

SOLUCIÓN A LA INDETERMINACIÓN DE LAS ABERRACIONES PRODUCIDAS POR UN MODULADOR ESPACIAL DE LUZ Y POR SISTEMAS ÓPTICOS EN ALGORITMOS DE DIVERSIDAD DE FASE

Carlos Alfredo Cuartas Vélez

Asesor:
Prof. René Restrepo Gómez

Grupo de Óptica Aplicada
Ingeniería Física
Escuela de Ciencias
Departamento de Ciencias Físicas
Universidad EAFIT

Junio 2015

1 Introducción

- Planteamiento del problema
- Objetivos

2 Generación de vórtices ópticos

- Marco teórico
- Modulador espacial de luz
- Caracterización de las curvas de modulación
- Aberraciones en vórtices ópticos

3 Caracterización de aberraciones en vórtices ópticos

- Marco teórico
- Diversidad de fase
- Corrección de aberraciones con diversidad de fase coherente
- Modificaciones sobre diversidad de fase
- Resultados: Modificaciones sobre PD coherente

4 Conclusiones

Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del problema
- Objetivos

2 Generación de vórtices ópticos

- Marco teórico
- Modulador espacial de luz
- Caracterización de las curvas de modulación
- Aberraciones en vórtices ópticos

3 Caracterización de aberraciones en vórtices ópticos

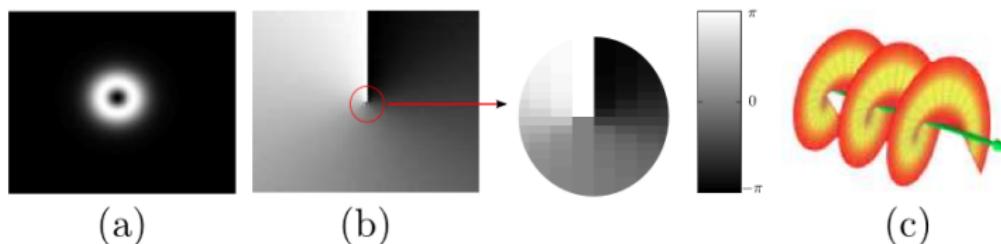
- Marco teórico
- Diversidad de fase
- Corrección de aberraciones con diversidad de fase coherente
- Modificaciones sobre diversidad de fase
- Resultados: Modificaciones sobre PD coherente

4 Conclusiones

Introducción: Vórtice óptico

Un vórtice óptico (OV) es una dislocación del frente de onda que genera una singularidad en la fase y causa un punto de intensidad nula.¹

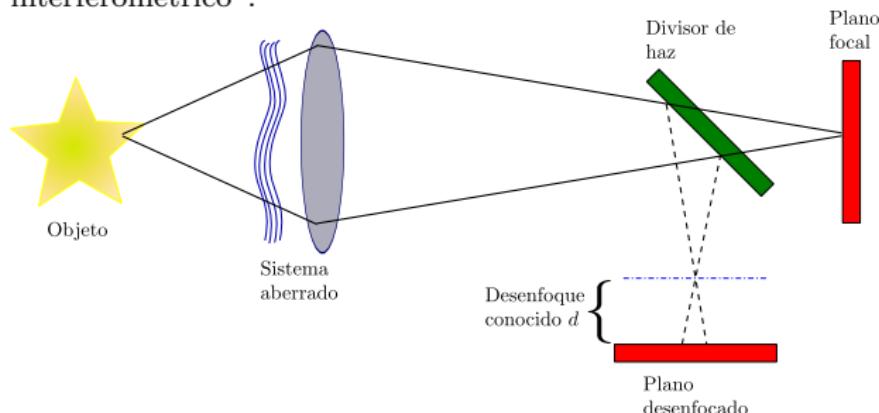
$$\psi(x, y) \propto e^{il\theta(x, y)}.$$



¹M. R. Dennis, K. O'Holleran, and M. J. Padgett. "Chapter 5 singular optics: Optical vortices and polarization singularities". *Progress in Optics*, volumen 53, páginas 293–363. Elsevier, 2009.

Introducción: Diversidad de fase

Diversidad de fase (PD) es una técnica de reconstrucción de fase no interferométrico².

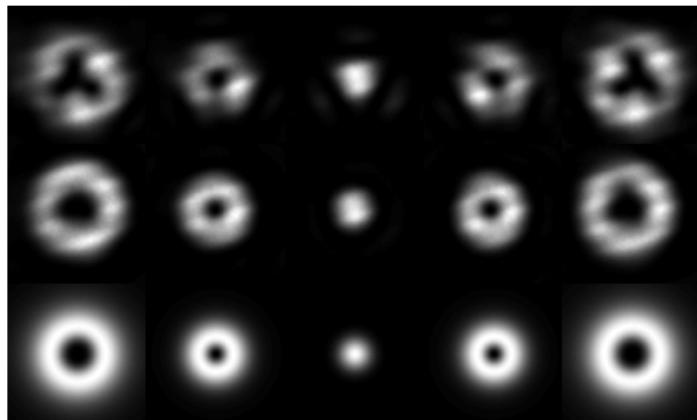


²R. Paxman, T. Schulz, and J. Fienup. "Joint estimation of object and aberrations by using phase diversity". JOSAA A, **9**(7), 1072-1084, 1992.

Planteamiento del problema

$$j = a_4 : 0\lambda$$

Distorsionado



Corregido

Simulado

$$l = -2 \quad -1 \quad 0 \quad 1 \quad 2$$

Objetivos

Objetivo General

Solucionar la indeterminación que hay entre las aberraciones provenientes de la no idealidad de un modulador espacial de luz (SLM) y las aberraciones propias de un sistema óptico, al usar los algoritmos de diversidad de fase desarrollados por el grupo de óptica aplicada.

Objetivos Específicos

- Implementar un algoritmo de PD que basado en imágenes sintéticas simule los efectos de modulación no lineal de un SLM.
- Emplear la implementación anterior comparando con imágenes experimentales, con miras a encontrar las aberraciones causadas por fuentes diferentes a la modulación no lineal del SLM.
- Establecer si a partir de la combinación de los resultados de los objetivos anteriores puede reconstruirse la aberración del frente de onda obtenido con PD coherente.
- Validar experimentalmente los resultados obtenidos recuperando la fase de un objeto cuya aberración sea conocida.

Aplicaciones de los vórtices ópticos:

-Microscopía de fase

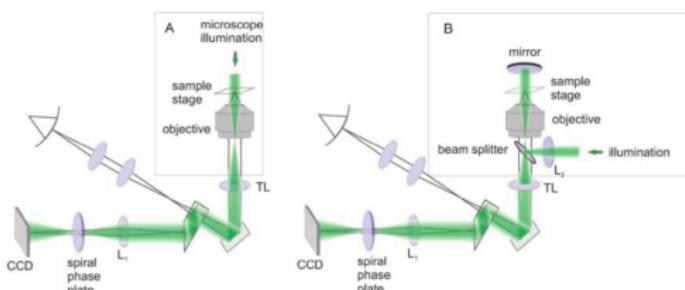


Fig. 2. The light path modifications used for spiral filtering. Graphic A shows the set-up for transmissive probes, set-up B is for reflective probes with epi-illumination. The optical path after the tubus lens ($TL, f = 160\text{ mm}$) is the same for both set-ups. The spiral phase plate is inserted into the Fourier plane of the horizontal front port of the microscope. The distance from the tubus lens to the CCD is approximately 370 mm, and the lens L_1 has a focal length of 50 mm. In the case of a transmissive probe (set-up A) the illumination aperture has to be chosen rather small ($NA = 0.03$ in our experiments). In the case of a reflective set-up (B), a beam splitter and an additional lens L_2 ($f = 100\text{ mm}$) have to be placed into the optical path of the microscope. The lens L_2 focuses the input beam to the Fourier plane of the objective. The collimated light leaving the objective is either reflected by the probe or, in the case of a transmissive sample, reflected by an additional mirror. Lens L_2 focuses the illumination beam to a spot size of $100\text{ }\mu\text{m}$ to the focal plane of the objective.

