

La interferometría y sus aplicaciones científicas e industriales

Claudia Sifuentes Gallardo, Alejandro Delijorge Ramírez
Juan Manuel Alvarez Raygoza y Arturo Moreno Báez

Interferometry and its scientific and industrial applications

Recibido: marzo 12, 2013

Aceptado: abril 10, 2013

Palabras clave: Interferometría; principio de superposición; Fibra óptica.

Abstract:

In this paper we analyze the properties of coherent light (laser), specifically when they are applied in interferometry, exploiting the characteristics of wave superposition principle in order to disseminate the current state of the art and invite you to learn more about its applications in scientific research and industry, or to invite anyone wishing to enjoy this technology.

Keywords: Interferometry, superposition principle, optical fiber.

DESDE la invención del láser en 1960 se han encontrado infinidad de aplicaciones para éste, mismas que van desde las más triviales como apuntadores, hasta aquellas que hace 50 años serían impensables para el ser humano. Aún en la actualidad el estado del arte continúa descubriendo aplicaciones sorprendentes en las que la luz coherente y sus propiedades son imprescindibles. Una de las técnicas que más auge ha tenido y sigue evolucionando constantemente (y donde el láser se utiliza) es la posibilidad de medir algunas variables físicas empleando luz, habilidad que por increíble que parezca, hoy es una realidad ampliamente difundida; conocida generalmente como instrumentación óptica.

Una de las técnicas que más auge ha tenido es la posibilidad de medir algunas variables físicas empleando luz

Cuando se piensa en instrumentación óptica se vuelve obligatorio pensar también en interferometría. La interferometría es una técnica que aprovecha las propiedades ondulatorias de la luz para desarrollar dispositivos de medición

de gran sensibilidad y resolución que pueden llegar al orden de los nanómetros. Es precisamente la utilidad anterior y muchas otras que son posibles asignar a la interferometría las que hacen que hoy en día se encuentran interferómetros en prácticamente cualquier rama de la industria y en la investigación.

INTERFEROMETRÍA

El interferómetro es un instrumento empleado para producir interferencia entre dos o más rayos de luz (generalmente coherente ¹) tomando como base al principio de superposición de ondas electromagnéticas.

La ecuación de onda está dada por la ecuación 1

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (1)$$

donde:

ψ es la función de onda en el espacio-tiempo.

x es la variable de espacio en metros.

t es la variable de tiempo en segundos.

v es la velocidad de la onda en el medio a través del cual viaja en m/s .

La ecuación 1 es una ecuación diferencial lineal, homogénea de segundo orden. Considerando a las funciones ψ_1 y ψ_2 como soluciones generales de la ecuación de onda, se tiene que $\psi_3 = (\psi_1 + \psi_2)$ es también una solución a la misma. La solución anterior implica que cuando las funciones de onda ψ_1 y ψ_2 coinciden en el espacio, la amplitud de la solución ψ_3 será la suma algebraica lineal de las amplitudes A_{ψ_1} y A_{ψ_2} . Por ejemplo, se tendrá entonces que cuando la amplitud tanto de ψ_1 como de ψ_2 sea positiva, ψ_3 será una onda de amplitud positiva y mayor dada por $A_{\psi_1} + A_{\psi_2}$ (interferencia constructiva); cuando la amplitud una de las ondas que intervienen en el proceso de interferencia es negativa se tendrá que la amplitud de ψ_3 será $A_{\psi_1} - A_{\psi_2}$ o bien $A_{\psi_2} + A_{\psi_1}$ (interferencia destructiva); por último, es posible también obtener una amplitud dada

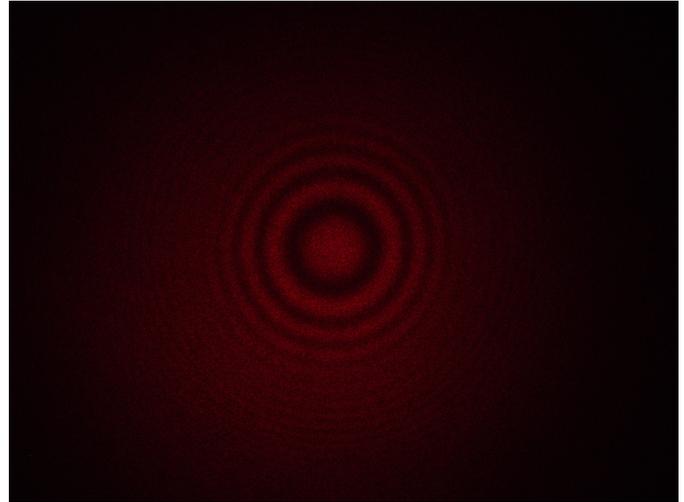


Figura 1. Patrón de interferencia obtenido en el laboratorio de Óptica y Procesamiento de Imágenes de la Universidad Autónoma de Zacatecas.

por $-(A_{\psi_1} + A_{\psi_2})$ cuando ambas ondas iniciales tienen amplitud negativa. El principio de superposición previamente mencionado está definido por la solución ψ_3 .

