como detección heterodina<sup>[14]</sup>. Con las técnicas ópticas interferométricas es posible detectar desplazamientos típicos de una superficie de alrededor de 1 a 10 nm, frecuencias de operación de hasta 10 MHz, objetos con superficies rugosas, en movimiento y dentro de ambientes hostiles, etcétera; sin embargo, se presentan inconvenientes, debido a las características propias de los interferómetros<sup>[15]</sup>. El de Michelson es muy sensible a variaciones de temperatura y a vibraciones mecánicas<sup>[1]</sup>. Además de que la relación entre la vibración y la señal proporcionada por un fotodiodo es no lineal, lo que hace necesario un ajuste para que la proporción sea lineal. Otro problema es que en ambientes industriales se tiene frentes de onda no uniformes (speckle)<sup>[16]</sup>, lo cual hace más complicado el sistema óptico, además de provocar una disminución de la razón señal-ruido (SNR).

Otra alternativa son los sistemas interferométricos adaptativos<sup>[17]</sup>, que solucionan los problemas de ajuste, corrimientos de fase lentos y el uso de frentes de onda deformados. Existen tres diferentes arreglos, el de mezclado de cuatro ondas, el de mezclado de dos ondas y el de efecto de fuerza foto-electro-motriz (Fuerza FEM). En los dos primeros se tiene la limitante de que el tiempo de grabado de hologramas dinámicos es grande ( $\approx 0.1$  milisegundos), por lo cual son utilizados a frecuencias de vibración lentas. El tercero utiliza una muestra fotoconductor como foto-detector adaptativo<sup>[18]</sup>. Este tipo de arreglo puede detectar movimientos rápidos del patrón de interferencia, aún speckle, formalmente, los primeros experimentos con detección adaptativa de vibraciones mecánicas del orden de picómetros utilizando un detector de fuerza FEM de GaAs se reportaron por Stepanov<sup>[19]</sup>. La modulación en fase del haz de prueba fue asegurada por medio de la vibración de uno de los espejos de un interferómetro en la configuración experimental. Desde un punto de vista práctico, los experimentos en detección adaptativa de vibraciones reales mecánicas de superficies rugosas son por supuesto de mucha mayor importancia.

Se han realizado experimentos utilizando detectores de fuerza FEM de GaAs a una longitud de onda de 632.8 nm con un laser de He-Ne<sup>[20]</sup>, donde los modos de vibración de un piezo-eléctrico cubierto por una superficie rugosa fueron analizados para un rango de frecuencias de 1 a 50 kHz.

Para determinar la frecuencia de vibración de objetos con técnicas adaptativas se utilizan dos arreglos interferométricos, uno de ellos corresponde a un haz reflejado del objeto bajo prueba y el otro arreglo corresponde a la señal de búsqueda, la cual puede ser manipulada para determinar la frecuencia de vibración del primer arreglo interferométrico. Al tener estos dos arreglos una frecuencia de oscilación diferente, se detectará un nivel bajo de señal debido al batimiento de señales de fuerza FEM presentes, como se muestra en la figura 5, mientras que para el caso de frecuencias de oscilación iguales, el batimiento desaparecerá generando un realce de la corriente debido al efecto de fuerza FEM.

Analizando el caso más simple, donde las potencias incidentes en la muestra son aproximadamente iguales,  $I_0 \approx I_1 \approx I_2$ , el contraste entre las

franja  $m \approx 1$  y la frecuencia espacial es la misma para ambos  $K \approx K_1 \approx K_2$ , se obtiene que la expresión de irradiancia para cada patrón de interferencia es

$$I_{1,2} = I_0 \{1 + \text{sen}[Kx + \Delta_{1,2} \text{sen}(\Omega_{1,2}t) + \Phi]\} \quad (26)$$

donde el parámetro  $\Phi$ , indica una fase inicial,  $\Delta_1$  está relacionado a la amplitud de modulación de fase debida a la vibración del objeto bajo prueba y  $\Delta_2$  a la amplitud de modulación de fase de la señal de búsqueda. Para frecuencias y amplitudes de modulación diferentes ( $\Omega_1 \neq \Omega_2$  y  $\Delta_1 \neq \Delta_2$ ), la expresión de fuerza FEM está dada por<sup>[21]</sup>

$$J^i = A(\Delta_1 + \Delta_2) \text{sen}(\Omega_{ref} t + \Phi) \cos(\delta\Omega \cdot t) + A(\Delta_1 - \Delta_2) \cos(\Omega_{ref} t + \Phi) \text{sen}(\delta\Omega \cdot t) \quad (27)$$