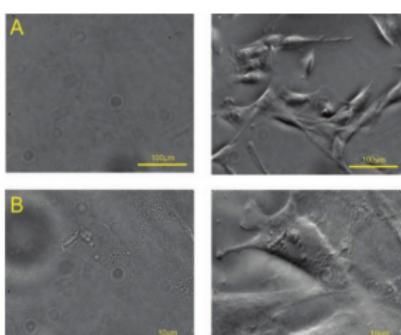


Fig. 3. The images show fibroblast cells in line A as viewed with a $20\times$ air objective, in line B recorded with a $100\times$ air immersions objective. The images at the left side show the bright-field images, whereas at the right are the corresponding spiral phase-filtered images. The centre of the spiral phase plate is

Journal of Microscopy, Vol. 230, Pt 1 2008; pp. 134–142
Received 30 July 2007; accepted 30 October 2007

C. MAURER, A. JESACHER, S. FÜRHAPTER, S. BERNET & M. RITSCH-MARTE
Divisions for Research of Physics, Innsbruck Medical University Innsbruck, A-6020 Innsbruck,
Austria

Key words: Fourier filtering, phase reconstruction, spiral phase plate.

Aplicaciones de los vórtices ópticos:

-Transmisión de información

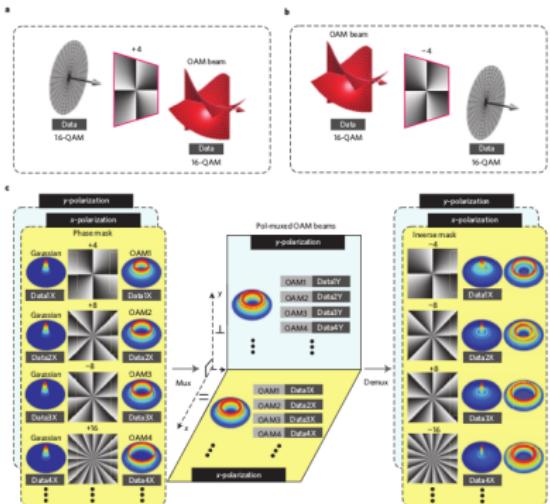


Figure 1 | Concept and principle. **a**, Generation of an information-carrying QAM beam with a helical phase front. **b**, Recovery of an information-carrying beam with a planar phase front. **c**, Multiplexing/demultiplexing of information-carrying QAM beams together with polarization multiplexing/demultiplexing (middle panel). **d**, For multiplexing, QAM beams with ‘doughnut’-shaped intensity profiles (left panel, third column) are spatially multiplexed. For demultiplexing one of the QAM beams is converted into a beam with a high intensity at the center (right panel, second column), which can be separated from other updated QAM beams with ‘doughnut’ shapes (right panel, third column) by spatial filtering. **e**, 16-QAM, quadrature amplitude modulation; **Mux**, multiplexing; **Demux**, demultiplexing; **Pd-Mux**, polarization-multiplexed.

ARTICLES

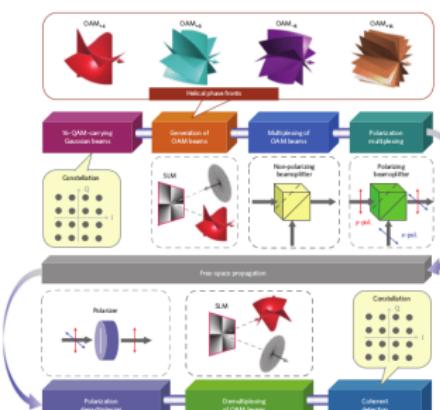
ARTICLES [View all articles](#)

nature
photonics

Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing

Jian Wang^{1,2*}, Jeng-Yuan Yang¹, Irfan M. Fazal¹, Nisar Ahmed¹, Yan Yan¹, Hao Huang¹, Yongxiong Ren¹, Yang Yuan¹, Samuel Dolinar³, Moshe Tur⁴ and Alan E. Willner^{1,2*}

The reception is in the 1990s that light beams with a helical phase front have orbital angular momentum and applications ranging from optical manipulation to quantum information processing. Recently, attention has been directed towards the opportunities for harnessing such beams in communications. Here, we demonstrate that four light beams with orbital angular momentum can be encoded onto a single optical fiber. The resulting four-wavelength (1550–1610 nm) QAM signals can be demultiplexed and demodulated, allowing a 1.37 Tb s⁻¹ aggregated rate and 2.56 bits s⁻¹ Hz⁻¹ spectral efficiency when combined with polarization multiplexing. Moreover, we show scalability in the spatial domain by demonstrating the generation of concatenated eight-wavelength signals with a total capacity of > 6 Tb s⁻¹. The orbital angular momentum beams exhibit a complexity of 2.56 Tb s⁻¹ and spectral efficiencies of 9.57 bits s⁻¹ Hz⁻¹. We also report data exchange between orbital angular momentum beams encoded with 100 Gbaud⁻¹ differential quadrature phase-shift keying exchanges. These demonstrations suggest that orbital angular momentum could be a useful degree of freedom for increasing the capacity of future optical communication systems.



第二步：在下方的“选择”栏中，单击“插入”按钮，再单击“插入”右侧的下拉箭头，从弹出的下拉菜单中选择“插入新幻灯片”命令。

Aplicaciones de los vórtices ópticos:

-Pinzas ópticas

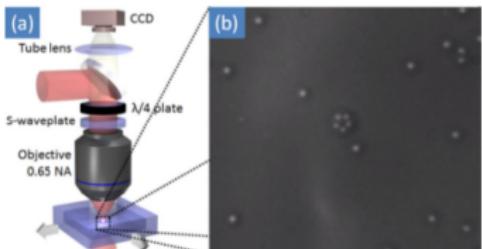


FIG. 2. (a) Experimental trapping setup. (b) The image of five fused silica beads assembled into a ring.

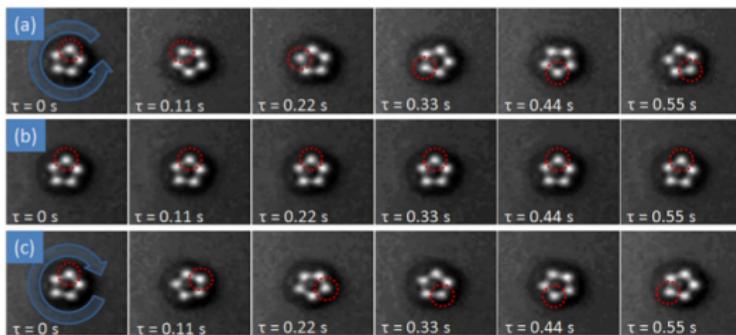


FIG. 3. The rotation of five trapped SiO_2 beads. (a) Particles rotate counter clockwise when polarization before the S-waveplate is right-handed circular. (b) Beads do not rotate when polarization before S-waveplate is linear. (c) Particles rotate clockwise when polarization before the S-waveplate is left-handed circular (Multimedia view) [URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4882418.1>].

