

PLATAFORMA DE SIMULACIÓN DE ABERRACIONES ÓPTICAS VÍA IMPLEMENTACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE UN SLM Y RECONSTRUCCIÓN DE FASE USANDO ALGORITMOS BASADOS EN LOS SENSORES DE HARTMANN-SHACK

Natalia Ramirez^{*†}, René Restrepo^{*}

**Grupo de Óptica Aplicada, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad EAFIT, Carrera 49 N° 7 Sur - 50, Medellín, Colombia.*

Recibido 27 Noviembre 2013; aceptado 19 Noviembre 2014
Disponible en línea: 27 Octubre 2015

Resumen: Dada la importancia que hoy día presenta dentro del ámbito de la óptica, la implementación y conocimiento de dispositivos capaces tanto de generar aberraciones ópticas bien caracterizadas como de sensarlas, en este artículo se presenta el funcionamiento de una plataforma de simulación, de un sistema completo capaz de generar frentes de onda vía la programación de las características de un modulador espacial de luz (SLM), así como la implementación de los algoritmos de reconstrucción modal empleados por los sensores de Hartmann-Shack (HS), y usando propiedades de los algoritmos de propagación de Fresnel.

Palabras clave: Moduladores espaciales de luz, sensores de Hartmann-Shack, propagación de Fresnel.

SIMULATION PLATORM OF OPTICAL ABERRATIONS BY IMPLEMENTATION OF SLM FEATURES AND PHASE RECONSTRUCTION USING ALGORITHMS BASED ON HARTMANN-SHACK SENSORS

Abstract: Currently, the devices development used on the sensing and generation of wavefront is very important for adaptive optics. Therefore, we present a simulation where is possible to generate wavefronts through the programming of SLM characteristics. In addition, sensing the wavefronts was made via algorithms of modal reconstruction, typically used for Hartmann-Shack sensors. The simulation platform is based in Fresnel propagation theory to simulate the light path.

Keywords: Spatial light modulators, Hartmann-Shack sensors, Fresnel propagation.

[†] Autor al que se le dirige la correspondencia:
Tel. (+574) 2619500 ext. 9321.
E-mail: natalia.ramirezcano@gmail.com (Natalia Ramirez).

1. INTRODUCCIÓN

Gran parte del estudio y desarrollo de la óptica, se basa en la generación, caracterización y modificación de los campos ópticos. Ahora bien, la información completa que contienen dichos campos, hace posible de determinar a través del conocimiento de solo dos de sus parámetros principales; la fase y la amplitud real del campo eléctrico, de los cuales, solo la amplitud a través de la intensidad, resulta ser detectable de manera directa usando cámaras tipo CCD o CMOS. Sin embargo, para obtener toda la información del campo óptico, no solo se necesita la información de la intensidad, sino que también se hace necesario el conocimiento de la fase, puesto que es quien lleva dentro de la amplitud compleja del campo eléctrico la información del frente de onda.

Por tal motivo, el estudio de la fase, ha suscitado el desarrollo de un gran número de investigaciones tanto en aplicaciones científicas, como en instrumentación ([Salazar-Bloise, 2008](#) y [Bonet, 1999](#)) que permitan generar medios para su detección, cálculo y medición.

Existen diversos métodos para la detección de la fase, los más usados son los interferométricos. Sin embargo, en este trabajo se tratará en particular uno de los métodos indirectos de detección no interferométricos, los cuales han tenido un auge en campos de estudio tan dispares como la astronomía y la optometría ([Furlan et al., 2000](#) y [Sanchez-Blanco et al., 2007](#)) y se relacionan tanto con algoritmos de diversidad de fase; empleados en los sensores de curvatura ([Bonet, 1999](#)), como con algoritmos de reconstrucción zonal y modal de la superficie del frente de onda ([Ares-García, 1999](#)) empleados en sensores de Hartmann-Shack (HS), siendo este último el que se abordará en este trabajo.

Hasta ahora solo se ha hablado de la detección de la fase, sin embargo, para su generación se emplean típicamente moduladores espaciales de luz (SLM). Los SLM son dispositivos capaces de manipular computacionalmente tanto la fase como la amplitud de los haces de luz que interactúan con ellos, permitiendo de ésta manera, generar con una resolución pixel a pixel cualquier tipo de frente de onda y la configuración más común que éstos presentan está basada en la

tecnología de cristal líquido - twisted nematic ([Uribe-Patarroyo, 2011](#)).