Si se tienen frecuencias de oscilación diferentes ( $\Omega_1 \neq \Omega_2$ ), pero de igual amplitud ( $\Delta_1 = \Delta_2$ ), se obtiene que la corriente presente en la muestra debido al efecto de fuerza foto-electro-motriz proporcional al desplazamiento del patrón de interferencia en ese momento en particular está dado por

$$J^i = 2 A \Delta \text{sen}(\Omega_{ref} t + \Phi) \cos(\delta\Omega t) \quad (28)$$

donde  $A$  es una constante debida a los otros parámetros involucrados en el efecto de fuerza FEM,  $\Omega_{ref}$  es la frecuencia de referencia definida por  $\Omega_{ref} = (\Omega_1 + \Omega_2)/2$  y,  $\delta\Omega = (\Omega_1 - \Omega_2)/2$ , es la diferencia entre las dos frecuencias de modulación<sup>[22]</sup>,  $\Phi$  determina si los patrones están o no en fase. En caso de estar fuera de fase, la corriente producida será muy pequeña. Para compensar este desplazamiento es posible incorporar un piezoeléctrico con un voltaje DC aplicado. La señal resultante de la ecuación 25 se presenta en la figura 6, donde se observa una modulación  $\delta\Omega$ , la cual es la mitad de la diferencia en frecuencias, tanto del objeto a evaluar  $\Omega_1$ , como de la frecuencia de búsqueda  $\Omega_2$ , mientras que la frecuencia de referencia está ubicada exactamente a la mitad de la diferencia en frecuencias del objeto bajo prueba y búsqueda.

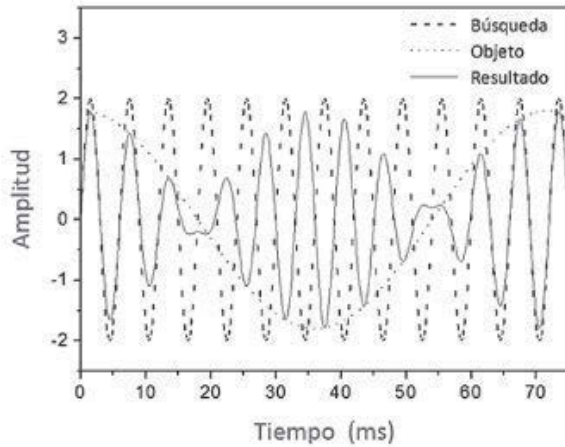


Figura 6. Señal de dos interferómetros oscilando y el resultado obtenido a partir de estos.

Conforme la señal de referencia se aproxime a la frecuencia de vibración del objeto, la diferencia en frecuencias  $\delta\Omega$  se irá reduciendo y eventualmente llegará a cero, y como consecuencia el batimiento de la señal desaparecerá.

Ahora, si se evalúa la ecuación 24 con frecuencias de modulación iguales ( $\Omega_1 = \Omega_2$ ), entonces el término cosenoidal alcanza la máxima amplitud y solo queda la parte senoidal, por lo tanto

$$J' = 2 A \Delta (\text{sen } \Omega_{ref} t + \Phi) \quad (29)$$

Los sistemas anteriores han sido ampliamente utilizados para la detección de daños estructurales debido al gran impacto que tienen en cuanto a seguridad en diferentes áreas, particularmente en la industria (aeronáutica, automotriz, etcétera)<sup>[23]</sup>. Además de tener la ventaja de ser técnicas no destructivas, fácil de usar, suficientemente rápidas para ser supervisadas en tiempo real y con una reducida incertidumbre en la respuesta, la cual debe ser clara y de fácil interpretación<sup>[24]</sup>.



## Interferometría para espectroscopía

La interferometría externamente dispersada (EDI) es una técnica para realzar la capacidad de espectrógrafos ampliando el ancho de banda utilizado para espectroscopia de alta resolución y velocimetría radial Doppler. Colocando un interferómetro Michelson de espejos ligeramente inclinados, con una diferencia de camino óptico desde 1 hasta 3 cm, cerca de la rendija de un espectrofotómetro, se formarían franjas sobrepuestas en el espectro observado. Este patrón de Moirè proporciona información espectral detallada, tal como se observa en la figura 7. El periodo espacial del patrón Moirè, está determinado de manera unívoca por las frecuencias espaciales de los interferómetros que se superponen, con lo que la frecuencia espacial del patrón Moirè permitirá establecer una relación entre las longitudes de onda de las fuentes que iluminan el interferómetro. Se han reportado datos indicando una resolución de 140,000 líneas de un espectrofotómetro con una capacidad de 25,000<sup>[25]</sup> (líneas).

