

## IMPLEMENTACIÓN DE UN FILTRO DE MUESTREO COMO SENSOR DE FRENTE DE ONDA TIPO HARTMANN

Alejandro Mira, John Fredy Barrera<sup>♦</sup>, Catalina Macias

*Grupo de Óptica y Fotónica, Instituto de Física, Universidad de Antioquia, A.A. 1226, Medellín, Colombia*

(Recibido 13 de Oct. 2005; Aceptado 04 de Abr. 2006; Publicado 16 de Jun. 2006)

### RESUMEN

En este trabajo se estudia la implementación de un filtro de muestreo como el elemento óptico central de un sensor de frente de onda tipo Hartmann. Se muestran las principales características del filtro de muestreo, las cuales se usan en este caso para explicar y entender el funcionamiento de un sensor tipo Hartmann, con el cual se logra conocer la forma de un frente de onda bajo estudio a partir del patrón de difracción que éste produce al pasar por el filtro de muestreo. Se presentan simulaciones computacionales que muestran la validez de la propuesta y su potencialidad en la medición de frentes de onda reales.

**Palabras claves:** Filtro de muestreo, Sensor de onda tipo Hartmann

### ABSTRACT

In this work the implementation of a sampling filter as the central optic element of a Hartmann type wave front sensor is studied. The main characteristics of the sampling filter are shown, those characteristics are used in this case to explain and to understand the operation of a Hartmann sensor, which leads us to know the form of a wave front under study starting from the diffraction pattern that takes place when the wavefront goes through the sampling filter. Computer simulations that confirm the validity of this approach and its potential in the measurement of real wavefronts are shown.

**Keywords:** Sampling filter, Hartmann type wave front sensor

### 1. Introducción

El sensor tipo Hartmann permite conocer la forma de un frente de onda a partir del patrón de difracción que éste produce al pasar por una pantalla perforada o una máscara [1,2]. En este trabajo se implementa un sensor tipo Hartmann con un filtro de muestreo de amplitud que esta constituido por un arreglo periódico de celdas cuadradas.

Puesto que el filtro es un objeto periódico, al ser iluminado con una onda plana y monocromática, por el efecto Talbot se encuentra que en el denominado “plano de autoimagen” se obtiene un arreglo de cuadrados dispuestos de igual manera que las celdas del filtro [3]. Igualmente el mismo filtro puede ser iluminado con un frente de onda desconocido, el cual generará en el plano de autoimagen un patrón de intensidad distinto al obtenido bajo iluminación con onda plana; estos patrones básicamente se diferencian en la ubicación del arreglo de cuadrados. Luego, la medición de estas diferencias permite reconstruir el frente de onda desconocido.

---

<sup>♦</sup> Email: [jbarrera@barlai.udea.edu.co](mailto:jbarrera@barlai.udea.edu.co)

## 2. Filtro de Muestreo

Un filtro de muestreo ideal es un elemento óptico constituido por puntos matemáticos distribuidos en un arreglo cuadrado sobre una pantalla opaca. La función de transmitancia de un filtro de muestreo ideal puede representarse de la forma [4]:

$$T(x', y') = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp\left\{ \frac{-ik}{2z} [(x'-nd)^2 + (y'-md)^2] \right\} \quad (1)$$

donde la pareja  $(n, m)$  representa la coordenada de un punto en particular,  $\kappa=2\pi/\lambda$ ,  $d$  es el período del filtro,  $\lambda$  la longitud de onda de la luz incidente y  $z=2d^2/\lambda$  es la distancia al plano de autoimagen. De acuerdo a esta expresión, la transmitancia de un filtro de muestreo ideal puede representarse equivalentemente como la suma de fases cuadráticas, lo que implica que el filtro puede “entenderse” como un conjunto de lentes centradas en los puntos del filtro, lentes de longitud focal  $z$  y apertura infinita. De forma tal, que si un frente de onda plano incide sobre el filtro este lo transforma en un arreglo de puntos brillantes, que corresponderían a los puntos focales de cada lente equivalente.