En un interferómetro, usualmente un haz de luz coherente es separado en dos rayos de luz por un divisor de haz (espejo parcialmente reflector). Cada haz sigue un camino diferente al del otro (camino óptico) y ambos son recombinados antes de ser detectados. La diferencia en la distancia recorrida por cada haz produce una diferencia de fase entre ellos. Cualquier cambio en la fase es indicio de un cambio en la distancia o en el índice refractivo en uno de los caminos ópticos; al momento de hacer reincidir los rayos de luz, la diferencia de fase entre ellos produce un patrón de anillos concéntricos o franjas de luz espaciadas entre ellas producto de las interferencias constructivas y destructivas como el que se muestra en la Figura 1.

Las características del patrón de interferencia dependen de la naturaleza de la fuente de luz y de la orientación del divisor de haz y los elementos empleados para dividir el haz inicial (generalmente espejos). Los interferómetros reciben ciertos nombres y clasificación dependiendo principalmente de los elementos empleados para su implementación y la orientación de los mismos. El más común de ellos es el interferómetro de Michelson, llamado así en honor de su in-

¹ Onda luminosa cuyos puntos sobre la misma mantienen una fase constante, dando la característica de luz monocromática.

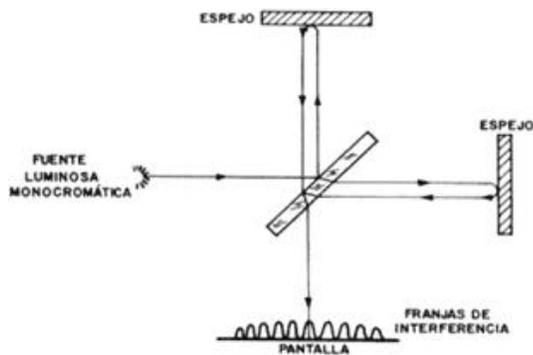


Figura 2. Arreglo de un interferómetro básico de Michelson.

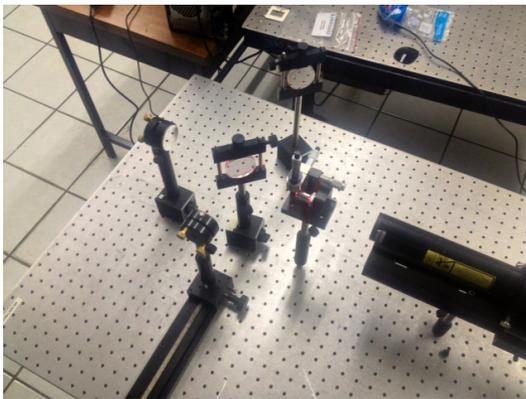


Figura 3. Interferómetro de Michelson implementado en el laboratorio de Óptica y Procesamiento de Imágenes de la Universidad Autónoma de Zacatecas.

ventor, Albert Abraham Michelson y empleado por primera vez en el conocido experimento de Michelson y Morley ². En el interferómetro de Michelson el haz inicial de luz es dividido en dos caminos ópticos, los cuales son perpendiculares entre ellos como puede verse en la Figura 2. El arreglo implementado en el laboratorio de Óptica y Procesamiento de Imágenes de la Universidad Autónoma de Zacatecas es mostrado en la Figura 3. Más adelante se mencionarán otros tipos de interferómetros en Aplicaciones de la interferometría.

² Experimento realizado en 1887 con la finalidad de demostrar la supuesta existencia del éter y su efecto sobre las ondas luminosas que viajan en el espacio.

