

Lente programable multifocal: Combinación coaxial y multieje

Multifocal programmable lens: Coaxial and multiaxis combination

Lenny A. Romero^(*,S), María S. Millán^(S), Elisabet Pérez Cabré^(S)

Grup d'Òptica Aplicada i Processament d'Imatge, Departament d'Òptica i Optometria, Univesitat Politècnica de Catalunya, Terrassa.

^(*) Email: lenny.alexandra.romero@upc.edu

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Recibido / Received: 05/03/2010. Versión revisada / revised versión: 09/04/2010. Aceptado / Accepted: 11/04/2010

RESUMEN:

En este trabajo se presentan cuatro métodos para combinar las distribuciones de fase de tres lentes de Fresnel de focal distinta (f_1 , f_2 , f_3), en una única distribución de fase enviada a un modulador espacial de luz (SLM) que proporciona modulación sólo de fase y que es de tecnología LCoS (Liquid Crystal on Silicon). La combinación de lentes se realiza para dos configuraciones: coaxial, donde todas las lentes tienen un eje óptico común y multieje, donde las lentes tienen ejes distintos. Algunas combinaciones multieje asocian lentes y prismas difractivos. Se realizó una simulación por ordenador y un análisis experimental para corroborar los resultados obtenidos.

Palabras clave: Elementos Ópticos Difractivos, Lente Programable, Lente Multifocal, Pantallas de Cristal Líquido sobre Silicio, Moduladores Espaciales de Luz.

ABSTRACT:

In this work we introduce four methods for merging the phase distributions of three Fresnel lenses of different focal length (f_1 , f_2 , f_3) into a single phase distribution. The resulting phase is implemented experimentally via an LCoS (Liquid crystal on silicon) spatial light modulator (SLM). The combination of lenses is arranged for two configurations: coaxial and multiaxis. In the former all lenses have a common optical axis, whereas in the latter the lenses have different axes. Some multiaxis combinations include diffractive lenses and prisms. We carried out computer simulations and an experimental analysis.

Key words: Diffractive Optical Element, Programmable Lens, Multifocal Lens, Liquid Crystal on Silicon Display LCoS, Spatial Light Modulator (SLM).

REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] V. Laude, "Twisted-nematic liquid-crystal pixelated active lens", *Opt. Commun.* **153**, 134–152 (1998).
- [2] J. A. Davis, D. M Cottrell, R. A. Lilly, S. W. Connely, "Multiplexed phase-encoded lenses written spatial light modulators", *Opt. Lett.* **14**, 420-422 (1989).
- [3] S. Serati, K. Bauchet, "SLMs meet the challenge of new applications", *Laser Focus World*, May 229-233 (1999).
- [4] P. Ambs, L. Bigué, E. Hueber, "Implementation of diffractive optical elements onto liquid crystal devices", *Proc. SPIE* **5518**, 92-103 (2004).
- [5] J. Otón, M. S. Millán, E. Pérez-Cabré, "Programmable lens design in a pixelated screen of twisted-nematic liquid crystal display", *Opt. Pura Apl.* **38**, 47-56 (2005).
- [6] C. Iemmi, J. Campos, J. C. Escalera, O. López-Coronado, R. Gimeno, M. J. Yzuel, "Depth of focus increase by multiplexing programmable diffractive lenses", *Opt. Express* **14**, 10207-10219 (2006).
- [7] A. Márquez, C. Iemmi, J. Campos, M.J. Yzuel, "Achromatic diffractive lens written onto a liquid crystal display", *Opt. Lett.* **31**, 392-394 (2006).
- [8] M. S. Millán, J. Otón, E. Pérez-Cabré, "Chromatic compensation of programmable Fresnel lenses", *Opt. Express* **14**, 6226-6242 (2006).