Aplicaciones de diversidad de fase: -Óptica adaptativa

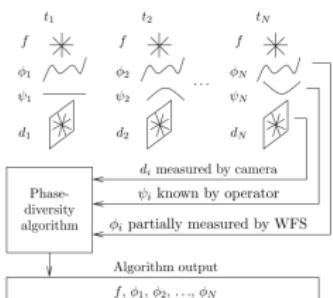


Fig. 1. Data collection scheme in our PD algorithm.

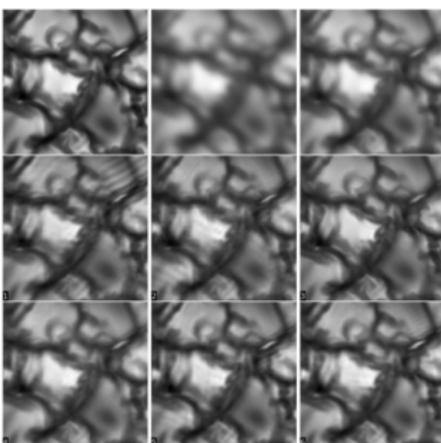


Fig. 4. Illustration of performance. All images have a dimension of 384 × 384 pixels, showing the region FD has reconstructed. Upper row: original object (having no spatial frequency above the system diffraction limit), seeing-limited image, and AO-corrected image. Images 1–6 show examples of PD performance. See text for details.

Joint optimization of phase diversity and adaptive optics: demonstration of potential

Visa Korkiakoski,^{1,*} Christoph U. Keller,¹ Niek Doelman,²
Rufus Fraanje,³ and Michel Verhaegen³

¹Utrecht University, Princetonplein 5, 3584CC Utrecht, The Netherlands

²TNO Science and Industry, Stelljesweg 1, 2628CK Delft, The Netherlands

³Delft Center for Systems and Control, Mekelweg 2, 2628CD Delft, The Netherlands

*Corresponding author: v.a.korkiakoski@uu.nl

Received 11 July 2011; revised 16 September 2011; accepted 22 September 2011;
posted 27 September 2011 (Doc. ID 150787); published 23 December 2011

Aplicaciones de diversidad de fase:

- Sensor de frente de onda

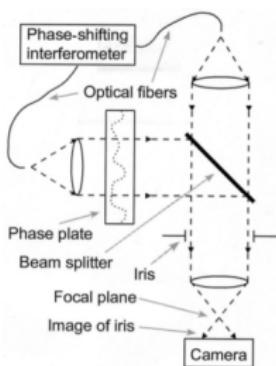


Fig. 1. Experimental setup used to record the true amplitude and phase variations, introduced by a plastic screen, and the phase-diverse focal-plane data.

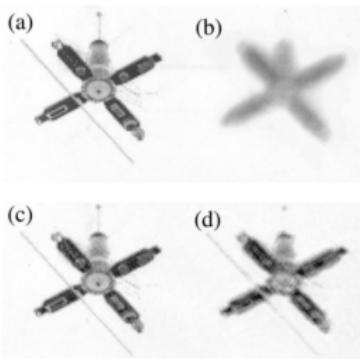


Fig. 8. (a) True object used for numerical simulation of object reconstruction. (b) Blurred image with photon and read noise added (best-focus frame from phase-diverse image set). (c) Reconstructed image with both phase and amplitude pupil-plane estimation. (d) Reconstructed image with phase-only estimation.

Sensing wave-front amplitude and phase with phase diversity

Stuart M. Jefferies, Michael Lloyd-Hart, E. Keith Hege, and James Georges

We show in benchtop experiments that wave-front phase estimation by phase diversity can be significantly improved by simultaneous amplitude estimation. Processing speed, which will be important for real-time wave-front control applications, can be enhanced by use of small-format detectors with pixels that do not fully sample the diffraction limit. Using an object-independent phase-diversity algorithm, we show that, for both pointlike and extended objects, the fidelity of the phase and amplitude estimates degrades gracefully, rather than catastrophically, as the sampling becomes coarser. We show in simulation that the same algorithm also improves the fidelity of image reconstruction of complex targets. © 2002 Optical Society of America

OCIS codes: 010.1080, 100.3190, 100.5070, 120.5050.

Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del problema
- Objetivos

2 Generación de vórtices ópticos

- Marco teórico
- Modulador espacial de luz
- Caracterización de las curvas de modulación
- Aberraciones en vórtices ópticos

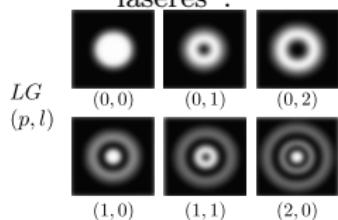
3 Caracterización de aberraciones en vórtices ópticos

- Marco teórico
- Diversidad de fase
- Corrección de aberraciones con diversidad de fase coherente
- Modificaciones sobre diversidad de fase
- Resultados: Modificaciones sobre PD coherente

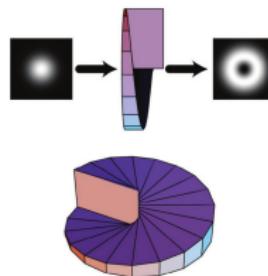
4 Conclusiones

Marco teórico: Generación de vórtices ópticos

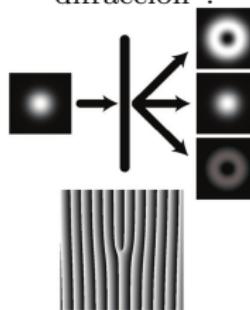
Manipulación controlada
de las propiedades de los
láseres³.



Empleando placas
espirales de fase (SPP)¹.



Empleando redes de
difracción¹.



³T. Ohtomo, S. Chu, and K. Otsuka. "Generation of vortex beams from lasers with controlled herte- and ince-gaussian modes". Optics Express, **16**(7), 5082–5094 (2008).

Modulador espacial de luz

Dispositivos que modulan amplitud o fase de ondas de luz en espacio y tiempo⁴.