La técnica que emplea el uso de interferómetros con algún propósito es llamada interferometría. La distancia entre dos franjas del patrón de interferencia es equivalente a la longitud de onda del haz de luz, por lo que con el empleo de la interferometría es posible realizar mediciones de distancias muy pequeñas equivalentes a un múltiplo de la longitud de onda del haz de luz utilizada en la implementación del interferómetro. Desde sus inicios, la interferometría ha sido una técnica ampliamente utilizada sin embargo, el hecho que revolucionó el empleo de la misma fue la invención del láser [2], que hoy es empleado como fuente de luz en la mayoría de los interferómetros. Por la naturaleza de la luz láser y las características de su longitud de onda es posible medir distancias del orden de los micrómetros y hasta nanómetros cuando dichos dispositivos son aplicados en interferometría. El interferómetro es el instrumento de medición más preciso y sensible conocido por el hombre hasta ahora y como es de suponer, el empleo de la interferometría está ampliamente difundido y cuenta con una gran variedad de aplicaciones, algunas de las cuales se mencionan posteriormente.

El interferómetro es el instrumento de medición más preciso y sensible conocido por el hombre hasta ahora

APLICACIONES DE LA INTERFEROMETRÍA

Se mencionarán algunas aplicaciones de la interferometría a diferentes áreas. Una de ellas es en aplicaciones industriales. Tal es el caso en la detección y medición de deformaciones de una estructura, ya que ésta al ser expuesta a fuerzas externas sufre dicha deformación además de producir concentraciones de esfuerzos dentro y en su superficie. En este tipo de aplicaciones se utiliza la interferometría electrónica de patrones de moteado, ésta técnica permite la detección en campo completo de los desplazamientos de un objeto de prueba. Los defectos internos y externos intro-

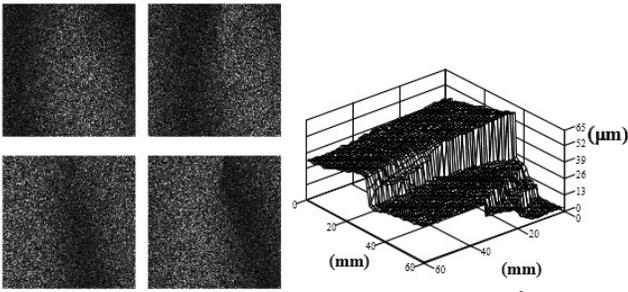


Figura 4. Resultados de la medición de la fractura. a) Franjas de Moteado. b) Isométrico de la medición de fractura [3].

ducen anomalías en los desplazamientos, los cuales se traducen en deformaciones del patrón de franjas [3].

Al someter una superficie a una carga mecánica, ésta sufre microdesplazamientos. Al analizar los interferogramas de moteado se extrae la fase y los desplazamientos que sufrió el objeto de tal manera que se puede determinar la magnitud física que se desea medir. Como ejemplo se analiza una placa metálica a la cual se le aplicó una carga puntual, posteriormente fué analizada mediante un interferograma. Como puede observarse en la Figura 4, el desplazamiento máximo obtenido debido a la carga en que se abre la fractura es del orden de 65 μm [3].

La interferometría de igual forma es una técnica utilizada en la radioastronomía, rama de la astronomía. Tal es el caso del proyecto Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) el mayor proyecto astronómico del mundo el cual comprende un conjunto de antenas repartidas en una extensa área donde trabajan en conjunto utilizando el método de interferometría cuya resolución depende de la separación máxima entre las antenas. Las señales de las antenas se combinan y se procesan para simular el funcionamiento de un telescopio individual, es decir, un interferómetro funciona como un telescopio del tamaño del conjunto entero [4].

El conjunto principal de ALMA está compuesto por 50 antenas de 12m de diámetro dispuestas en configuraciones específicas, simulando un telescopio gigante. Otras 16 antenas formaran el Conjunto Compacto Atacama cuya función será la de proporcionar una imagen mas general de los ob-

jetos astronómicos observados y medir el brillo absoluto de los objetos. Gracias a la interferometría, el conjunto de antenas de ALMA operan como un dispositivo científico único el cual estudia al universo a longitudes de onda milimétricas y submilimétricas, lo cual no sería posible con un solo reflector [4].

Un componente fundamental en la interferometría es la fibra óptica, ya que se han construido dispositivos interferométricos totalmente con este componente, lo cual a generado el nacimiento de una generación de sensores ópticos. En los dispositivos interferométricos se suele utilizar la fibra monomodo ya que esta mantiene totalmente la coherencia espacial logrando así una visibilidad máxima de las franjas interferenciales. La mayoría de los interferómetros de fibra óptica son dispositivos de dos haces en los que una fibra óptica es expuesta a los estímulos y la otra se aísla de los mismos. Los mas utilizados son el de Mach-Zehnder, Michelson y Sagnac [5].