- [9] M. S. Millán, J. Otón, E. Pérez-Cabré, "Dynamic compensation of chromatic aberration in a programmable diffractive lens", *Opt. Express* **14**, 9103-9112 (2006).
- [10] Holoeye Photonics AG and Holoeye Corporation, <http://www.holoeye.com>.
- [11] J. Otón, P. Ambs, M. S. Millán, E. Pérez-Cabré, "Multipoint phase calibration for improved compensation of inherent wavefront distortion in parallel aligned liquid crystal on silicon displays", *Appl. Opt.* **46**, 5667-5679 (2007).

1. Introducción

Los elementos ópticos difractivos (DOEs) reproducidos mediante moduladores espaciales de luz (SLM) proporcionan soluciones para aplicaciones que requieren perfiles de fase complejos que son difíciles de construir con la óptica convencional [1-3]. Permiten la combinación de diferentes elementos ópticos en uno solo, como por ejemplo lentes de Fresnel monofocales y multifocales [4,5]. Actualmente, las pantallas de cristal líquido que operan como moduladores de fase están siendo muy utilizadas en el procesado óptico de la información para la reproducción de DOEs con la ventaja adicional de ser programables y controlables por ordenador [4].

Varios trabajos han estudiado la combinación de diferentes lentes difractivas en un mismo dispositivo [6-9]. Iemmi *et al* [6] proponen el multiplexado espacial de lentes con potencias próximas para incrementar la profundidad de foco. Márquez *et al* [7] han estudiado la realización de lentes multiplexadas con el objeto de proporcionar simultáneamente una única distancia focal para diferentes longitudes de onda. Otón *et al* [8,9] diseñaron una lente multiplexada, con una longitud focal común para diferentes longitudes de onda, capaz de compensar la aberración cromática. En [8,9] los autores proponen distintos tipos de multiplexado (espacial, temporal y espacio-temporal híbrido) y analizan su comportamiento.

En este trabajo se analiza la generación de un DOE consistente en una lente de Fresnel multifocal compuesta, teniendo en cuenta la modulación sólo de fase proporcionada por un modulador espacial de luz de tecnología LCoS, (HEO 1080P de Holoeye) [10], previamente calibrado y caracterizado [11]. La lente multifocal está compuesta por un conjunto de lentes de diferente potencia que comparten un mismo eje óptico (combinación coaxial) o que tienen ejes distintos (combinación multieje). En este último caso, los ejes correspondientes a las lentes asociadas pueden ser paralelos, cruzados, o pueden cortarse formando

un ángulo α . Cuando los ejes ópticos están cruzados o se cortan, el elemento diseñado equivaldría a la asociación de lentes y prismas (o desviadores de haz, *beam steering*).

Se presentan cuatro métodos para combinar, en disposición coaxial o multieje, las distribuciones de fase de tres lentes de focal distinta (f_1, f_2, f_3), en una única distribución de fase enviada al modulador. El primer método (M1) consiste en subdividir la apertura del modulador en líneas horizontales de píxeles y distribuir sucesivamente las tres lentes en las filas del modulador. El segundo método (M2) se propone subdividir la apertura del modulador en grupos de píxeles y distribuir entre ellos las funciones de fase de las tres lentes de manera aleatoria e independiente. El tercer método (M3) consiste en dividir la apertura del modulador, en tres sectores independientes representando en cada sector una única lente. El cuarto método (M4) consiste en realizar el producto de la distribución compleja de las tres lentes (suma de fases), representando en toda la apertura del modulador la fase resultante de dicha distribución multiplexada.

Se realizó una simulación por ordenador y un análisis experimental para corroborar los resultados obtenidos.

2. Fundamentos: Representación de la función fase en un modulador pixelado

Consideramos el patrón de fase cuadrática de una lente esférica con distancia focal f dado por $l(x_0, f)$. Por simplicidad se utiliza la notación en una dimensión. Esta distribución de fase se puede expresar de forma continua:

$$l(x_0, f) = \exp\left\{-j \frac{\pi}{\lambda f} x_0^2\right\}, \quad (1)$$

donde x_0 representa las coordenadas espaciales en el plano de la lente y λ la longitud de onda del iluminante.