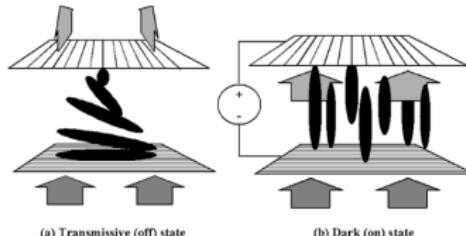
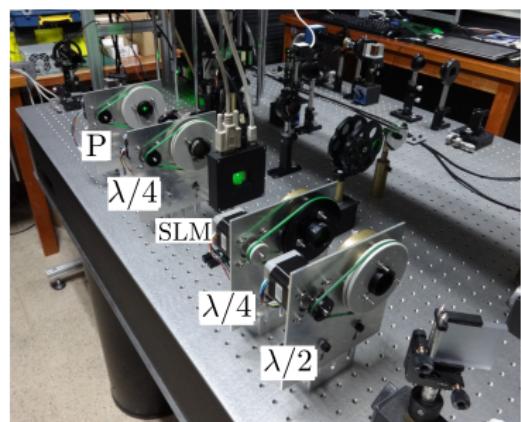
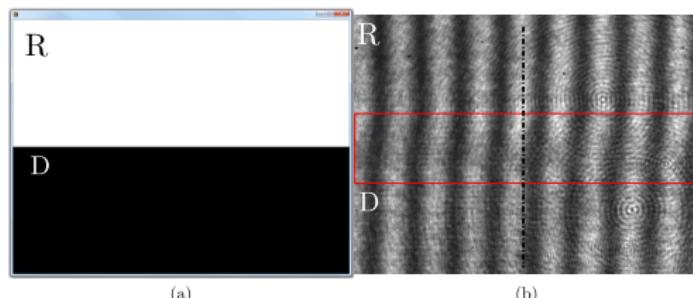
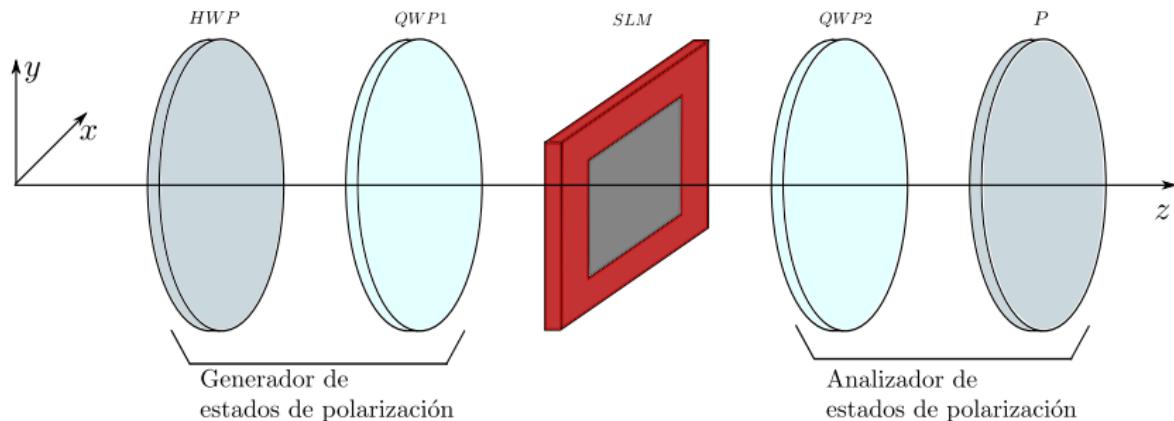
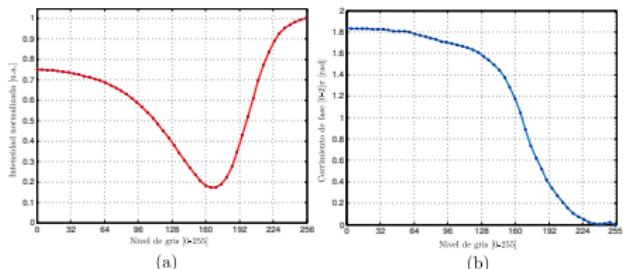


Imagen tomada de http://what-when-how.com/wp-content/uploads/2012/06/tmp7ee150_thumb2.png

Caracterización de la curva de modulación

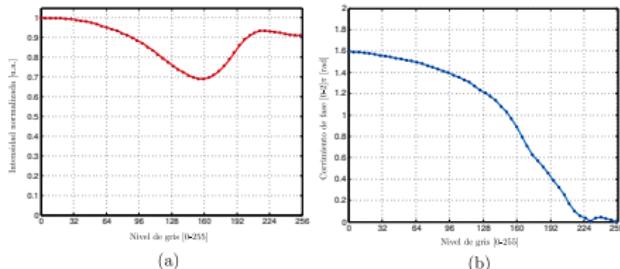


Resultados: Curvas de modulación

 ω_1 

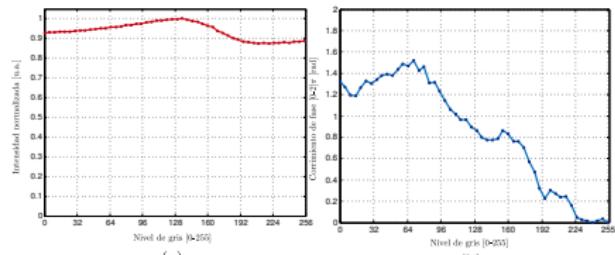
(a)

(b)

 ω_3 

(a)

(b)

 ω_2 

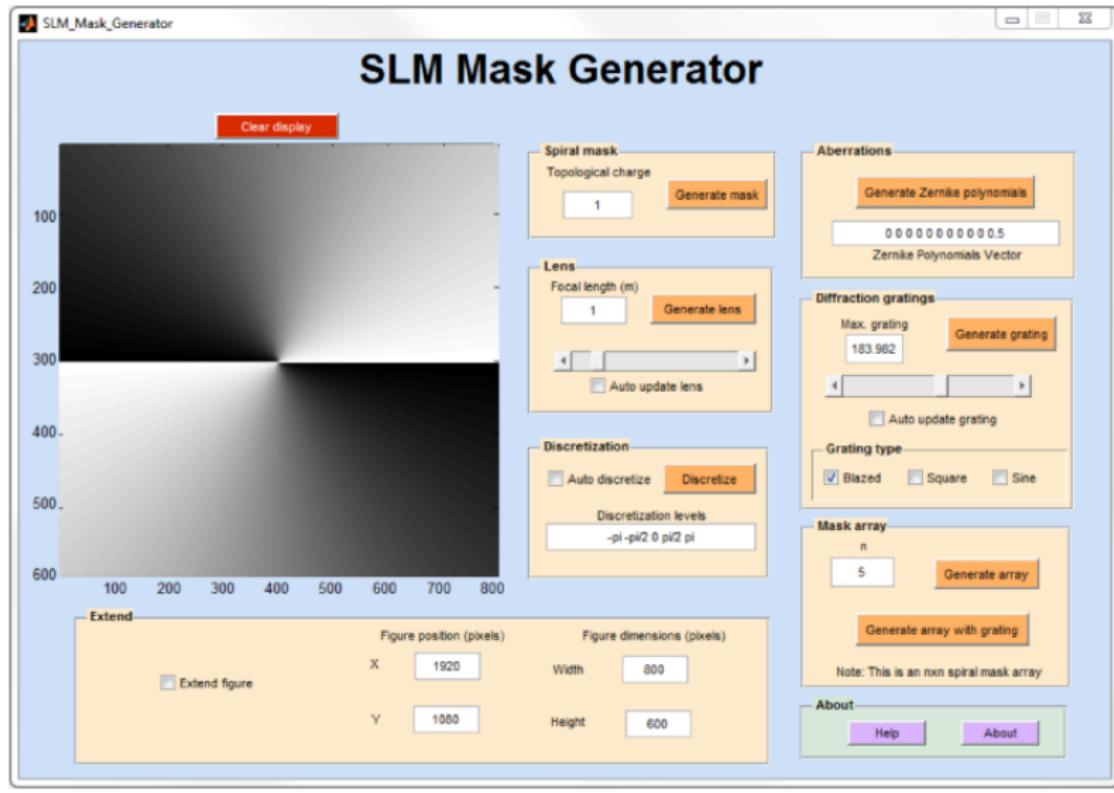
(a)

(b)

Ángulos de las láminas retardadoras y polarizador para el sistema generador-analizador de estados de polarización para los estados ω_1 , ω_2 y ω_3

	PSG			PSA		
	$\lambda/2$	$\lambda/4$	Estado de polarización	$\lambda/4$	A	Estado de polarización
ω_1	0°	0°		45°	-45°	
ω_2	22.5°	0°		-45°	-67.5°	
ω_3	0°	0°		45°	-67.5°	

