Generación de vórtices ópticos en espiral en un interferómetro de Mach-Zehnder

Generation of spiral optical vortices in a Mach-Zehnder interferometer

Areli Montes-Pérez^(1,*,A), Amalia Martínez-García^(1,A), Gustavo Rodríguez-Zurita^(2,A),
Carlos Robledo-Sánchez⁽²⁾, José F. Vázquez Castillo⁽²⁾, Noel-Ivan Toto-Arellano^(3,A)

1. Centro de Investigaciones en Óptica A.C., Loma del Bosque #115, Col. Lomas del Campestre, C.P. 37150, A.P. 1-948, León, Guanajuato, México.
2. Laboratorio de Interferometría y Holografía, Facultad de Físico-Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
3. División de Óptica y Fotónica, Área de Electromecánica Industrial, Universidad Tecnológica de Tulancingo, Hidalgo, México.

(*) Email: arelimp@cio.mx

A: miembro de AMO / AMO member

Recibido / Received: 07/09/2012. Revisado / Revised: 07/02/2013. Aceptado / Accepted: 11/02/2013.

DOI: <http://dx.doi.org/10.7149/OPA.46.1.33>

RESUMEN:

Dentro de la interferometría, una de las propiedades relacionadas con los vórtices y de interés en este trabajo consiste en la posibilidad de obtener patrones de interferencia que porten información del signo de la fase. Esta información es reconocible en el sentido de giro de franjas espirales en la vecindad de un vórtice. Las franjas espirales surgen de la superposición de un frente de onda con vórtices y una onda esférica. En este trabajo se muestran resultados experimentales y numéricos de la generación de vórtices ópticos con un SLM (modulador de luz espacial) en un interferómetro de Mach-Zehnder.

Palabras clave: Interferometría, Espiral de Fase, Modulador de Luz Espacial, Vórtices Ópticos.

ABSTRACT:

In interferometry, one of the interesting properties related to vortices and of interest in this work is the possibility of creating interference patterns that carry information on the sign of the phase. This information is recognizable in the direction of rotation of the spiral strips in the vicinity of a vortex. The spiral fringes arise from the superposition of a wavefront with vortices and a spherical wavefront. In this paper, experimental and numerical results show the generation of optical vortices with a SLM (spatial light modulator) in a Mach-Zehnder interferometer.

Key words: Interferometry, Spiral Phase, Spatial Light Modulator, Optical Vortices.

REFERENCIAS Y ENLACES / REFERENCES AND LINKS

- [1]. S. Cooper, D. Tomkins, M. Petty, "Surface-relief diffraction gratings by multiple-beam coherent phase exposure", *Opt. Lett.* **22**, 357-359 (1997). [DOI](#)
- [2]. C. Maurer, A. Jesacher, S. Bernet, M. Ritsch-Marte, "What spatial light modulators can do for optical microscopy", *Laser Photonics Rev.* **5**, 81-101 (2011). [DOI](#)
- [3]. K. T. Gahangan, G. A. Swartzlander Jr., "Optical vortex trapping of particles", *Opt. Lett.* **21**, 827-829 (1996). [DOI](#)
- [4]. N. R. Heckenberg, R. McDuff, C. P. Smith, A. G. White, "Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms", *Opt. Lett.* **7**, 221-223 (1992). [DOI](#)
- [5]. V. Y. Bazhenov, M. V. Vasnetsov, M. S. Soskin, "Laser-beams with screw dislocations in their wavefronts", *JETP Lett.* **52**, 429-431 (1990).

- [6]. K. Crabtree, J. A. Davis, I. Moreno, "Optical processing with vortex-producing lenses", *Appl. Opt.* **43**, 1360-1367 (2004). [DOI](#)
- [7]. S. Fürhapter, A. Jesacher, S. Bernet, M. Ritsch-Marte, "Spiral interferometry", *Opt. Lett.* **30**, 1953-1955 (2005). [DOI](#)
- [8]. S. N. Khonina, V. V. Kotlyar, M. V. Shinkaryev, V. A. Soifer, G. V. Uspleniev, "The phase rotor filter", *J. Mod. Opt.* **39**, 1147-1154 (1992). [DOI](#)
- [9]. G. A. Swartzlander Jr. "Peering into darkness with a vortex spatial filter", *Opt. Lett.* **26**, 497-499 (2001). [DOI](#)
- [10]. J. Arlt, K. Dholokia, L. Allen, M. J. Padgett. "The production of multiringed Laguerre-Gaussian modes by computer-generated holograms", *J. Mod. Opt.* **45**, 1231-1237 (1998). [DOI](#)

1. Introducción

La formación de los vórtices ópticos ha sido de interés en los últimos 25 años [1], debido a la variedad de aplicaciones, en microscopía se pueden generar regiones de intensidad nula y fase aleatoria que sirven para encerrar cuerpos no cargados eléctricamente y así, utilizar está región como "trampas ópticas" o "pinzas ópticas" y facilitar la manipulación de estos objetos [1-3]. Es posible obtener vórtices ópticos haciendo que un haz láser pase a través de cristales, soluciones líquidas o vapores de materiales de linealidades, guías de onda, hologramas, transductores o haces láser con modos Laguerre-Gaussianos diferentes de cero, entre otros [4].