Al insertar una fase lineal dada por un prisma en la apertura de la lente de la Ec. (1), se introduce un retraso del camino óptico que es mayor en un lado de la apertura que en el otro, inclinando el frente de onda a través de la apertura, es decir, desviando la dirección de propagación de la onda plana incidente un ángulo α con respecto al eje óptico.

Matemáticamente, la transmitancia de un prisma puede ser representada de forma continua mediante la expresión:

$$t_{\alpha}(x_0) = \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} \sin(\alpha x_0)\right\}. \quad (2)$$

Si en una apertura se codifica el producto $l(x_0, f) \cdot t_{\alpha}(x_0)$ el elemento resultante equivale a la asociación de una lente y de un prisma, o también, a una lente con un eje que forma un ángulo α con el eje inicialmente considerado. En general, se consideran ángulos pequeños (α , incidencia, emergencia) o prismas equivalentes delgados.

En el siguiente desarrollo matemático, se tienen en cuenta algunas limitaciones que aparecen cuando se envía la distribución de fase de la Ec. (1) a un dispositivo pixelado. La estructura pixelada de este dispositivo hace que la distribución de fase, inicialmente continua en la Ec. (1), esté espacialmente discretizada. La distribución discreta para una dimensión puede escribirse:

$$l(p, f) = \exp\left\{-j \frac{\pi}{\lambda} \frac{L^2}{N_1^2} p\right\}, p \in \left[-\frac{N_1}{2} + 1, \frac{N_1}{2}\right], \quad (3)$$

donde L representa el diámetro de la apertura de la lente programada a la que le corresponde un número de N_1 píxeles. En general $L \leq L_0$, donde L_0 es el tamaño de la apertura del dispositivo. De acuerdo con el criterio de Nyquist, la máxima frecuencia reproducible en el dispositivo se da en los píxeles localizados en los bordes de la apertura de la lente programada cuando se utilizan tan solo dos píxeles para presentar la frecuencia más alta correspondiente a una variación de fase de la señal de 2π . En el caso de la Ec. (3) esta condición establece la máxima diferencia de fase de π entre los píxeles situados en el borde de la apertura de la lente $p=(N_1/2-1), (N_1/2)$, es decir,

$$\left[\frac{\pi}{\lambda f} \frac{L^2}{N_1^2} \left(\frac{N_1}{2}\right)^2 - \frac{\pi}{\lambda f} \frac{L^2}{N_1^2} \left(\frac{N_1}{2} - 1\right)^2 \right] \leq \pi, \quad (4)$$

lo cual se simplifica en:

$$f \geq \frac{L^2}{\lambda N_1}. \quad (5)$$

Esto indica que la distancia focal de una lente generada en el dispositivo pixelado está acotada inferiormente. Esta cota inferior asegura que la función lente expresada en forma continua por la Ec. (1) haya sido muestreada suficientemente por la función lente expresada en forma discreta de la Ec. (3), cumpliéndose que la frecuencia de muestreo coincide con la de Nyquist en los bordes de la apertura de la lente.

Asumiendo que $L=N_1\Delta$, donde Δ es la distancia interpixel que suponemos igual en ambas dimensiones de la apertura (píxel cuadrado), se puede definir una focal de referencia f_{ref} , cuyo valor viene dado por:

$$f_{ref} = \frac{N_1}{\lambda} \Delta^2. \quad (6)$$

y que es la focal más pequeña (potencia máxima) de la lente programable.

La discretización de la función de fase y la condición impuesta por el criterio de Nyquist, representadas por las Ec. (3) y (4) para una sola lente, son también extrapolables a la asociación de la lente con un prisma.

La modulación del SLM empleado en este trabajo, de tecnología LCoS, es sólo de fase con un rango de modulación $[0, 2\pi]$ y discretizado en 256 niveles de gris. Utilizamos $\lambda=633$ nm en todos los casos.