Una plataforma para la generación de máscaras



Resultados: Generación de OVs a partir de las curvas de modulación

	ω_1	ω_2	ω_3	Ideal
$l = +1$				
$l = -1$				
Error RMS	51.65×10^{-3}	41.06×10^{-3}	30.98×10^{-3}	

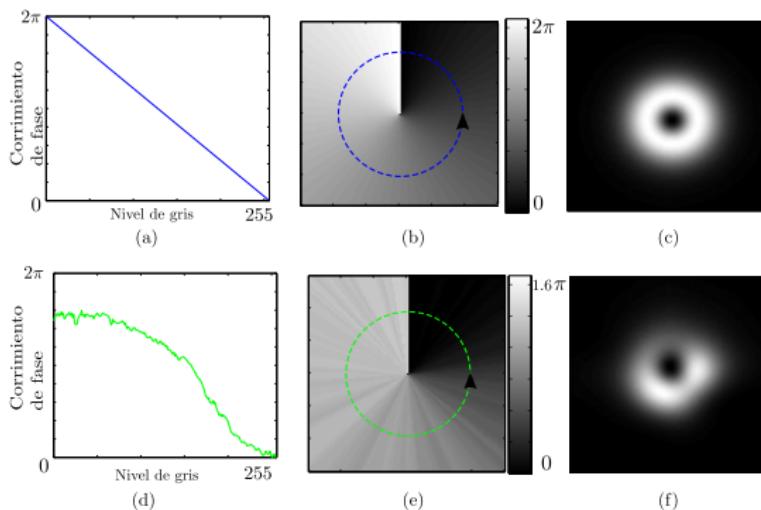
$$E = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{n,m}^{M,N} |d - u|^2}$$

Aberraciones en vórtices ópticos

Pueden provenir de imperfecciones en:

- diseño,
- los materiales,
- alineación de los elementos ópticos.

En nuestro caso, también por características no deseadas causadas por el SLM, tales como el acople entre la modulación en fase y amplitud, factor de llenado y la discretización.



Simulación de los efectos de la modulación no ideal en OV

	Simulación sistema limitado por difracción $ u_j^l ^2$	Simulación del sistema limitado por difracción con modulación experimental $ \phi_j^l ^2$	Intensidad experimental d_j^l	Máscara espiral de fase ideal	Máscara espiral de fase experimental
$l = +1$					
$l = -1$					
$l = +2$					
$l = -2$					

Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del problema
- Objetivos

2 Generación de vórtices ópticos

- Marco teórico
- Modulador espacial de luz
- Caracterización de las curvas de modulación
- Aberraciones en vórtices ópticos

3 Caracterización de aberraciones en vórtices ópticos

- Marco teórico
- Diversidad de fase
- Corrección de aberraciones con diversidad de fase coherente
- Modificaciones sobre diversidad de fase
- Resultados: Modificaciones sobre PD coherente

4 Conclusiones

Cómo se caracterizan las aberraciones?

Métodos interferométricos

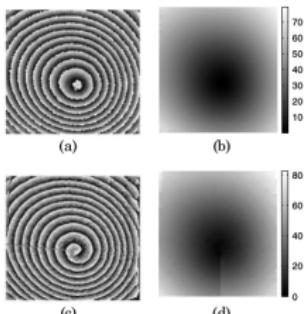


Fig. 4. (a) Traditional ESPI phase modulo 2π using four phase shifts. (b) Traditional ESPI phase unwrap. (c) Spiral ESPI phase modulo 2π using vortex operator. (d) Spiral ESPI phase unwrap.

OPTICS LETTERS / Vol. 36, No. 23 / December 1, 2011

Electronic speckle pattern interferometry using vortex beams

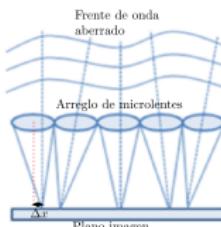
Rosy Restrepo,^{a,*} Nicanor Colpa-Parravicino,^a and Tomás Belenguer^b
Laboratorio de Interferometría Óptica-LINOS, Instituto Nacional de Técnicas Aeroespaciales-INTA,
Tecnología de Altura (Máscara), Spain

*Corresponding author: rosy@grafia.ies.es

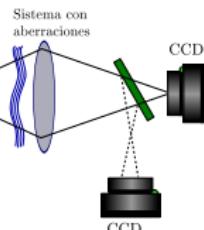
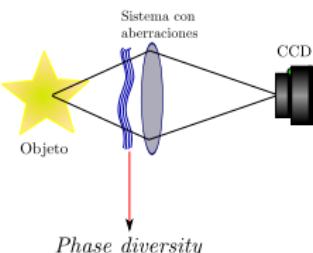
Received August 9, 2011; revised October 26, 2011; accepted October 27, 2011;
posted October 28, 2011 (Doc. ID 112900); published November 28, 2011

Métodos no interferométricos

Sensores Shack-Hartmann



Phase retrieval



Marco teórico: Sistemas formadores de imagen

Las técnicas de *phase retrieval* analizan el efecto de las aberraciones sobre las imágenes que produce un sistema óptico. Las aberraciones son caracterizadas cuando se encuentra una función de transferencia que reproduce las imágenes registradas.

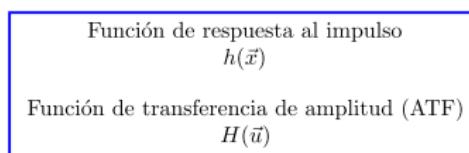
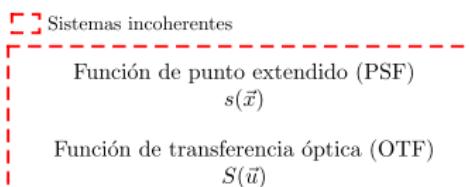


Transformaciones para sistemas incoherentes

$$d(\vec{x}) = d_{obj}(\vec{x}) \otimes s(\vec{x}), \\ D(\vec{u}) = D_{obj}(\vec{u})S(\vec{u}).$$

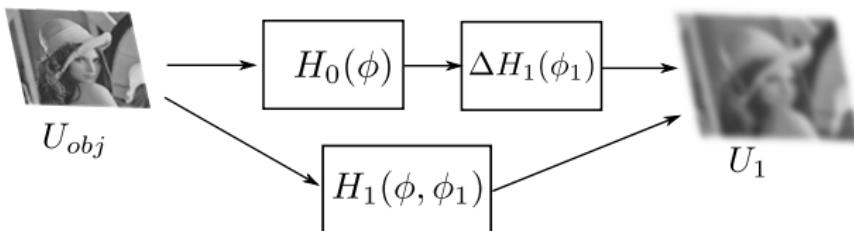
Transformaciones para sistemas coherentes

$$u(\vec{x}) = u_{obj}(\vec{x}) \otimes h(\vec{x}), \\ U(\vec{u}) = U_{obj}(\vec{u})H(\vec{u}).$$



