



APLICACION DE VÓRTICES ÓPTICOS PARA LA EXTRACCIÓN DE MAPAS DE FASE EN ESPECÍMENES MÓVILES

Areli Montes Pérez^a, Amalia Martínez García^a, Noel Ivan Toto Arellano^b

^aCentro de Investigaciones en Óptica, León, Gto., arelimp@cio.mx, amalia@cio.mx,

^bUniversidad Tecnológica de Tulancingo Departamento de Óptica y Fotónica,
Tulancingo Hidalgo, ivantotoarellano@hotmail.com

RESUMEN

Actualmente la microscopía óptica es una herramienta poderosa e indispensable en la investigación biomédica. En investigaciones recientes, el uso de Moduladores de Luz Espacial (SLM, por sus siglas en inglés) es una potente herramienta, ya que su fácil manipulación como modulador de fase y/o amplitud de un frente de onda óptico permite implementar nuevos métodos en microscopía óptica. El uso de un SLM, colocado en el plano de Fourier de un sistema $4f$ y el uso de imágenes en valores de grises en el SLM desplegando un holograma de fase espiral, el cual es interpretado como un vórtice óptico, y un disco central de fase uniforme en el centro, conducirá a un resultado de imágenes en pseud-relieve, con la aparente dirección de la iluminación en función del nivel de gris de la zona central, en esta posición, la componente de orden cero de Fourier de la onda objeto pasa a través, en calidad de onda de referencia de la misma manera como un interferómetro de camino común típico. En el presente trabajo se muestran avances microscópicos, introduciendo técnicas de corrimiento de fase en la configuración del interferómetro de trayecto común para aumentar la exactitud de la medición de la fase respecto a los métodos de extracción de fase previamente propuestos por otros. Se plantea la incorporación de técnicas de modulación de polarización para realizar los corrimientos requeridos con un solo disparo. Se espera que esto sirva para la extracción de mapas de fase de especímenes móviles. En esta propuesta, los corrimientos de fase pueden inducirse tanto con cambios secuenciales de la imagen en el SLM que define el círculo central del filtro, como por modulación de polarización. Se presentan resultados numéricos y resultados experimentales previos.

1. INTRODUCCIÓN

La formación de los vórtices ópticos ha sido de interés en los últimos 25 años [1], debido a 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 esta región como “trampas ópticas” o “pinzas ópticas” y facilitar la manipulación de estos objetos [1]. Es posible obtener vórtices ópticos haciendo que un haz láser pase a través de cristales, soluciones líquidas o vapores de materiales linealidades, guías de onda, hologramas, transductores o haces láser con modos Laguerre-Gaussianos diferentes de cero, entre otros.

Los modos Laguerre-Gaussian se pueden crear con una 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 Figura 1), y si se hace incidir un haz láser, el holograma genera vórtices ópticos cuya carga topológica se incrementa con el orden de difracción. 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. El modulador espacial tiene

la ventaja de poder crear vórtices dinámicos, conjuntos de vórtices u otro tipos de haces (ya que es un dispositivo optoelectrónico controlable).

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. Como ya se menciono las franjas espirales surgen de la superposición de un frente de onda con vórtices y una onda esférica. En la Figura 2(a) se muestran dos franjas de interferencia con simetría en espiral con giros puestos, estos interferogramas resultan de las distribuciones de fase mostradas en la Figura 2(b), para los dos tipos de hologramas mostrados [2].

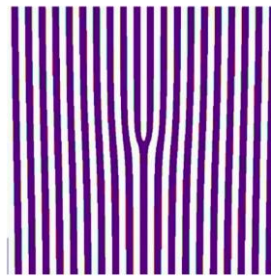


Fig. 1 Rejilla de Ronchi con una dislocación.

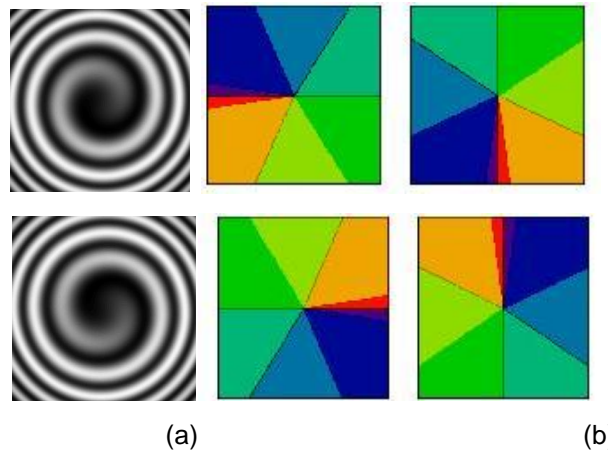


Fig. 2(a) Espirales con signos opuestos, (b) Mapas de fase, con vórtice con carga topologica para $l = \pm 1$.