3. Codificación espacial del DOE combinado de tres lentes

Los cuatro métodos de combinación de lentes que consideramos: codificación por líneas (M1), codificación aleatoria (M2), codificación por división de la apertura (M3) y por suma de las fases (M4), pueden utilizarse para asociar las lentes según una configuración coaxial o con una configuración multieje. En los siguientes subapartados se muestran los resultados obtenidos para ambas configuraciones utilizando algunos de los métodos M1...M4. En todos los casos se combinan tres sublentes l_1, l_2, l_3 de focales respectivas f_1, f_2, f_3 .

En las Figs. 1-8 se representan las distribuciones de fase en niveles de gris que se envían al modulador. Aunque por efecto de la presentación de las figuras, pueda parecer que existe

submuestreo de la función fase (o *aliasing*), debe tenerse en cuenta que en ningún caso la focal codificada es inferior a f_{ref} . Por tanto, una ampliación en detalle de la figura (véase, por ejemplo, Figs. 3 y 6) pone de manifiesto la ausencia de tal submuestreo.

3.1. Configuración coaxial

Presentamos la aplicación de los métodos de codificación por filas (M1) y codificación aleatoria (M2) a la composición multifocal de lentes en configuración coaxial.

3.1.1. Codificación por filas (M1)

Este método consiste en subdividir la apertura del modulador en líneas horizontales de píxeles y asignar a cada fila del modulador una de las sublentes. La distribución de fase se hace fila por fila hasta completar la apertura del modulador. De acuerdo con la configuración coaxial, hemos hecho coincidir los ejes ópticos de las tres sublentes (Fig. 1).

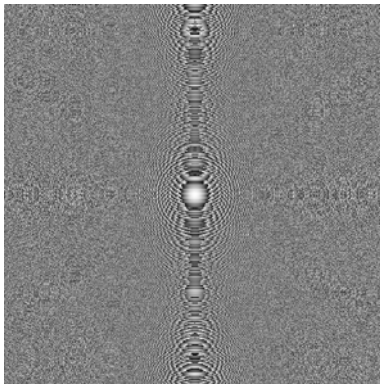


Fig. 1. Representación en niveles de gris de la distribución de fase del sistema multifocal de tres sublentes (l_1 , l_2 , l_3) codificadas por filas. Configuración coaxial.

3.1.2. Codificación aleatoria (M2)

En este método, la distribución de fase de las lentes se hace por píxeles repartidos de manera aleatoria. A cada píxel (x,y) de la apertura del modulador se le asigna de manera aleatoria un valor k , comprendido entre 0 y 1. Si $k \leq (1/3)$, el píxel representa la fase $l_1(x,y)$. Si $(1/3) < k \leq (2/3)$, el píxel representa la fase $l_2(x,y)$ y, finalmente, si $(2/3) < k$ el píxel representa la fase $l_3(x,y)$. La Fig. 2, muestra una lente multifocal construida mediante el método de codificación aleatoria. De nuevo, las tres sublentes tienen sus ejes ópticos coincidentes.

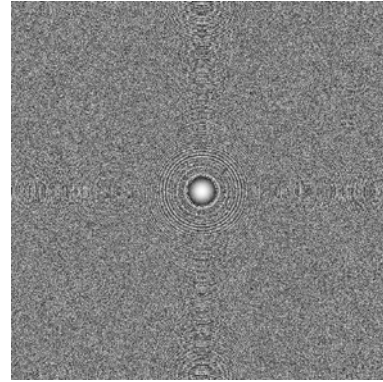


Fig. 2. Representación en niveles de gris de la distribución de fase del sistema multifocal codificada aleatoriamente. Configuración coaxial.

3.2. Configuración multieje

Se estudia el efecto producido al adicionar la fase lineal dada por un prisma sobre las sublentes l_1 y l_3 en tres métodos de combinación (M1, M2, M3). Los prismas considerados en este trabajo introducen un ángulo de desviación α de $\pm 0.15^\circ$ en dirección horizontal (x) y vertical (y). La fase lineal correspondiente será añadida a las sublentes l_1 y l_3 . La Fig. 3(a) muestra el patrón de fase lineal para un prisma con $\alpha = +0.15^\circ$ en dirección vertical.