Los modos Laguerre-Gaussianos (LG) se pueden crear con una placa espiral de fase (PSF por sus siglas en inglés), originada por hologramas, o por un modulador de luz espacial (SLM por sus siglas en inglés), para el primer caso el holograma genera una rejilla de Ronchi con una dislocación en las franjas (ver Fig. 1), y si se hace incidir un haz láser, el holograma genera vórtices ópticos cuya carga topológica se incrementa con el orden de difracción [5]. En este caso el orden cero es puramente Gaussiano y los vórtices tienen elipticidad opuesta a un lado u otro del orden cero y el número de dislocaciones está directamente relacionado con la carga topológica del primer orden de difracción. Para incrementar la eficiencia se puede usar una rejilla de fase en lugar de una rejilla de amplitud. En el segundo caso, el modulador espacial tiene la ventaja de poder crear vórtices dinámicos, conjuntos de vórtices u otros tipos de haces (ya que es un dispositivo optoelectrónico controlable) [6].

Una de las propiedades relacionadas con los vórtices y de interés en este trabajo consiste en la posibilidad de obtener patrones de interferencia que porten información del signo de la fase. Esta información es reconocible en el sentido de giro de franjas espirales generado en la vecindad de un vórtice [7]. Las franjas espirales surgen de la superposición de un frente de onda con vórtices y una onda esférica. En la Fig. 2 (renglón 1 y 2, columna (a)) se muestra la simulación de dos patrones de interferencia con simetría en espiral con giros opuestos, estos interferogramas resultan de la distribución de fase mostrada en la Fig. 2 (renglón 1 y 2, columna (b)).

La aplicación práctica de este resultado se obtiene cuando logramos hacer coincidir un vórtice, con un punto extremo local (máximo o mínimo) de una distribución de fase, el sentido del giro de la franja espiral (resultante de la superposición de la distribución de fase con una

Fig. 1: Rejilla de Ronchi con una dislocación.

Fig. 2: Simulación numérica. 1(a) Espiral con signo negativo y 2(a) positivo, 1,2(b) mapa de fase, vórtice con carga topológica para $m = \pm 1$... Cada tono indica un cambio de fase de 0 a 2π , la cual es equivalente a la escala de grises en el SLM que va de oscuros a brillantes.

referencia apropiada) revelaría el carácter máximo o mínimo del valor extremo, este resultado no se obtiene con interferometría convencional y es una de las ventajas de la propuesta realizada. La solución propuesta consiste en definir un sistema óptico con una respuesta impulso con vórtice central, que puede realizarse con una pupila con variación de fase azimutal [7]. Esta pupila se ha interpretado como una versión en 2D de un filtro de Hilbert [8]. La referencia requerida puede formarse con un brazo extra paralelo al sistema, como en un interferómetro Mach-Zehnder [5].

Una de las propiedades relacionadas con los vórtices y de interés en este trabajo consiste en la posibilidad de obtener patrones de interferencia que porten información del signo de la fase. Esta información es reconocible en el sentido de giro de franjas espirales en la vecindad de un vórtice.

2. Vórtices ópticos

Un vórtice óptico se define como una onda, cuyo campo eléctrico posee una singularidad de fase en un punto donde la amplitud es nula y la fase es indeterminada. El campo en la singularidad es

Fig. 3: Propagación de un frente de onda helicoidal de un modo LG. El término de fase azimutal $\exp(im\phi)$ produce un frente de onda helicoidal. La variación de la fase a lo largo del camino C es de 0 a 2π por tanto la intensidad en el centro de la distribución de intensidad es cero.

cero debido a la indeterminación de la fase en ese punto. La fase está descrita por un término $\exp(im\phi)$, donde ϕ es la coordenada azimutal y m un número entero que recibe el nombre de carga topológica o carga del vórtice. Alrededor de la singularidad la fase varía helicoidalmente, de 0 a $2\pi m$, y la figura de intensidad presenta forma de anillo [1].

Los vórtices ópticos además llevan asociado un momento angular por fotón. Esta característica es de importante interés, ya que permite fabricar elementos tales como: pinzas ópticas [3-6], filtros espaciales [9], entre otras aplicaciones. Un ejemplo de vórtice óptico se encuentra en los modos de tipo Laguerre-Gaussianos [10]. Los modos LG se caracterizan por sus índices p (índice radial) y m (índice azimutal), que coincide con la carga topológica. El ejemplo más conocido es aquel en el que $p = 0$ y $m = 1$, como se muestra en la Fig. 3, en el que la intensidad está localizada en un anillo alrededor de una zona oscura que es justamente donde el campo es nulo.