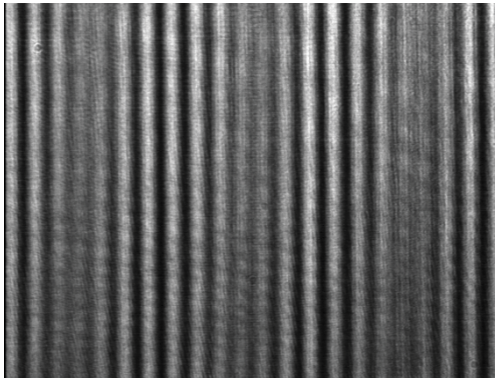


Figura 7. Patrón de Moirè registrado con una cámara CCD<sup>[26]</sup>.

Este sistema fue originalmente desarrollado para velocimetría radial (bajo un cambio Doppler el patrón Moirè completo cambia en fase). Sin embargo, la capacidad de este sistema para medir con precisión ( $\sim \lambda/20,000$ ) cambios en las franjas de luz blanca entre fuentes espectrales simultáneas múltiples, sugiere muchas posibilidades en metrología. El

sistema EDI posee ventajas en ancho de banda sobre interferómetros internamente dispersos<sup>[27]</sup>, los cuales tienen limitaciones de ancho de banda debido al cambio rápido en el periodo de las franjas contra la longitud de onda. En comparación con un interferómetro Fabry-Perot disperso el cual produce franjas con un impulso espectral estrecho, las franjas de EDI transmiten grandes flujos promedio, efecto heterodino, y permite la recuperación precisa por trigonometría de información espectral.

Los procesos mencionados anteriormente son un claro ejemplo de la gran variedad de aplicaciones que se les da a los sistemas interferométricos, empleando las ondas de luz como unidad de medida, abarcando áreas como ingeniería, medicina, astronomía, etc. Las aplicaciones que se visualizan para ingeniería ambiental son muchas, desde la medición de variables físicas (como temperatura, densidad, presión, etc.) hasta las características espectrales de elementos utilizando otras herramientas ópticas (como espectroscopia, procesamiento de imágenes, etc.).

## Bibliografía

- [1] Eugene Hecht, 2000, *Óptica*, Adelphi University, Addison Wesley, 3a Edición, España, 384-440.
- [2] Kjell J. Gasvik, 2002. *Optical Metrology*, John Wiley & Sons, Third Edition, England, 37-65
- [3] José Rodríguez García, 1997. *Fundamentos de óptica geométrica*, Universidad de Oviedo, España, 40-42
- [4] Durst F., Melling A., and J. H. Whitelaw, 1976. "Principles and practice of laser-Doppler anemometry", en *Academic Press*, New York , p. 410
- [5] Ricardo Ruiz Boullosa y Antonio Pérez López, 1990. "Interferómetro laser y conteo de franjas aplicado a la calibración de acelerómetros y calibradores de vibraciones", en *Revista Mexicana de Física*, Vol. 36, núm. 4, pp. 622-629
- [6] Yeh, Y. & Cummins, H., 1964, *Localised Fluid Flows Measurements with a He-Ne Laser Spectrometer*. *Appl. Phys. Lett.*, 4, pp. 176-178.
- [7] R. H. Belansky and K. H. Wanser, 1993, *Am. J. Phys*, No. 61, p. 1014
- [8] H. Salinas-Tapia, J.A. García-Aragón y C. Díaz-Delgado, 2007, "Análisis experimental del efecto de la turbulencia en la velocidad