En el interferómetro de Mach-Zehnder la luz proveniente de la fuente se inyecta en una fibra óptica, esta señal guiada se divide en amplitud con un acoplador direccional obteniendo dos brazos de fibra óptica, uno de señal y otro de referencia, posteriormente con otro acoplador se recombinan los dos haces que interfieren coherentemente, esta interferencia se puede observar en las dos salidas del acoplador[5].

En el interferómetro de Michelson en fibra óptica solo se utiliza un acoplador direccional; los extremos de las fibras de salida de este acoplador son reflectantes de forma que los haces vuelven hacia el acoplador donde se recombinan, por tanto se tienen dos salidas, una de ellas vuelve a la fuente de luz, esto provoca un exceso de ruido, por lo cual es conveniente aislar la fuente de esta realimentación. Generalmente sucede en diodos laser. Las salidas de este dispositivo tiene la misma forma que el interferómetro de Mach-Zehnder, pero en este caso la visibilidad depende de la reflectividad de las fibras y del grado de coherencia[5].

El giróscopio óptico el cual esta basado en el efecto Sagnac. En este interferómetro los dos haces recorren caminos idénticos pero en direcciones opuestas, el equivalente en fibra óptica utiliza un acoplador direccional en donde el haz de entrada es separado por el acoplador cuyas dos salidas están unidas por un anillo de fibra. de esta forma circulan

por este dos haces en direcciones opuestas que se combinan en el acoplador [5].

Otro interferómetro que es importante mencionar es el interferómetro de Fabry-Perot, el cual está basado en las interferencias de ondas múltiples generadas mediante dos láminas plano paralelas iluminadas en incidencia próxima a la normal. Este interferómetro no hace uso de la fibra de vidrio, sino que utiliza dos laminas de vidrio plano paralelas cuya superficie interna está cubierta de una película plateada de alta reflectividad.

Otra área de aplicación de la interferometría es en la sismología tal es el caso de la Interferometría diferencial DInSAR, técnica utilizada para el monitoreo de la subsidencia en Bogotá por mencionar un ejemplo. La técnica de Interferometría Diferencial SAR (DInSAR) permite cuantificar los desplazamientos verticales del terreno con precisión superior al centímetro monitoreando grandes extensiones de terreno mediante la utilización de datos de sensores radar instalados en satélites [6].

La técnica de interferometría SAR es empleada para reconstruir la topografía de la escena de estudio combinando dos imágenes SAR obtenidas desde posiciones distintas. El par de imágenes SAR tomadas de diferentes puntos de vista se combinan de manera que la diferencia en sus distancias a un mismo punto se relaciona con la topografía de la escena, además de que el interferograma debe ser desarrollado y geodificado, es decir, para proyectar el mapa de altura en coordenadas radar sobre la superficie terrestre consiguiendo el modelo de la elevación digital [6].

En la Oftalmología también hace el uso de la interferometría, ya que el uso de esta permite medir la agudeza visual de la retina, esta agudeza visual se conoce como potencial visual.

Gracias a la interferometría se pueden realizar gran cantidad de mediciones sumamente precisas entre las cuales se pueden mencionar las siguientes. Por ejemplo en la medición y definición de un metro patrón. También se pueden realizar medidas de las deformaciones de una superficie ya que debido a causas variadas se pueden generar deformaciones que no son detectables a simple vista, por ejemplo, la fractura de un elemento mecánico de una máquina. Otra aplicación es en la determinación de la forma

exacta de una superficie, ya que en instrumentos modernos de alta precisión las superficies ópticas tienen que tallarse de tal forma que no tengan desviaciones de la forma ideal. También se utiliza la interferometría en la alineación de objetos sobre una línea recta perfecta, puesto que en ocasiones se tiene la necesidad de tener una línea recta perfecta en ciertas actividades ingenieriles, como por ejemplo, la base de un torno de alta precisión debe ser tanto más recta cuanto más fino sea el torno. Además se pueden hacer mediciones de ángulos con alta precisión. Estos ejemplos hacen ver la utilidad que tiene la interferometría en la metrología óptica utilizando las ondas de luz como escala [7].