A través del conocimiento de los SLM como de los HS, nuestro problema principal, radica en la implementación de una simulación de alta calidad que reproduzca un arreglo experimental capaz de generar frentes de onda a través del empleo de un SLM, así como de sensorlos a través de un HS, donde se tengan en cuenta los efectos de la discretización, introducidos por un SLM cuando la fase está siendo modificada. Finalmente, al presentar dicho problema una condición de bidireccionalidad, dado que no solo simulará la generación de dichos frentes de onda, sino que también los sensorá, se hace posible conocer el grado de error entre los frentes de onda simulados y sensorados, permitiendo de esta manera, tener un grado de control sobre la calidad de los resultados.

En la sección 2 se dedica a explicar la implementación de la generación, la propagación y el sensorado de los frentes de onda, en la sección 3 se presentan los resultados que arroja la simulación, y por último se presentan las conclusiones.

2. IMPLEMENTACIÓN

Los algoritmos de ésta simulación, pueden dividirse en cuatro grandes bloques; algoritmos de generación de frentes de onda a partir de la programación de un SLM en modo de solo fase, algoritmos de propagación de dichos frentes para simular las dos propagaciones, desde el SLM hasta la matriz de micro-lentes (MLA) y luego, desde la MLA hasta la CCD, de cuya consecuencia resulta el mapa de spots, siguiendo con la binarización de este mapa y el cálculo de las coordenadas de sus centroides, y finalmente, los algoritmos de reconstrucción modal empleados por sensores HS. En la [Fig. 1](#) se puede visualizar este proceso.

2.1. Algoritmos de generación de frentes de onda

Para la generación de dichos frentes de onda, se programaron máscaras de fase en módulo 2π de las funciones lente correspondientes a las aberraciones constantes y las aberraciones de bajo

orden, teniendo en cuenta, el número de píxeles en x y el número de píxeles en y del SLM, el tamaño de píxel, la longitud de onda de la luz empleada, y la curva de calibración del modulador. Las funciones de fase, fueron programadas tanto a partir de funciones lente como de combinaciones lineales de los polinomios de Zernike.

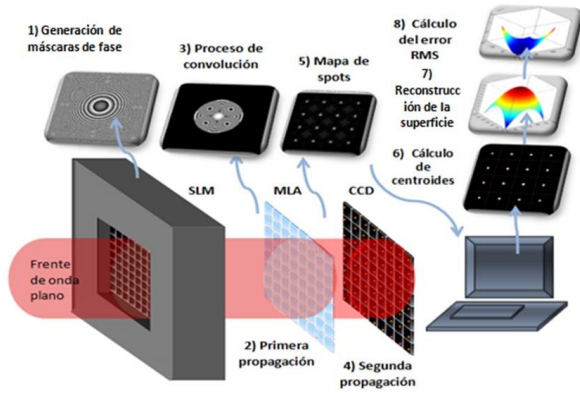


Fig. 1. Etapas de funcionamiento de un sistema SLM-HS.

Las funciones lente programadas, corresponden tanto a la función de fase de primer orden; capaz de simular frentes de onda planos con o sin inclinación en alguno de sus ejes, como a las funciones de fase cuadrática; capaces de abarcar todas las aberraciones de bajo orden como los son las correspondientes a: las lentes esféricas, cilíndricas y toroidales convergentes y divergentes, así como las lentes astigmáticas. Algunos ejemplos se muestran en la Fig. 2.

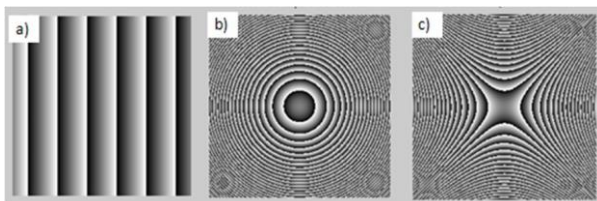


Fig. 2. Fase en módulo 2π . a) Tilt en x . b) Desenfoque. c) Astigmatismo.

Adicionalmente, se programaron máscaras de fase a partir de combinaciones lineales de los polinomios de Zernike como puede observarse en la Fig. 3.

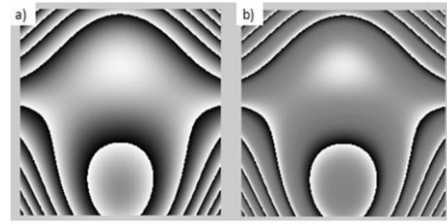


Fig. 3. Fase en módulo 2π . a) para relación lineal del SLM. b) Para relación no lineal.