En las secciones siguientes se presentan sistemas multifocales y multieje, bien por la superposición de una fase lineal, o bien con ejes paralelos (o cruzados). Se presentan ejemplos con los cuatro métodos (M1, M2, M3, M4).

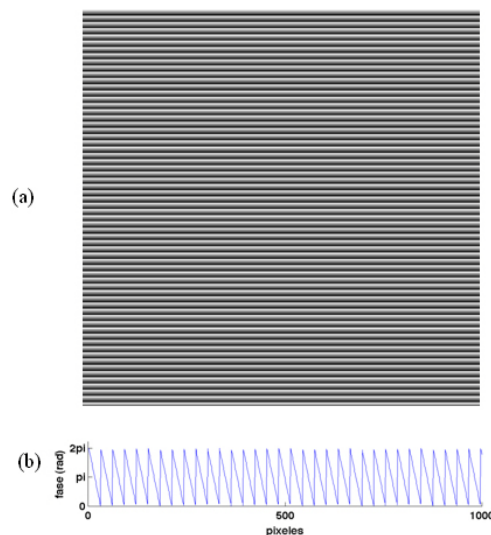


Fig. 3. (a) Representación en niveles de gris de la distribución de la fase lineal de un prisma con un ángulo de inclinación. $\alpha = +0.15^\circ$ en dirección y . (b) perfil del patrón de fase de (a).

3.2.1. Codificación por filas (M1)

Partiendo del caso representado en la Fig. 1 de configuración coaxial, hemos obtenido un sistema multiteje mediante la superposición de fases lineales en dos de las sublentes. Al sumar las fase lineales con ángulos $\pm\alpha$ en las lentes l_1 y l_3 , el frente de onda a la salida del sistema (lente + prisma) sufrirá una descomposición en tres haces orientados en los ejes $+\alpha, 0, -\alpha$. La Fig. 4 muestra la distribución de fase del sistema multifocal y multiteje para ángulos de desviación sobre el eje horizontal equivalente a $\alpha = 0.15^\circ$ sobre la lente l_1 y con $\alpha = -0.15^\circ$ sobre la lente l_3 .

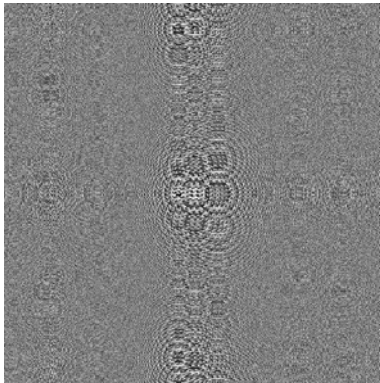


Fig. 4. Distribución de fase del sistema multifocal y multiteje codificada por filas con el efecto de un prisma de $\alpha = \pm 0.15^\circ$ sobre las lentes l_1 y l_3 .

3.2.2. Codificación aleatoria (M2)

Análogamente al caso de la sección anterior, partimos del sistema en configuración coaxial representado en la Fig. 2 para obtener un sistema multiteje mediante la superposición de fases lineales en dos de las sublentes con el fin de descomponer y desviar el haz propagado en dirección horizontal. La Fig. 5, muestra la misma codificación aleatoria introduciendo el efecto del prisma sobre las sublentes l_1 y l_3 para un ángulo de inclinación $\alpha=0.15^\circ$ sobre la lente l_1 y $\alpha=-0.15^\circ$ sobre la lente l_3 .