■ Sistemas coherentes

Diversidad de fase



Tradicionalmente se ha empleado desenfoque como la diversidad de fase



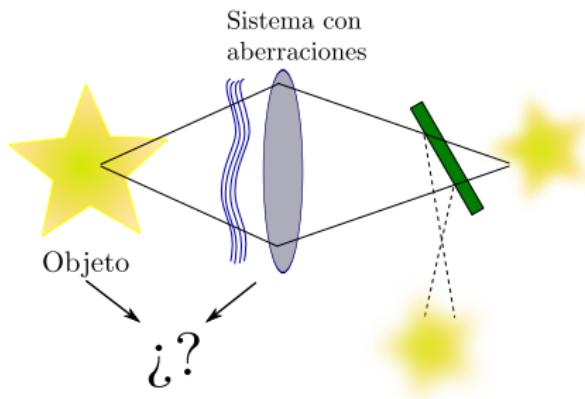
Emplear un elemento de fase programable permite emplear cualquier otra diversidad



Funcional de minimización

$$L(\overline{D}_{obj}, \phi) = \sum_{j=0}^K \sum_{m,n}^{M,N} |D_j - \overline{D}_{obj} S_j|^2.$$

Diversidad de fase con iluminación coherente



En el laboratorio podemos escoger el tipo de iluminación y definir nuestro campo objeto u_{obj}

$$u_{obj} = \exp\left(\frac{-(x^2+y^2)}{\sigma}\right)$$

$$u_j(\vec{x}) = \mathcal{F}^{-1}\{U_{obj}H(\vec{u})H_j(\vec{u})\}$$

Un nuevo funcional de minimización

$$L(\phi) = \sum_{j=0}^K \sum_{m,n}^{M,N} |d_j - |u_j|^2|^2.$$

PD con iluminación coherente mejorado con vórtices ópticos.

Una nueva familia de diversidades

$$\psi_l = \exp\{il\theta\},$$

$$u_j^l(\vec{x}) = \mathcal{F}^{-1}\{U_{obj}(\vec{u})H(\vec{u})\Delta H_j(\vec{u})\psi_l(\vec{u})\}.$$

Funcional extendido

$$L(\phi) = \sum_{l=0}^L \sum_{j=0}^K \sum_{m,n}^{M,N} |d_j^l - |u_j^l|^2|^2.$$

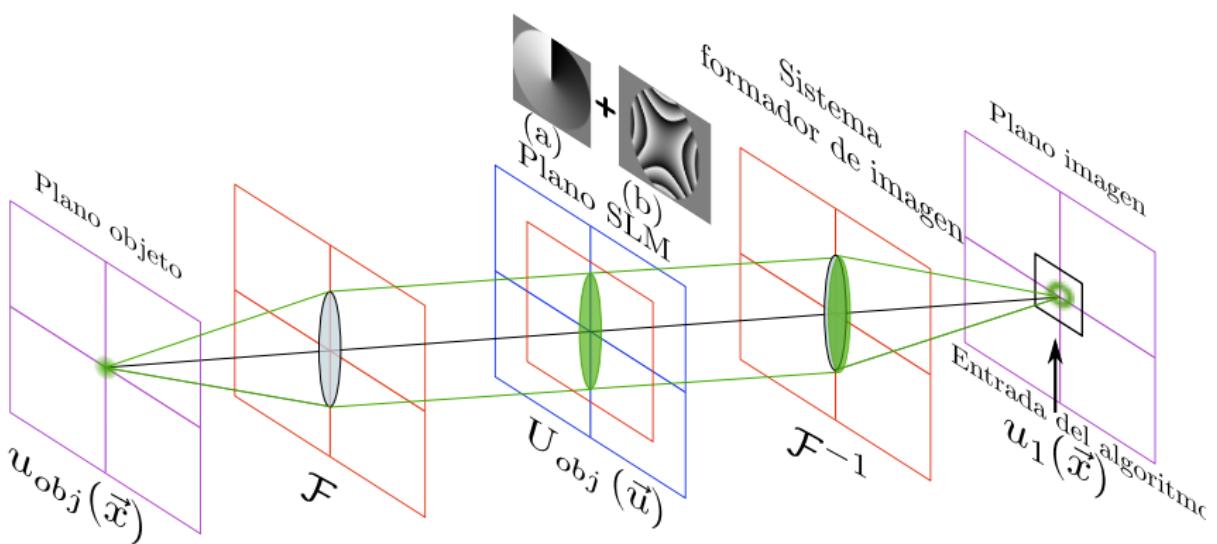
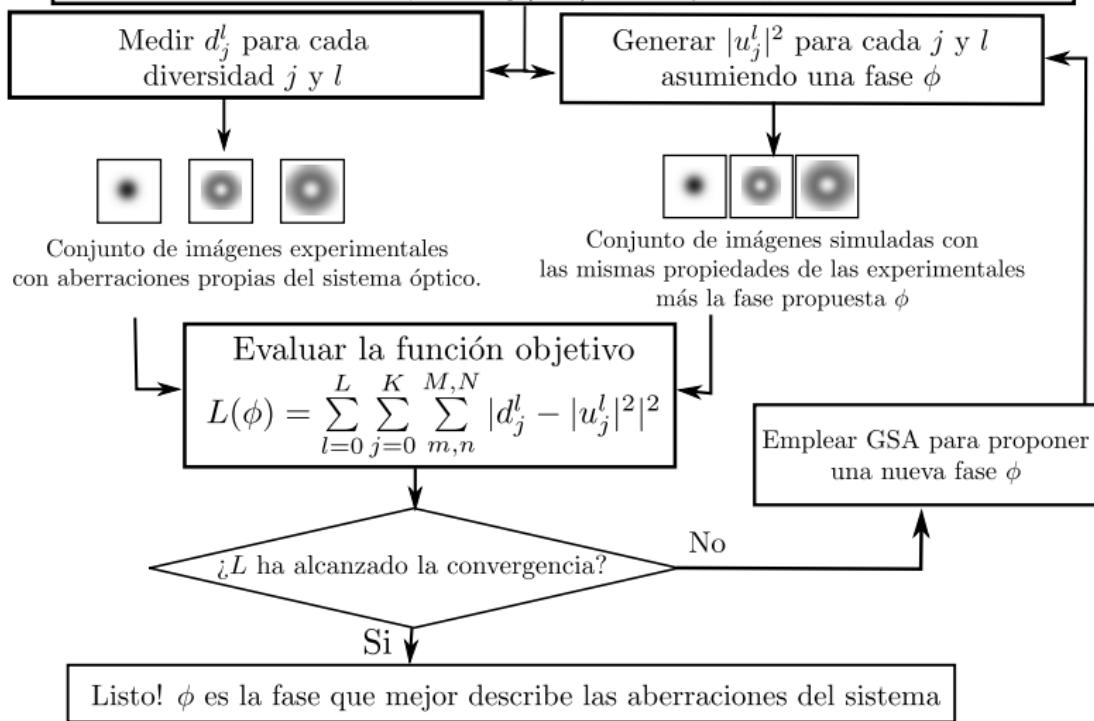