Los resultados mostrados en la Fig. 3(a) se obtuvieron modelando una curva lineal de calibración en el SLM, y la Fig. 3(b) usando una curva no lineal mostrada en la Fig. 4.

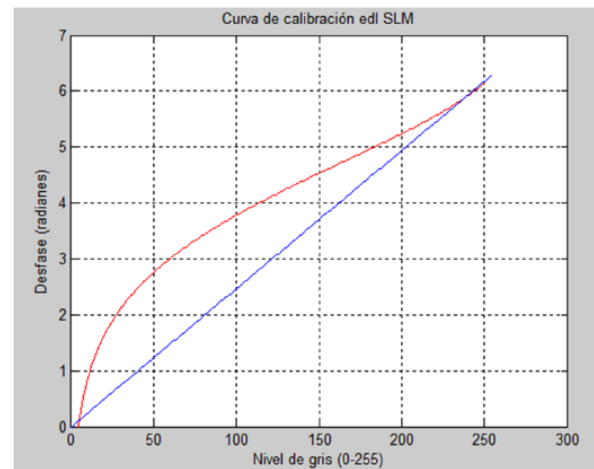


Fig. 4. Curva de calibración del SLM.

2.2. Propagación

En esta etapa, se implementaron algoritmos de propagación de un solo paso (Schmidt, 2010 y Voelz, 2010) para la simulación de los dos procesos que sufren los frentes de onda desde que son generados por el SLM hasta llegar al CCD, después de haber atravesado la MLA típica de los sensores HS. Este algoritmo de propagación, emplea una única evaluación de la transformada de Fourier, la cual puede ser expresada como un proceso de convolución como se muestra en (1).

$$u(x_2, y_2) = u(x_1, y_1) \otimes \left[\frac{\exp[ik\Delta z]}{i\lambda\Delta z} \exp\left[\frac{ik}{2\Delta z}(x_1^2 + y_1^2)\right] \right]. \quad (1)$$

La Fig. 5 (a) muestra la amplitud compleja del plano de entrada, es decir la amplitud y fase que representa la proyección en el SLM y la Fig. 5 (b)

representa la intensidad en el plano de salida, que en este caso sería el plano donde está ubicada la MLA.

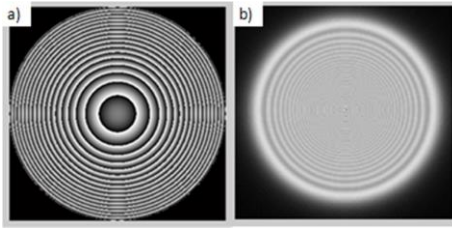


Fig. 5. a) Amplitud compleja en el plano del SLM. b) Intensidad de la primera propagación en el plano del MLA.

De la misma forma, se propaga desde el MLA hasta el plano de detección CCD, teniendo en cuenta la modificación en la fase que introduce el MLA a la fase propagada del SLM, y como resultado se obtiene el patrón de spots típicos de los sensores HS, como puede verse en la [Fig. 6](#).

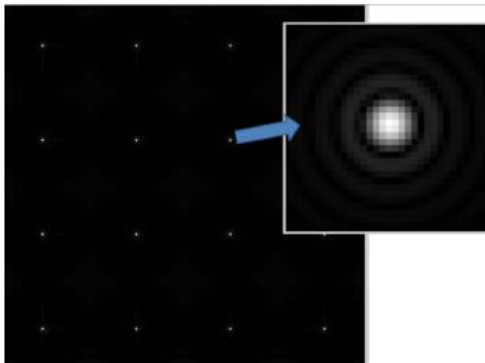


Fig. 6. Mapa de spots como resultado de los procesos de propagación, para un frente de onda plano.

2.3. Binarización y cálculo de centroides

En esta etapa, se binarizó la imagen del mapa de spots para encontrar las coordenadas de los centroides, necesarios para poder desarrollar los algoritmos de reconstrucción modal con los cuales se hace la reconstrucción de la superficie del frente de onda.

En nuestro caso, se realizó un umbral previo a la binarización del mapa de spots, es decir, se encontró el valor máximo en la escala de grises, y

se definió otro valor con el que se procedió a binarizar la imagen, de manera que todos los valores inferiores a los de éste intervalo quedasen en negro, mientras que los valores que pertenecieran a dicho intervalo quedasen en blanco.