3.2.3. División de la apertura (M3)

Se divide la apertura del modulador en tres sectores independientes, representando en cada sector una única lente: $(l_1(x_0+x_d, f_1), l_2(x_0, f_2), l_3(x_0-x_d, f_3))$. El sistema multilente queda representado mediante la siguiente expresión:

$$l_T = l_1 \text{rect}\left[\frac{x_0 + x_d}{L/3}, \frac{y_0}{L}\right] + l_2 \text{rect}\left[\frac{x_0}{L/3}, \frac{y_0}{L}\right] + l_3 \text{rect}\left[\frac{x_0 - x_d}{L/3}, \frac{y_0}{L}\right], \tag{7}$$

donde los ejes ópticos de las sublentes se han tomado paralelos entre sí. La Fig. 6, muestra la distribución de fase del sistema multilente de ejes paralelos en niveles de gris. El recuadro verde muestra una ampliación local en donde se pone de manifiesto la ausencia de submuestreo.

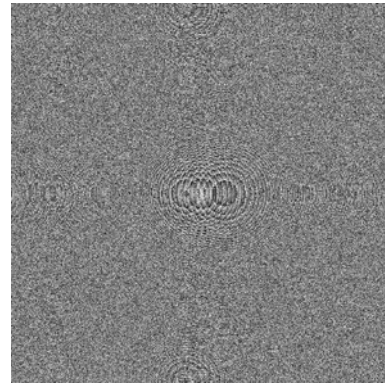


Fig. 5. Distribución de fase del sistema multifocal y multiteje codificada aleatoriamente, con el efecto de un prisma de $\alpha = \pm 0.15^\circ$ sobre las lentes l_1 y l_3 .

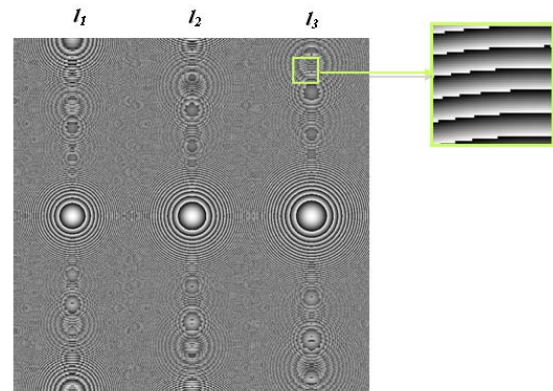


Fig. 6. Distribución de fase del sistema multifocal y multiteje (ejes paralelos) codificado mediante división de apertura.

La Fig. 7 muestra la distribución de fase del sistema anterior añadiendo el efecto de un prisma sobre las lentes l_1 y l_3 . En la Fig. 7(a) se ha sumado la fase lineal generada por un prisma que desvía el haz sobre el eje horizontal un ángulo $\alpha = 0.15^\circ$ en la sublente l_1 y un ángulo $\alpha = -0.15^\circ$ en la sublente l_3 . En la Fig. 7(b) se representa un sistema que produce desviaciones análogas sobre el eje vertical.