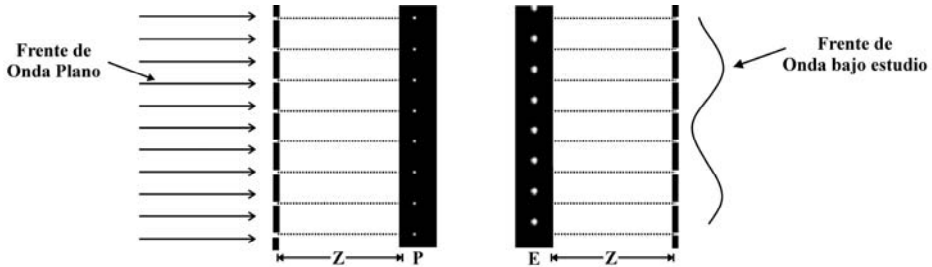
Hay que tener presente que las lentes introducidas en este modelo en realidad no existen, pero permiten tener una visión sobre el funcionamiento de un sensor tipo Hartmann. El uso de las lentes esta permitido por la ecuación (1), de acuerdo con la cual la transmitancia del filtro es proporcional a la transmitancia de lentes delgadas convergentes. En realidad el fenómeno de la creación del arreglo de puntos brillantes tiene carácter integral, aparece como el resultado de la difracción del frente de onda sobre los agujeros del filtro, y la posterior interferencia del campo difractado delante del filtro. Cabe anotar, que en la practica el filtro de muestreo esta constituido por celdas de dimensión finita; en particular y para muchas aplicaciones se usan celdas cuadradas [3,5,6].

Un dispositivo alternativo para estudiar frentes de onda es el sensor Shack-Hartmann [7], en el cual se usa un arreglo de microlentes en lugar de un filtro de muestreo de amplitud [8]. La diferencia entre el uso del filtro de muestreo y el arreglo de microlentes radica en que el primero tiene una naturaleza colectiva, es decir, que cada una de las celdas del filtro contribuye a la formación de cada uno de los puntos brillantes en el plano de autoimagen del filtro, mientras que en el segundo cada punto brillante es formado por una lente en particular. De esta forma, si al filtro de muestreo le faltan algunas celdas (tiene defectos), igual el patrón de difracción lucirá como si esos defectos no existiesen, mientras que si en un arreglo de microlentes hay un defecto (no posee una microlente) el punto brillante asociado a esté no se presentará.

## 3. Descripción del método y resultados

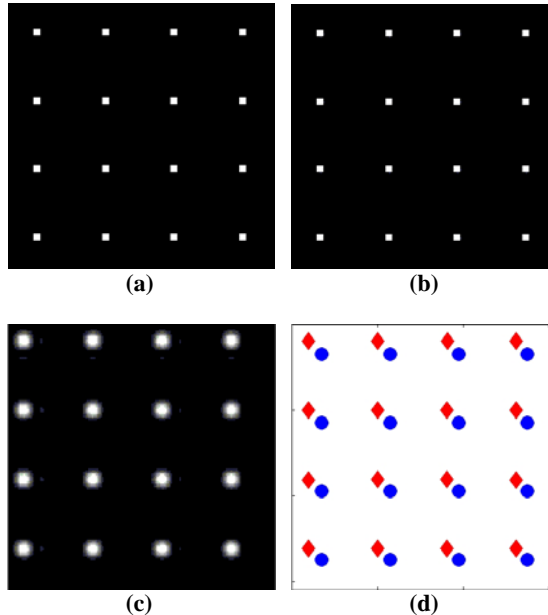
Las simulaciones realizadas para estudiar la implementación del filtro de muestreo como elemento central de un sensor tipo Hartmann, consisten en iluminar el filtro con una onda plana y obtener la intensidad en el primer plano de autoimagen; luego realizar el mismo procedimiento pero iluminando con una onda esférica (ver la figura 1). En este caso, el filtro tiene un período  $d=40 \mu m$  y esta constituido por un arreglo cuadrado de  $102*102$  celdas unitarias de dimensión  $4 \mu m*4 \mu m$  cada una, por lo que el filtro tiene un ancho transversal de  $4.096 mm$ . Como ilumina-

ción se uso luz monocromática de longitud de onda  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  correspondiente al He-Ne, y por tanto la distancia del filtro al plano de autoimagen es  $z=5.06 \text{ mm}$ .