Diagrama de flujo de diversidad de fase coherente

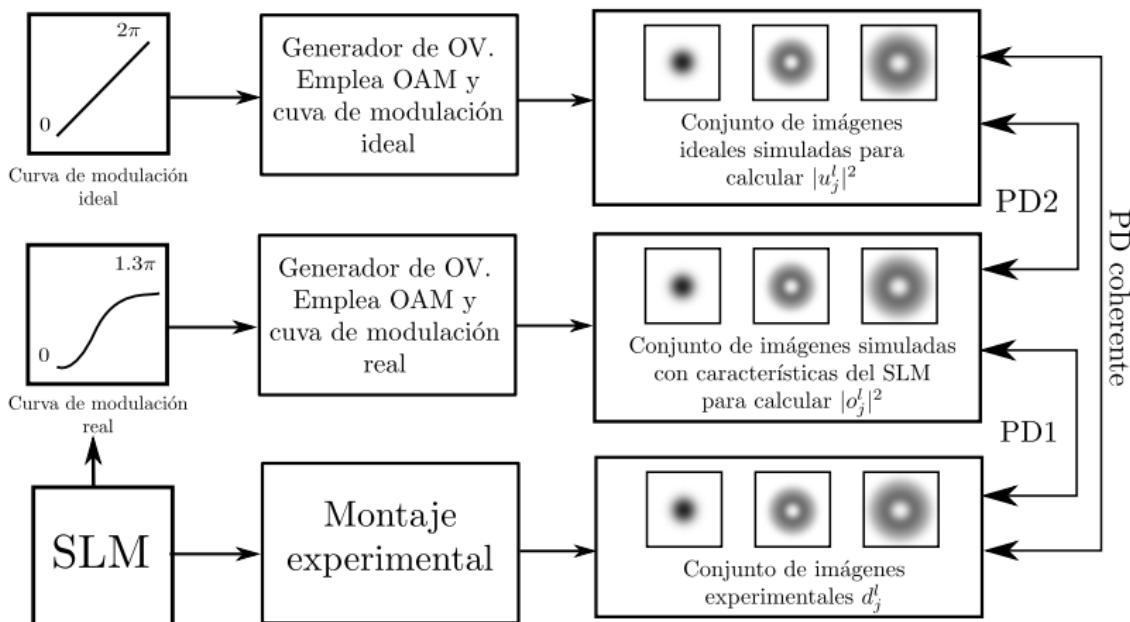
Se define una apertura, un conjunto de diversidades de fase,
tanto de Zernike como de máscaras espirales
 $A(x, y), \quad \psi_l = \arg(e^{il\theta}), \quad \phi_j = Z_4 = \pm 0.5$



Resultados: Corrección de aberraciones con diversidad de fase coherente

	Intensidad inicial propuesta por PD $ u_j^l ^2$	Intensidad experimental inicial d_j^l	Intensidad recuperada por PD $ u\{\phi_{coh}\}_j^l ^2$	Intensidad experimental corregida
$l = +1$ $j = 0$				
$l = -1$ $j = 0$				
$l = +1$ $j = +0.5$				
$l = -1$ $j = +0.5$				
Error RMS		28.85×10^{-3}		14.33×10^{-3}

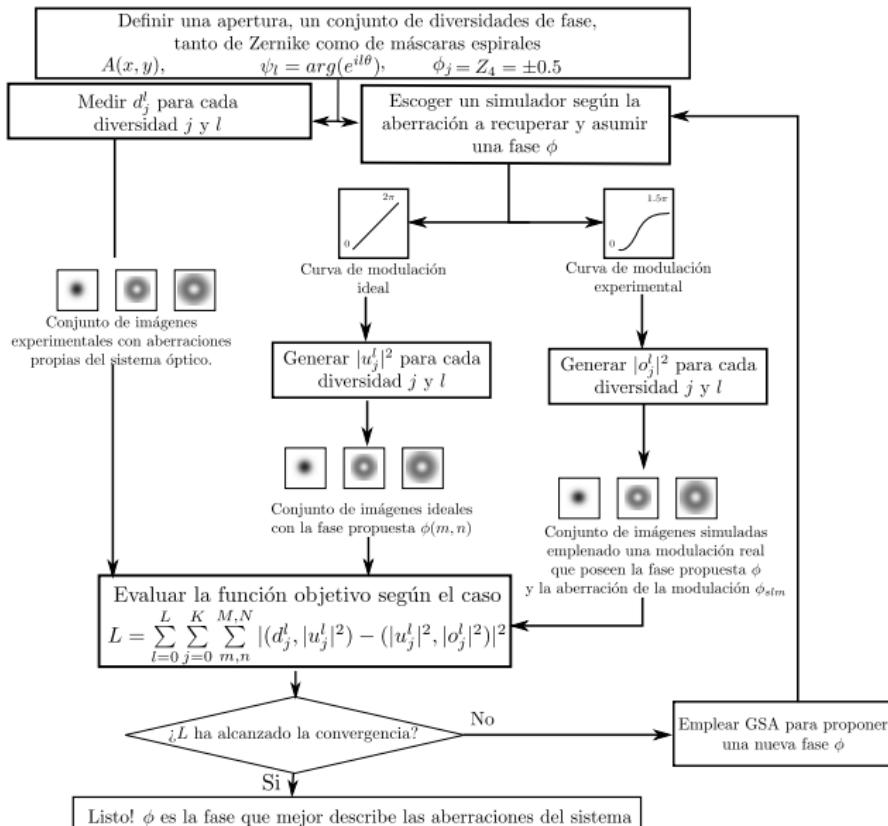
Modificaciones sobre PD coherente



Nuevo funcional generalizado

$$L(\phi) = \sum_{l=0}^L \sum_{j=0}^K \sum_{u,v}^{M,N} |(d_j^l, |u_j^l|^2) - (|u_j^l|^2, |o_j^l|^2)|^2$$

Diagrama de flujo con las modificaciones sobre PD coherente



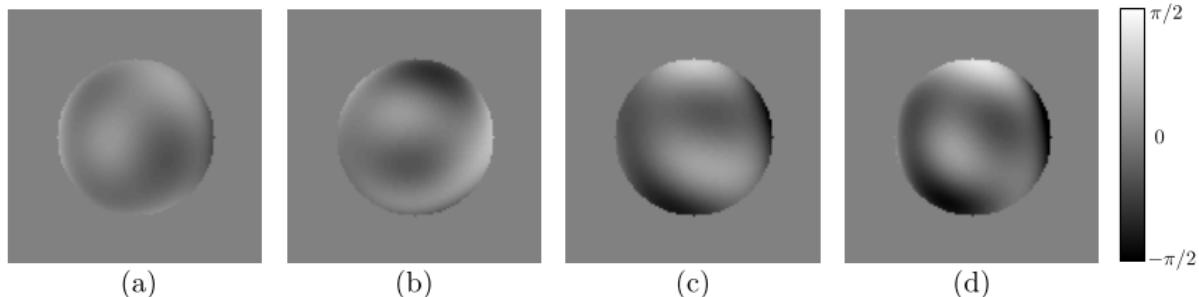
Diversidad de fase como sensor de aberraciones a causa de la modulación en fase (PD2)

	Intensidad sistema limitado por difracción $ u_j^l ^2$	Intensidad inicial propuesta por PD $ o_j^l ^2$	Intensidad recuperada por PD $ o\{\phi_{slm}\}_j^l ^2$	Intensidad experimental inicial d_j^l	Intensidad experimental corregida
$l = +1$ $j = 0$					
$l = -1$ $j = 0$					
$l = +1$ $j = +0.5$					
$l = -1$ $j = +0.5$					
Error RMS				28.85 $\pm 10^{-3}$	15.79 $\pm 10^{-3}$

Diversidad de fase como sensor de aberraciones a causa del sistema óptico (PD1)

	Intensidad inicial propuesta por PD $ \phi_j^l ^2$	Intensidad experimental inicial d_j^l	Intensidad recuperada por PD $ \phi_{soj} _j^l ^2$	Intensidad experimental corregida
$l = +1$ $j = 0$				
$l = -1$ $j = 0$				
$l = +1$ $j = +0.5$				
$l = -1$ $j = +0.5$				
Error RMS		28.85×10^{-3}		15.65×10^{-3}

Recuperación de la aberración causada por el SLM



Comparación de las aberraciones obtenidas para cada una de las modificaciones de PD coherente. (a) Aberración obtenida con PD coherente, (b) aberración obtenida con PD1, (c) aberración obtenida con PD2 y (d) aberración obtenida a través de la diferencia entre (a) y (b).