- de caída de sedimentos en suspensión", en *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, Vol. IX, No. 1, p. 49-58
- [9] Fry, D. J.; Jessup, S.; Huang, T. T., 1987, "Application of Laser Doppler Velocimetry for Ship Hydrodynamic Measurements", *Proceedings of the 18th International Towing Tank Conference*, Kobe, Japan, Volume 2, p. 358
- [10] H. Nishihara, 1982, *Applied Optics*, No. 21, p. 1785 .
- [11] J. B. Diamond, 1990, *American Journal of Physics*, No 58.
- [12] G. Da Costa, G. Kiedansky and R. Siri, 1988, *American Journal of Physics*, No 56.
- [13] Chang YS, Chien PY, Chang MW, 1997, "Distance and Velocity Measurements by the use of an Orthogonal Michelson Interferometer", en *Applied Optics*, vol. 1, No 36, pp. 258-65.
- [14] V. G. Atavin, A. A. Mokhnatov and Yu. V. Khudyakov, 2000, *New Possibilities for Vibration-Amplitude Measurement by Heterodyne Laser Vibrometer*, Springer New York, vol. 43, No. 2, pp. 140-143
- [15] Saleh B. E. A., 1991, *Fundamentals of Photonics*, Ed. John Wiley & Sons, Inc., M.C. Teich
- [16] Dewhurst R. J., 1999, Q. Shan, "Optical Remote Measurement of Ultrasound", en *Meas. Sci. Technol.* 10, R139-R168
- [17] Stepanov S., 2000, *Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices*, vol. 2, Ed. H. Nalwa, p. 205
- [18] Mitchell P. V., 1995, et al. *Tech. Digest of Photorefractive Materials, Effects and Applications Conf.* (Aspen, Lodge,), p. 432.

- [19] Stepanov S. I., I. A. Sokolov, G. S. Trofimov, V. I. Vlad, D. Popa and I. Apostol, 1990. *Opt. Lett.*, **15**, 1239
- [20] Glass A. M., D. D. Nolte, D. H. Olson, G. E. Doran, D. S. Chemla, and W. H. Knox, 1990, *Resonant Photodiffractive four Wave Mixing in Semi-insulating GaAs/AlGaAs Quantum Wells*, *Opt. Lett.*, vol. **13**, 264-266
- [21] García Lara, Carlos; Vázquez Sánchez, Rubén y Camas Anzueto, Jorge, 2006, "Efecto de fuerza FEM para determinar frecuencias de vibración utilizando una muestra de pozos cuánticos de InGaAs", en *Ciencia y tecnología en la frontera*, Año III, núm. 5, p. 52-62
- [22] Safa Kasap, 1999. *Group Index vs. Wavelength Properties of Glasses, Solved Problems in Optoelectronics*, University of Saskatchewan, Canadá.
- [23] Castellini P., G. M. Revel, 2003. *Damage Detection by Laser Vibration Measurement*, Roma.
- [24] Sokolov Igor A., 1998, *Adaptive Photodetectors for Vibration Monitoring, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*.
- [25] David J. Erskine and Jerry Edelstein, 2004. *Interferometric resolution boosting for spectrographs*, SPIE 5492, Conf. on astronomical instrumentation, Scotland
- [26] Jorge Garcia-Sucerquia, Juan Carrasquilla y Diego Hincapié, 2003. "Medición de la longitud de onda por medio la técnica Moirè", en *Revista Colombiana de física*, vol. 35, núm. 2, pp. 384-387
- [27] J. Harlander, R. Reynolds, and F. Roesler, 1992, "Spatial heterodyne spectroscopy for the exploration of diffuse interstellar emission lines at far-ultraviolet wavelengths", en *Applied Journal* 396, p. 730



## Semblanza de revisores invitados

### Alejandro Ruiz Sibaja

El profesor Alejandro Ruiz Sibaja nació en Tapachula, Chiapas el 9 de abril de 1964. Estudió la carrera de Ingeniería Civil desde 1982 hasta 1986 en el Instituto Tecnológico de Tapachula (ITTAP), Chiapas y obtuvo el título de Ingeniero Civil en mayo de 1987. En 1986 el Instituto Tecnológico de Tapachula le dio un reconocimiento por ser el mejor alumno de su generación. Estudió la maestría en Ciencias con especialidad en Estructuras de 1988 a 1990 en la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Obtuvo el grado con una tesis sobre caracterización dinámica estructural de plataformas marinas de acero mediante mediciones de vibración. Esta tesis consiguió el premio, por parte del Instituto Politécnico Nacional, a la mejor tesis de posgrado en Ingeniería Civil en 1991. En 1990 el Instituto Politécnico Nacional le otorgó un premio por ser el mejor alumno de su generación en la maestría en Ciencias con especialidad en estructuras. De 1992 a 1996 el profesor Ruiz Sibaja dio clases en la maestría en Ciencias con especialidad en estructuras, de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional. En 1995 el Instituto Politécnico Nacional lo premió como Profesor Distinguido de la maestría en ciencias con especialidad en estructuras. Realizó su tesis de maestría como becario del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) de 1990 a 1991, en el Departamento de Análisis de Esfuerzos, de la División de Ingeniería Civil de la Subdirección de Ingeniería de Proyectos de Explotación. Posteriormente de 1992 a 1996, el profesor Ruiz Sibaja