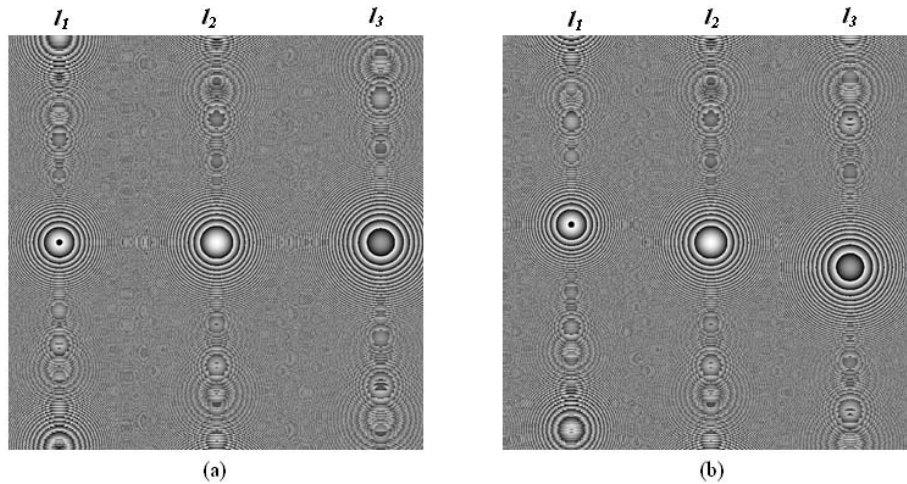


Fig. 7. Distribución de fase del sistema multifocal y multieje por división de la apertura con el efecto producido por un prisma que desvía el haz en las sublentes l_1 y l_3 . (a) Desviación del haz en dirección horizontal equivalente a $\alpha = \pm 0.15^\circ$, (b) desviación del haz en dirección vertical equivalente a $\alpha = \pm 0.15^\circ$.

3.2.4. Multiplexado espacial (M4)

Este método consiste en realizar el producto de la distribución compleja de las tres sublentes, representando en cada píxel de la apertura del modulador la fase resultante de dicha distribución multiplexada:

$$l_T = l_1(x_0 + x_d, f_1) \cdot l_2(x_0, f_2) \cdot l_3(x_0 - x_d, f_3) \cdot \text{rect}\left[\frac{x_0}{L}, \frac{y_0}{L}\right], \quad (8)$$

donde los ejes ópticos de las sublentes se han tomado paralelos entre sí. La Fig. 8 muestra la distribución de fase para la lente multifocal y multieje de ejes paralelos codificada mediante este método.

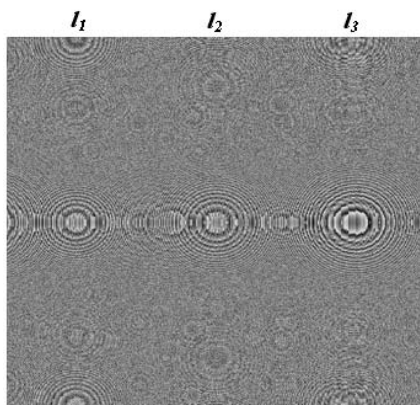


Fig. 8. Distribución de fase de la lente multiplexada y de ejes paralelos.

4. Resultados en los planos imagen

Para obtener las imágenes de objetos extensos producidas por las lentes multifocales se utilizó el carácter extraído del test USAF mostrado en el recuadro de la Fig. 9.

El objeto se encuentra ubicado a 90 cm del SLM donde se presenta la lente programable y es iluminado con una onda plana de $\lambda=633$ nm. Las tres sublentes generadas en el modulador forman la imagen a diferentes distancias en el espacio imagen. Las imágenes son captadas desplazando convenientemente el sensor de una cámara CCD que opera sin objetivo. Las distancias focales utilizadas para las sublentes l_1, l_2, l_3 corresponden a $f_1= 25$ cm , $f_2= 30$ cm y $f_3= 35$ cm, respectivamente. En la tabla 1 se presenta las especificaciones técnicas del modulador utilizado en este trabajo. Anteriormente fue calibrado y caracterizado¹¹ para su uso optimizado. De acuerdo con las características del modulador, cabe señalar que la focal f_1 corresponde a la f_{ref} de la Ec. (6).

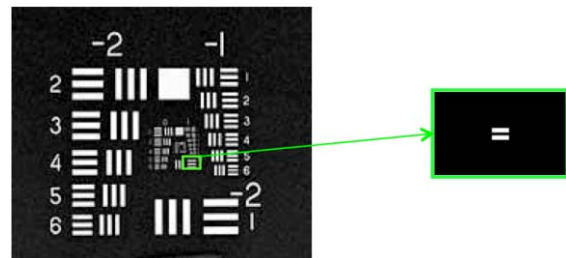


Fig. 9. Test empleado. El recuadro muestra el carácter que ha sido utilizado como objeto en esta aplicación.

Tabla I
Especificaciones técnicas del SLM.