La interferometría en la ingeniería biomédica

En la actualidad, la interferometría y las técnicas ópticas parecen tener un futuro prometedor en cuanto al análisis de las ciencias de la salud, pues éstas tienen la ventaja de ser no invasivas, no ionizantes, fáciles de implementar, altamente eficientes y baratas. Recientemente se han desarrollado métodos para detectar morfologías celulares alteradas por medio de la interferometría. Las alteraciones en estructura celular son asociadas al cáncer en sus etapas tempranas, por lo que el empleo de dicha técnica puede representar una herramienta poderosa para el diagnóstico de este padecimiento. Además, la capacidad de la interferometría para medir desplazamientos sumamente pequeños permite estudiar con alta precisión el crecimiento o disminución del tamaño de tumores.

La interferometría también es aplicada como una técnica no invasiva para estudiar el avance o recuperación de fracturas óseas [8].

Otra de las más reconocidas investigaciones dentro de la ingeniería biomédica consiste en medir la velocidad del flujo de sangre por medio de una técnica especial de interferometría ultrasónica donde dos pulsos son emitidos simultáneamente por dos láseres de cristal y pasan a través de los vasos sanguíneos, los pulsos son recibidos nuevamente por los láseres y la diferencia de fase entre ellos es empleada para calcular la velocidad de flujo. Con la tecnología anterior, se ha logrado el monitoreo del flujo sanguíneo con du-

raciones de hasta más de tres meses con ayuda de implantes telemétricos³ [9].

CONCLUSIONES

Las propiedades de la interferometría analizadas anteriormente y la infinidad de aplicaciones con las que ésta cuenta en la actualidad permiten augurar que esta técnica no solamente se mantendrá vigente durante mucho tiempo más, sino que también cuenta con un muy promisorio futuro de tal forma que en unos cuantos años la instrumentación óptica de la mano de la interferometría tendrá prioridad sobre la mayoría de las técnicas aplicadas en metrología. Por lo anterior es que el presente artículo exhorta e invita a toda aquella persona dedicada a la investigación científica y al desarrollo tecnológico, especialmente a aquellas que trabajan en el área de la óptica a pensar en la interferometría como un campo que cuenta con una enorme posibilidad de crecimiento, tomando en cuenta además que en la actualidad es posible implementar un interferómetro en cualquier laboratorio universitario de óptica e incluso puede lograrse con apuntadores láser económicos y espejos comunes y rudimentarios, por lo que para iniciarse en esta técnica basta prácticamente con desearlo.

Bibliografía

- [1] Hecht, Eugene (2002). *Optics*, Addison Wesley, pp. 14, 20-21.
- [2] Hariharan P. (2007). *Basics of interferometry*, Academic Press, pp. 1-5.
- [3] R. Rodriguez Vera, J. A. Rayas. Algunas aplicaciones industriales de la interferometría electrónica de patrones de moteado. [online] Disponible en internet: <http://www.cenam.mx/publicaciones/gratuitas/descarga/memorias%20simposio/documentos/ta-or069.pdf>
- [4] Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array. Disponible en internet: <http://www.almaobservatory.org/es/tecnologia/interferometria>
- [5] Ma. Cruz Navarrete Fernandez. Interferómetro de fibra óptica de tres brazos. Madrid: Febrero 1994. Presentado en la Universidad Complutense de Madrid para obtener el grado en Ciencias Físicas.
- [6] Sanchez Pablo, Barreto Arciniegas German. La interferometría diferencial DInSAR- Una técnica para el monitoreo de la subsidencia.
- [7] Daniel Malacara. Óptica tradicional y moderna. Disponible en línea: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/084/htm/optica.htm>
- [8] Luo, Qingming (2010). *Optics in health care and biomedical optics*, Proceedins of the SPIE, Vol. 7845, pp. 11.
- [9] Rader, Roland D. (1974) *An interferometric blood flow measurement technique - A brief analysis*, Vol. 21, pp. 293-297.

Acerca del autor o autores

Claudia Sifuentes y Arturo Moreno son investigadores del Cuerpo Académico de Procesamiento e Instrumentación Óptica. Ambos son Profesores de Tiempo Completo de la Fac. de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas.

correo-e: clausifuen@yahoo.com.mx
morenob20@hotmail.com

Alejandro Delijorge Ramírez y Juan Manuel Alvarez Raygoza son estudiantes del último año del Programa de Ingeniería en Comunicaciones y electrónica de la Universidad Autónoma de Zacatecas.

³ La telemetría es la técnica que permite realizar mediciones de forma remota.