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 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 acimutal [3]. 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.

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. TEORÍA

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 cero debido a la indeterminación de la fase en ese punto. La fase está descrita por un término $e^{il\phi}$, donde ϕ es la coordenada azimutal y l un número entero que recibe el nombre de carga topológica o carga del vórtice. Alrededor de la singularidad la fase varía helicoidal, de 0 a 2π , la figura de intensidad presenta forma de anillo.

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 [4-5], filtros espaciales [6], entre otras aplicaciones. Un ejemplo de vórtice óptico se encuentra en los modos de tipo Lagerre-Gaussian (LG) [7]. 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 $l=1$, como se muestra en la Figura 3, la intensidad estará localizada en un anillo alrededor de una zona oscura que es justamente donde el campo es nulo.

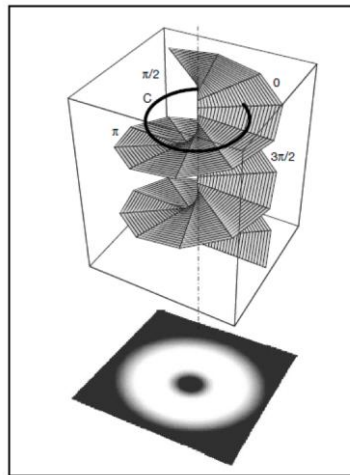


Fig. 3 Propagación de un frente de onda Helicoidal de un modo LG. El término de fase azimutal $e^{il\phi}$ produce un frente de onda helicoidal. La variación de la fase a lo largo del camino C es de 0 a 2π por tanto la intensidad en el centro de la distribución de intensidad es cero.

3. PARTE EXPERIMENTAL

En la Figura 4 se muestra el arreglo experimental usado. Este consiste de un interferómetro de trayecto común, el cual consiste de un sistema de imagen óptica $4f$. En esta propuesta, los corrimientos de fase pueden inducirse tanto con cambios secuenciales de la imagen en el SLM (Holoeye LC-2002) que define el círculo central del filtro, como por modulación de polarización. El efecto de un filtro de fase en Fourier es una convolución de la función de transferencia del filtro de amplitud con la función de onda del objeto. La función de transferencia de amplitud de una espiral (la cual será generada mediante el SML), es decir un vórtice óptico con elipticidad 1, localizada en el plano de Fourier de la trayectoria del haz de imagen se compone de un anillo de difracción de amplitud limitada, que tiene una fase que corresponde a el ángulo

acimutal alrededor del anillo. Si la onda objeto contiene un gradiente de fase, la amplitud de la imagen filtrada es proporcional a su magnitud. La convolución del vórtice óptico con la onda objeto también presenta una distribución de fase en función de la dirección del gradiente de fase, que surge de la estructura helicoidal de fase del vórtice óptico. Esto puede ser visible cuando el haz espiral filtrado interfiere con una onda plana. Hay un disco circular en la parte central del filtro de fase espiral que se establece en un valor constante de fase específica. En esta posición, la componente de orden cero de Fourier de la onda objeto pasa a través, en calidad de onda de referencia de la misma manera como un interferómetro de camino común típico.

Su interferencia con la fase espiral restante se filtra parte del resultado de la onda objeto en una imagen en tipo relieve del objeto, que se asemeja a un contraste de interferencia diferencial de la imagen (Fig. 5 (b)). En la Fig. 5 (a) se muestra el filtro acimutal que opera multiplicando con la transformada de Fourier de la onda objeto, donde muestra la parte Real e Imaginaria de la onda objeto, y como resultado tenemos en el plano imagen franjas de tipo espiral.