**Figura No.1.** Representación del sensor de Hartmann: donde  $z$  es la distancia del filtro al plano de autoimagen, P y E corresponden a una misma región espacial de los patrones obtenidos en el plano de autoimagen bajo iluminación con onda plana y esférica, respectivamente.

Como era de esperarse en la figuras 2(a) y 2(b) se puede notar que al iluminar el filtro con una onda plana y monocromática, en el plano de autoimagen se obtiene una réplica exacta del filtro, mientras que en la figura 2(c) se puede observar el desplazamiento que sufren las celdas cuando la iluminación es esférica.



**Figura No.2.** Sección de una misma región espacial de: (a) El filtro de muestreo, (b) y (c) el patrón de intensidad en el plano de autoimagen del filtro para iluminación plana y esférica, respectivamente. (d)

Centroides de los puntos brillantes en (b) y (c) donde el símbolo ● representa los centroides obtenidos bajo iluminación con onda plana y ♦ para iluminación esférica.

Para cuantificar el desplazamiento sufrido por las celdas, se efectúa un procesamiento digital de las imágenes que permita identificar las posiciones de los elementos luminosos. El procesamiento consiste de rutinas en Matlab que implementan operaciones morfológicas que en primera instancia, detectan los objetos (celdas brillantes) individuales de la imagen; luego se procede a calcular el centro de dichos elementos (centroide), el cual depende de la forma y distribución de intensidad de cada objeto identificado; finalmente dicho centroide se toma como la coordenada de posición de cada celda. Dicho procesamiento se aplicó de igual forma para los patrones de intensidad obtenidos al iluminar el filtro con una onda plana y una onda esférica. De este modo se obtienen los centroides en cada caso, y a partir de ellos, se pueden conocer los desplazamientos sufridos por las celdas al cambiar el tipo de iluminación (ver figura 2(d)).

#### 4. Conclusiones

Se muestra la potencialidad del filtro de muestreo de amplitud en el estudio de frentes de onda, aprovechando las características del filtro como elemento periódico. Adicionalmente, por medio de la implementación de algoritmos computacionales, fue posible ubicar y comparar los centroides de las celdas luminosas obtenidas bajo iluminación plana y esférica. Una posterior medición de los desplazamientos de las celdas producidos por el frente de onda bajo estudio, permitirá encontrar la forma de dicho frente de onda. Para investigaciones posteriores se pretende estudiar el uso de un filtro de muestreo de fase, pues este tiene mayor eficiencia de difracción que el filtro de amplitud, lo que sería beneficioso en el momento de analizar frentes de onda débiles. Además, se quiere estudiar la incidencia que tendrían los defectos de un filtro en la reconstrucción de un frente de onda.

**Agradecimientos.** Los autores le agradecen a COLCIENCIAS y al CODI por su contribución al desarrollo de este trabajo.

#### Referencias

- [1] I. Ghozeil, “*Hartmann and other screen test*”, D. Malacara, ed., Wiley, New York, pp. 367-396, 1992.
- [2] J. Primot, N. Guérineau, “*Extended Hartmann test based on the pseudoguiding property of a Hartmann mask completed by a phase chessboard*”, *App. Opt.* 39, pp. 5715-5720, 2000.
- [3] K. Paturski, “*The self-imaging phenomenon and its applications*”, E. Wolf, ed, *Progress in Optics* 27, North-Holland, Amsterdam, pp. 3-108, 1989.
- [4] A. Kolodziejczyk, “*Self-imaging effect a new approach*”, *Opt. Commun.* 65, 84-86, 1988.
- [5] Z. Jaroszewicz, A. Kolodziejczyk, M. Sypek, “*Resolution of imaging by the sampling filter*”, *Optik* 110, pp. 479-482, 1999.
- [6] Z. Jaroszewicz, A. Kolodziejczyk, M. Sypek, “*Microlens array produced with help of the sampling filter*” *Opt. Eng.* 37, 11, pp. 3002-3006, 1998.
- [7] L. Seifert, H.J. Tiziani, W. Osten, “*Wavefront reconstruction with the adaptive Shack-Hartmann sensor*” *Opt. commun.* 245, pp. 255-269, 2005.
- [8] H. Nishihara, T. Shuhara, “*Micro Fresnel Lenses*”, E. Wolf, *Progress in Optics XXIV*, North-Holland, Amsterdam, pp. 3-37, 1987.