Para el cálculo de los centroides, posterior a la binarización, se dividió la imagen binarizada del mapa de spots en submatrices correspondientes a cada una de sus respectivas microceldas como se ve en la [Fig. 7](#) y se procedió a encontrar el valor máximo y mínimo tanto para la coordenada en x como para la coordenada en y de cada una de las submatrices de las microceldas, pudiéndose determinar de esta forma, el centroide de cada una al promediar los valores máximos y mínimos en ambas coordenadas.

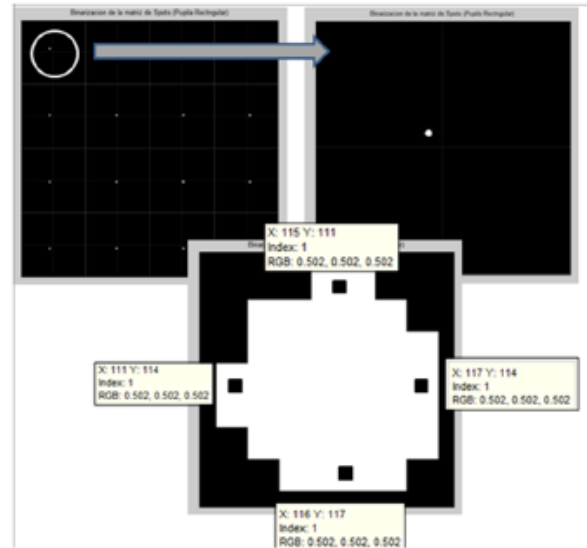


Fig. 7. Cálculo de las coordenadas de los centroides.

2.4 Reconstrucción Modal

Se implementaron algoritmos de reconstrucción modal típicos de los sensores HS para el sensado de las superficies generadas, a partir de una descomposición en valores singulares de un sistema matricial.

Dado que, los frentes de onda se pueden considerar como superficies, y estas pueden analizarse y/o sintetizarse a partir de series ortogonales, como las series de Taylor, las de

Fourier Zernike o las de Zernike, se hace posible igualar las derivadas parciales en x y en y de dicha superficie a las derivadas parciales en x y en y de los polinomios de la serie empleada para su reconstrucción, en este caso fueron usado los polinomios de Zernike (Dai, 2008 y Mahajan 2011). El sistema matricial se muestra en (2).

$$S = Ea, \quad (2)$$

S representa el valor de las pendientes del frente de onda con respecto a x y y evaluadas en los puntos centrales de cada microcelda. E es una matriz que contiene las pendientes para cada polinomio empleado en la reconstrucción del frente de onda, evaluado en los centros de cada microcelda y a es el vector que contiene los pesos de los polinomios de Zernike que constituyen dicho frente de onda.

3. RESULTADOS

Presentaremos los resultados para los algoritmos de propagación, teniendo en cuenta la curva de calibración no lineal del SLM. Véase Fig. 8.

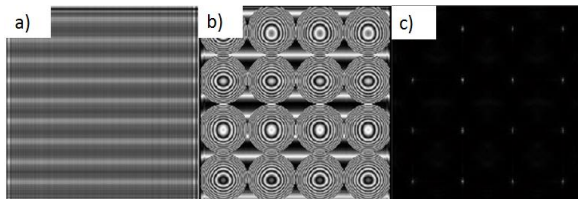


Fig. 8. a) Intensidad de la primera propagación. b) Convolución del plano de salida del SLM con la MLA. c) Intensidad de la segunda propagación.

Así mismo, los resultados de la reconstrucción del frente de onda para el caso particular de un astigmatismo con curva de calibración lineal del SLM. Véase Fig. 9.

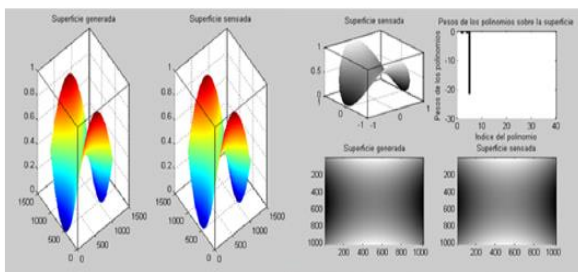


Fig. 9. Resultados de las superficies sensadas vs. Las generadas.