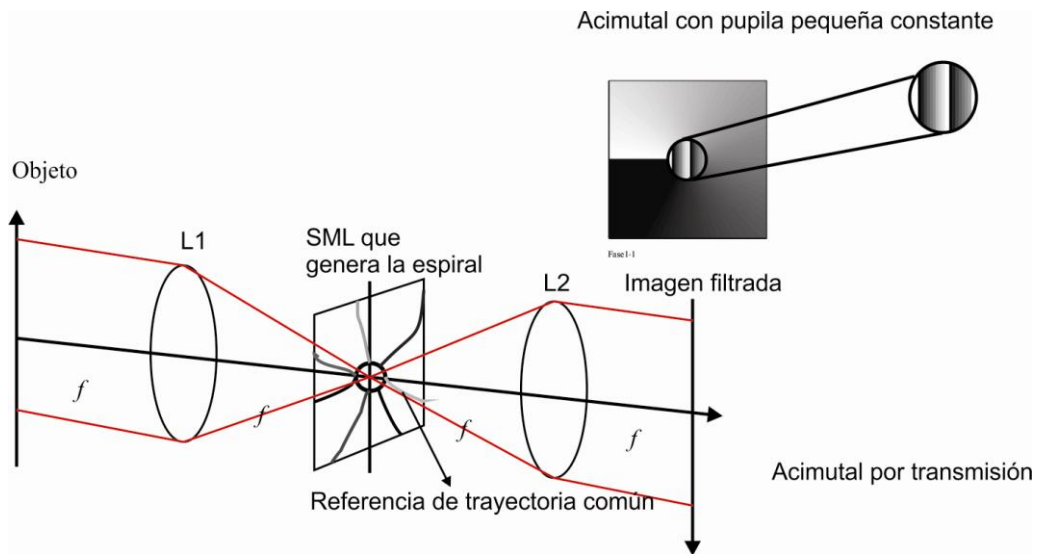


Fig. 4 Interferómetro de trayecto común. Lentes: L_1, L_2 . Modulador de luz espacial: SLM. Focal: $f=7.5\text{cm}$, diámetro de las lentes $d=35.4\text{mm}$.

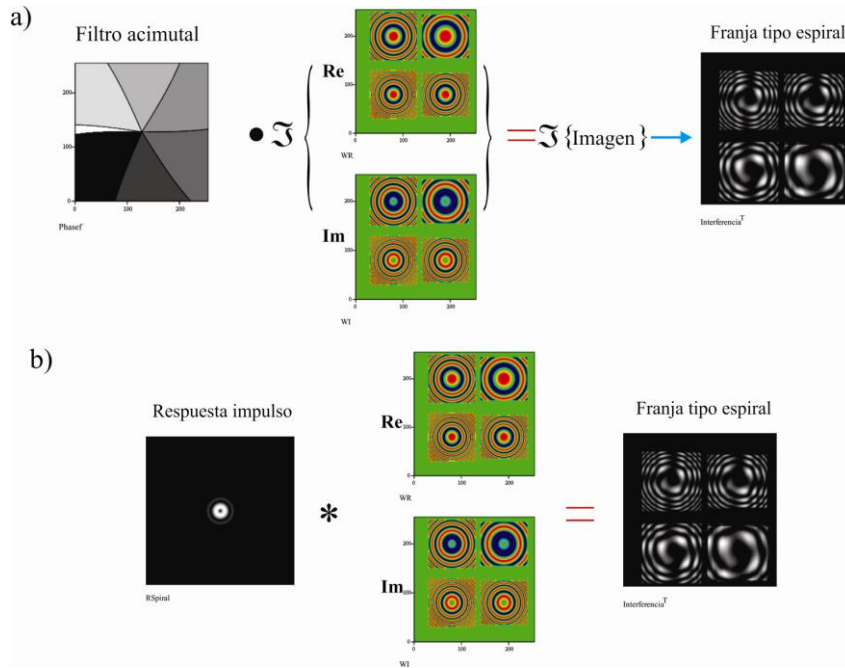


Fig. 5 (a) Esquematzación del filtro acimutal haciendo la operación de multiplicación con la transformada de Fourier de la onda objeto, donde muestra su parte Real e Imaginaria de la onda objeto, dando como resultado franjas de tipo espiral, (b) esquematización del efecto de la respuesta impulso convolucionado con la función de transferencia del filtro de amplitud.

Cabe mencionar que 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 2π , como se muestra en la Figura 6. El blanco corresponde a 2π , y el negro corresponde a 0 . Un vórtice óptico de carga $l=1$ (o respectivamente un vórtice doble de carga $l=2$) es generado por transmisión en el SLM. La polarización de la luz entrante es ajustada tal que el SLM actúa como un desfaseador. 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.

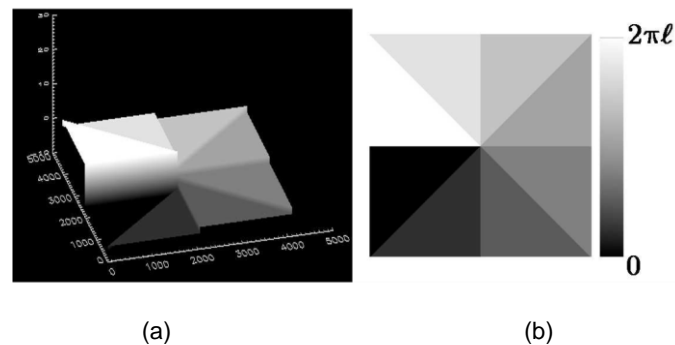


Fig. 6 Izquierda: imagen simulada en 3D de una máscara de fase de 2π , en escala de grises de 8. Derecha: correspondiente máscara de fase en 2D. Los pixeles oscuros corresponden a 0 y los pixeles brillantes a 2π .