Comparación	Error RMS [λ]
(c) - Frente de onda plano	$66,21 \times 10^{-3}$
(d) - Frente de onda plano	$66,31 \times 10^{-3}$
(c) - (d)	$0,87 \times 10^{-3}$

Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del problema
- Objetivos

2 Generación de vórtices ópticos

- Marco teórico
- Modulador espacial de luz
- Caracterización de las curvas de modulación
- Aberraciones en vórtices ópticos

3 Caracterización de aberraciones en vórtices ópticos

- Marco teórico
- Diversidad de fase
- Corrección de aberraciones con diversidad de fase coherente
- Modificaciones sobre diversidad de fase
- Resultados: Modificaciones sobre PD coherente

4 Conclusiones

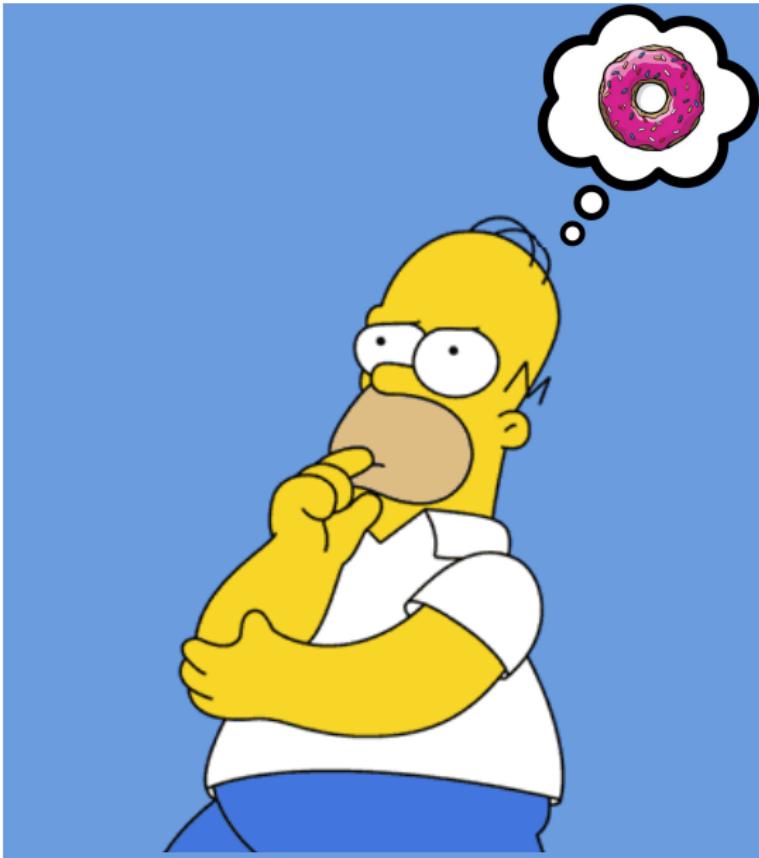
Conclusiones

- El mejor estado para la generación de OVs no necesariamente es aquel donde la modulación en fase es de 2π dado que también debe haber un compromiso con la modulación en amplitud.
- A partir de la curva de modulación en fase, se implementó un algoritmo para la simulación de los OVs generados con dicha curva de modulación y esta se empleó en algoritmos de diversidad de fase.
- Se propuso una nueva aplicación para PD coherente basado en la curva de modulación que permite determinar las aberraciones que son inducidas por una modulación en fase no ideal.
- Se obtuvo las aberraciones de un sistema óptico, diferenciando en estas aquellas que son producidas por el SLM y por los demás elementos ópticos.
- Se comprobó la validez del método recuperando las aberraciones causadas por la modulación del SLM a través de las del sistema óptico y las totales obtenidas.

Trabajo futuro

- Emplear vórtices ópticos generados mediante redes de difracción en los algoritmos de diversidad de fase propuestos.
- Implementar PD2 para la detección de aberraciones ocasionadas por la modulación de fase de un SLM diferente.
- Estudiar la generación de vórtices ópticos con iluminación parcialmente coherente y desarrollar un algoritmo de diversidad de fase para este caso.

¿Alguna pregunta?



Referencias I

-  Joseph W. Goodman.
Introduction to Fourier optics.
Roberts & Co, Englewood, Colo, 3rd ed edition, 2005.
-  Santiago Echeverri Chacón.
Generación y caracterización de vórtices ópticos mediante moduladores espaciales de luz.
PhD thesis, Universidad EAFIT, 2015.
-  Pierre Gilles de Gennes and Jacques Prost.
The physics of liquid crystals.
Number 83 in The international series of monographs on physics. Clarendon Press, Oxford, 2. ed., reprint edition, 2007.
-  Peter Schemmel, Giampaolo Pisano, and Bruno Maffei.
A modular spiral phase plate design for orbital angular momentum generation at millimetre wavelengths.
Optics Express, 22(12):14712, June 2014.
-  N. R. Heckenberg, R. McDuff, C. P. Smith, and A. G. White.
Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms.
Opt. Lett., 17(3):221–223, 1992.

Referencias II



Ariel Burman.

Caracterización y control de un microdisplay como modulador espacial de luz.

PhD thesis, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 2010.



Néstor Raúl Uribe Patarroyo.

Optical Space Applications of Liquid Crystals: Polarimetry and Photon Orbital Angular Momentum in remote sensing.

PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, España, 2011.



Naoshi Baba and Kohta Mutoh.

Measurement of telescope aberrations through atmospheric turbulence by use of phase diversity.

Applied optics, 40(4):544–552, 2001.



Mark R. Dennis, Kevin O'Holleran, and Miles J. Padgett.

Chapter 5 singular optics: Optical vortices and polarization singularities.
In *Progress in Optics*, volume 53, pages 293–363. Elsevier, 2009.



Wen Cheng.

Optical Vortex Beams: Generation, Propagation and Applications.

PhD thesis, University of Dayton, 2013.

Referencias III

-  Walter Harm, Stefan Bernet, Monika Ritsch-Marte, Irina Harder, and Norbert Lindlein.
Adjustable diffractive spiral phase plates.
Optics Express, 23(1):413, January 2015.
-  Richard G. Paxman, Timothy J. Schulz, and James R. Fienup.
Joint estimation of object and aberrations by using phase diversity.
JOSA A, 9(7):1072–1085, 1992.
-  Visa Korkiakoski, Christoph U. Keller, Niek Doelman, Rufus Fraanje, and Michel Verhaegen.
Joint optimization of phase diversity and adaptive optics: demonstration of potential.
Applied optics, 51(1):102–113, 2012.
-  David Rozas.
Generation and Propagation of Optical Vortices.
PhD thesis, WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, 1999.
-  Heather I. Campbell, Sijiong Zhang, Alan H. Greenaway, and Sergio Restaino.
Generalized phase diversity for wave-front sensing.
Opt. Lett., 29(23):2707–2709, 2004.



Paul M. Blanchard, David J. Fisher, Simon C. Woods, and Alan H. Greenaway.

Phase-diversity wave-front sensing with a distorted diffraction grating.
Appl. Opt., 39(35):6649–6655, 2000.