La plataforma de simulación entrega las imágenes sensadas como las generadas tanto en formato tridimensional como en escala de grises, así como los pesos de los polinomios de Zernike que constituyen el frente de onda en cuestión. Por último, permite visualizar el error medio cuadrático RMS entre las superficies sensadas y generadas.

La Fig. 10 muestra el cálculo del RMS para el ejemplo ilustrado en la Fig. 9.

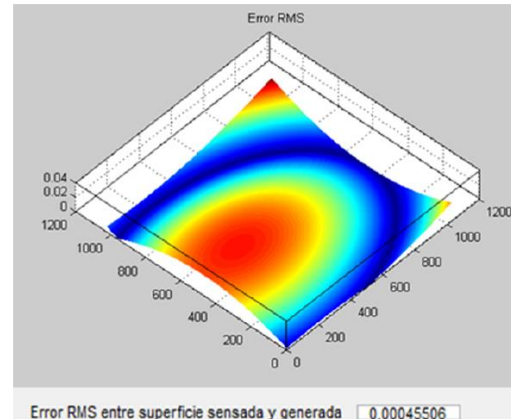


Fig. 10. RMS entre un astigmatismo generado en el SLM y el sensado a través del HS.

4. CONCLUSIONES

Con este trabajo se vislumbra el grado de error que introduce una modulación no lineal en la reconstrucción posterior de la fase. Los sensores de Hartmann-Shack, solo pueden proporcionar una aproximación de las superficies sensadas considerando un adecuado balance entre su resolución y el grado de curvatura de las superficies seleccionadas. La buena calidad del sensado de las superficies depende de calidad del mapa de centroides. Finalmente se logró implementar una serie de algoritmos articulados en una plataforma de verificación del sensado de la fase para montajes experimentales cuando se requiera del uso de moduladores espaciales de luz.

AGRADECIMIENTO

Queremos agradecer al profesor Luciano Angel Toro, al profesor Daniel Velásquez y a la profesora Myrian Tebaldi por dedicar parte de su

tiempo y colaboración dentro de la resolución de éste trabajo.

REFERENCIAS

- Ares-García, J. (1999). *Diseño e implementación de un sensor Shack-Hartmann para la medida de posiciones y desplazamiento*. Trabajo de Grado de licenciado en física. Departamento de Física Aplicada. Universidad de Santiago de Compostela.
- Bonet, J. A. (1999). High spatial resolution imaging in solar physics. *Motions in the solar atmosphere. Astrophysics and space science library.*, **239**: 1-34.
- Dai, Guang-Ming. (2008). *Wavefront Optics for Vision Correction*, Capítulo 3. Fremont, California: SPIE Press.
- Furlan, W., Monreal, J. G., & Escrivá, L. M. (2000). *Fundamentos de Optometría y Refracción ocular*. Valencia: Universidad de Valencia.
- Mahajan, V. N. (2011). *Aberration Theory Made Simple, Capitulo 8*. Second Edition, Bellingham, Washington: SPIE Press.
- Salazar-Bloise, F. (2008). *Speckle photography and speckle interferometry and their applications to mechanical solid problems*. Research Signpost.
- Sanchez-Blanco, E., & Bello, D. (2007). *Technical Note: GTCAO. System. Wavefront sensor. ADR*. La Laguna, Tenerife: Universidad de La Laguna.
- Schmidt, J. D. (2010). *Numerical Simulation of Optical Propagation: with examples in MATLAB, capitulo 6*. Bellingham, Washington: SPIE Press.
- Uribe-Patarroyo, N. (2011). *Optical Space Applications of Liquid Crystals: Polarimetry and Photon Orbital Angular Momentum in Remote Sensing*. Tesis de Doctorado. Departamento de Óptica. Universidad Complutense de Madrid.
- Voelz, D. (2010). *Computational Fourier Optics: A MATLAB Tutorial, capitulo 5*. Bellingham, Washington: SPIE Press.

SOBRE LOS AUTORES

Natalia Ramirez

Ingeniera Física de la Universidad EAFIT. Área de interés investigativo: Óptica aplicada y electromagnetismo aplicado.

René Restrepo

Profesor e ingeniero mecánico de la Universidad EAFIT, con maestría en física e informática de la Universidad de La Laguna, Tenerife, España. Candidato a Doctor del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y la Universidad Complutense de Madrid. Área de interés investigativo: Óptica aplicada en sistemas de precisión.