La Figura 7 muestra los resultados preliminares obtenidos, numéricamente (7a) y experimentalmente (7b). 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 de la carga topológica del mismo. Se muestran resultados experimentales, donde se muestra el sentido de giro hacia la derecha y hacia la izquierda con carga topológica $l = \pm 1$.

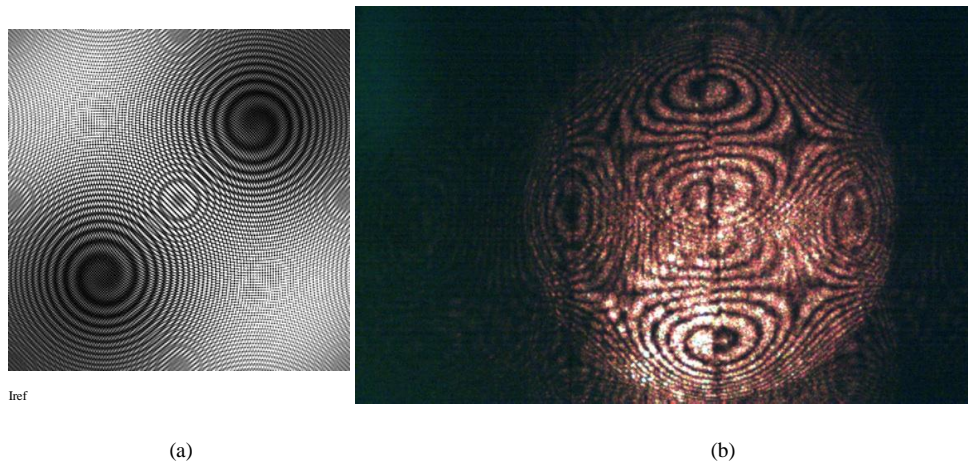


Fig. 7 Resultados numéricos (a) vórtices espirales de cargas con signos opuestos en el mismo campo, (b) resultados experimentales preliminares, con sentido de giro hacia la derecha y hacia la izquierda, con carga topológica $l = \pm 1$ en el mismo campo.

4. CONCLUSIONES

Se ha mostrado que se pueden obtener patrones de vórtices ópticos en un mismo campo mediante el sistema óptico con una respuesta impulso con vórtice central. Puede realizarse esto con una pupila de variación de fase acimutal. Esta pupila se ha interpretado como una versión en 2D de un filtro de Hilbert. Mediante esta propuesta se pretende extender el estudio para conseguir mapas de fase con modulación de polarización y extracción de mapas con técnicas del mismo método interferométrico en especímenes móviles.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. R. Cooper, D. W. Tomkins, and M. Petty, *Surface-relief diffraction gratings recorded by multiple-beam coherent phase exposure*, Optics Letters, **22**, 357-359 (1997)
- [2] Khonina S. N., Kotlyar V. V., Shinkaryev M. V., Soifer V. A. and Uspleniev G. V., *The phase rotor filter*, J. Mod. Opt., **39**, 1147–1154 (1992)
- [3] J. A. Davis, D. E. McNamara, and D. M. Cottrell and J. Campos, *Image processing with the radial Hilbert transform: theory and experiments*, Optics Letters, **25**, 99-101 (2000)
- [4] J. A. Davis, D. E. McNamara, and D. M. Cottrell, *Analysis of the fractional Hilbert*



- transform*, Applied Optics, **37**, 6911-6913 (1998)
- [5] Z. Jaroszewicz and A. Kolodziejczyk, *Zone plates performing generalized Hankel transforms and their metrological applications*, Optics Communication, **102**, 391–396 (1993).
- [6] Victor Arrizón and David Sánchez-de-la-Llave, *Common-path interferometry with one-dimensional periodic filters*, Optics Letters, **29**, 141-143 (2004)
- [7] Gustavo Rodríguez-Zurita, Noel-Ivan Toto-Arellano, Cruz Meneses-Fabian, and José F. Vázquez-Castillo, *One-shot phase-shifting interferometry: five, seven, and nine interferograms*, Optics Letters, **33**, 2788-2790 (2008)