3. Generación de patrones de interferencia en espiral con vórtices ópticos

En la Fig. 4, se muestra el arreglo experimental usado para generar patrones de interferencia en espiral. Este consiste de un interferómetro Mach-Zehnder. El haz transmitido por el divisor polarizado (PBS_1) se divide en dos, y en un brazo se genera un frente de onda esférico. En la trayectoria del haz reflejado por el espejo M se coloca el modulador de luz espacial (SLM), Holoeye LC-2002, que despliega el holograma con la fase en espiral, lo que resultará en la generación de patrones espirales en la salida del Mach-Zehnder cuando éste interfiera con el haz de prueba proveniente del otro brazo. El modulador de luz espacial usado es de tipo *twisted nematic*, y tiene píxeles dispuestos en una cuadrícula de dos dimensiones de 832×624 y con tamaño de pixel de $32 \mu\text{m}$.

Cada pixel del SLM puede modular la fase de un haz láser de 0 a 2π . El haz con frente de onda esférico es transmitido en el SLM que es codificado con una máscara de fase de 0 a 2π ,

como se muestra en la Fig. 5. El blanco corresponde a 2π , y el negro corresponde a 0. Un vórtice óptico de carga $m = 1$ (ó respectivamente un vórtice doble de carga $m = 2$) es generado por transmisión en el SLM. La polarización de la luz entrante es ajustada tal que el SLM actúa como un desfasador, esto porque no se produce una modulación pura de fase situado entre polarizadores lineales. El SLM es controlado por una salida gráfica de un ordenador que muestra una copia de las imágenes normales de nivel de gris del monitor como una imagen de fase.

Para detectar el signo de la fase, el haz proveniente del SLM interfiere con el frente de onda de prueba del otro brazo del interferómetro. Los dos haces son combinados usando un divisor polarizado (PBS_2). El patrón de interferencia resultante es una espiral. Para mejorar la calidad del patrón de interferencia, se utiliza un filtro de densidad neutral que hace que la amplitud de la onda de referencia sea igual a la del haz del vórtice.

Fig. 4: Interferómetro Mach-Zehnder. Divisores polarizantes: PBS_1 , PBS_2 . Objetivo de microscopio: OM. Espejos: M, M'. Lentes: L_1 , L_2 . Modulador de luz espacial: SLM. Polarizadores: P_1 , P_2 , Cámara: CCD. Focal: $f = 7.5 \text{ cm}$, diámetro de las lentes: $d = 34.5 \text{ mm}$.

Fig. 5: Simulación de la máscara de fase en 2D. Los píxeles oscuros corresponden a 0 y los píxeles brillantes a 2π .

La Fig. 6 muestra los resultados obtenidos para vórtice con carga topológica $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3$. En este caso, los patrones de interferencia en espiral con sentido de giro depende del sentido de giro del vórtice desplegado en el SLM y el número de dislocación depende de la carga topológica del mismo. Se muestran resultados experimentales, donde se muestra el sentido de giro hacia la derecha y hacia la izquierda (Fig. 6, renglón 1 y 2 respectivamente) con carga topológica (a) $m = \pm 1$, (b) $m = \pm 2$, (c) $m = \pm 3$.

4. Conclusiones

En el presente trabajo, se presenta a manera de divulgación una variante de cómo obtener patrones de interferencia en espiral con vórtices ópticos. Se muestra experimentalmente que se pueden generar franjas tipo espiral con vórtices ópticos, mediante un interferómetro tipo Mach-Zehnder desplegando en el SLM vórtices con carga topológica $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3$, con valor absoluto y una onda esférica. Mediante esta propuesta se pretende extender el estudio para conseguir mapas de fase con modulación de

Fig. 6: Resultados experimentales. Patrones de interferencia en espiral, negativo (renglón 1) y positivo (renglón 2), con carga topológica (a) $m = \pm 1$, (b) $m = \pm 2$ y (c) $m = \pm 3$.

polarización y extracción de mapas con técnicas del mismo método interferométrico. Tal propuesta consiste en definir un sistema óptico con una respuesta impulso con vórtice central. Puede realizarse esto con una pupila de variación de fase azimutal. Esta pupila se ha interpretado como una versión en 2D de un filtro de Hilbert [3]. La referencia requerida puede formarse con un brazo extra paralelo al sistema, como en un interferómetro Mach-Zehnder.

Agradecimientos

El autor A.M.P. agradece al CONACyT el apoyo otorgado mediante el convenio 160260/290679-CIO, así mismo agradece el apoyo para la obtención de los resultados al Laboratorio de Interferometría y Holografía, FCFM-BUAP, apoyado por CONACyT (124145 y 15494).

El autor N.I.T.A. expresa su agradecimiento al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) por el apoyo 47446. Así mismo agradece el apoyo otorgado por Programa de Movilidad para el Fortalecimiento de la Función Docente (ECEST).