<i>Parámetros</i>	<i>Especificaciones</i>
Marca y modelo	Holoeye HEO (2006)
Configuración del Dispositivo	LCoS
Tamaño útil de pantalla	15,36 x 8,64 mm
Tamaño del píxel	8 μ m
Resolución	1920 (H) x 1080 (V)
Factor de relleno	> 87%
Modulación de fase máxima	2.8π ($\lambda= 633$ nm)
Amplitud acoplada máxima	< 5% ($\lambda= 633$ nm)
Frecuencia	60 Hz
Direccionamiento eléctrico	8 bits vía DVI

Se ha realizado una simulación numérica para cada uno de los casos mencionados en el apartado 3. Además, en los casos de mayor interés, se han obtenido resultados experimentales. Unos y otros se resumen a continuación.

4.1. Configuración coaxial

Presentamos los resultados en el plano imagen al propagar el objeto mostrado en la Fig. 9 sobre la composición multifocal de lentes en la configuración coaxial, tanto para la codificación por filas (M1) como para la codificación aleatoria (M2).

4.1.1. Codificación por filas (M1)

La Fig. 10 muestra los tres planos imagen que forman las sublentes. El plano imagen del recuadro amarillo corresponde a la sublente l_1 ($f_1= 25$ cm), el recuadro azul a la sublente l_2 ($f_2 = 30$ cm) y el recuadro rojo a la sublente l_3 ($f_3 = 35$ cm). Las Figs. 10(a), (c) y (e) representan los resultados obtenidos mediante simulación numérica, y las Figs. 10(b), (d) y (f), las obtenidas experimentalmente.

En este caso, las imágenes de las tres sublentes se superponen debido a la configuración coaxial. Variando el plano de salida se enfoca la imagen correspondiente a una de las sublentes mientras las otras dos permanecen desenfocadas. En esta codificación, se obtiene una repetición vertical regular de la imagen formada por cada sublente. Esto es debido a que la distribución de fase se realizó asignando a cada fila del modulador una sublente diferente, lo cual crea la periodicidad mostrada en los resultados obtenidos mediante

simulación. El mismo resultado se obtuvo experimentalmente, pero en este trabajo solamente se muestra la imagen central ya que las réplicas se encontraban fuera del campo de la CCD. La circunferencia verde en la Fig. 10 representa la réplica central en la imagen capturada experimentalmente.

4.1.2. Codificación Aleatoria

La Fig. 11 muestra las imágenes producidas por la configuración coaxial y codificación aleatoria. Las imágenes de la fila superior muestran los resultados obtenidos mediante simulación y la fila inferior los resultados experimentales. Este método presenta ventajas ya que no genera las réplicas múltiples de las que adolece al método de codificación por filas de la Fig. 10. En cada plano se observa una superposición de tres imágenes coaxiales: una de ellas, enfocada, formada por una de las sublentes y las otras dos, desenfocadas, producidas por las demás sublentes.

4.2. Configuración multieje

Se presentan los resultados en el plano imagen al propagar el test utilizado como objeto (Fig. 9), sobre la composición multifocal de lentes en la configuración multieje para la codificación por filas (M1), aleatoria (M2), división de apertura (M3) y multiplexado espacial (M4).

4.2.1. Codificación por filas (M1)

Realizando la simulación numérica, se ha propagado el objeto de la Fig. 9 sobre la lente codificada por filas en la que se ha sumado una fase lineal a las sublentes l_1 y l_3 (sección 3.2.1). La Fig. 12 muestra las imágenes producidas por esta configuración al añadir un prisma con $\alpha = \pm 0.15^\circ$ en dirección horizontal. El frente de onda a la salida del sistema sufre una descomposición en tres haces orientados en el los ejes $+\alpha, 0, -\alpha$. Por esta razón, las imágenes producidas por las sublentes l_1 y l_3 se separan del eje de la sublente l_2 . El plano imagen de la figura 12(a) corresponde a la sublente l_1 ($f_1 = 25$ cm), 12(b) a la sublente l_2 ($f_2 = 30$ cm) y 12(c) a la sublente l_3 ($f_3 = 35$ cm).

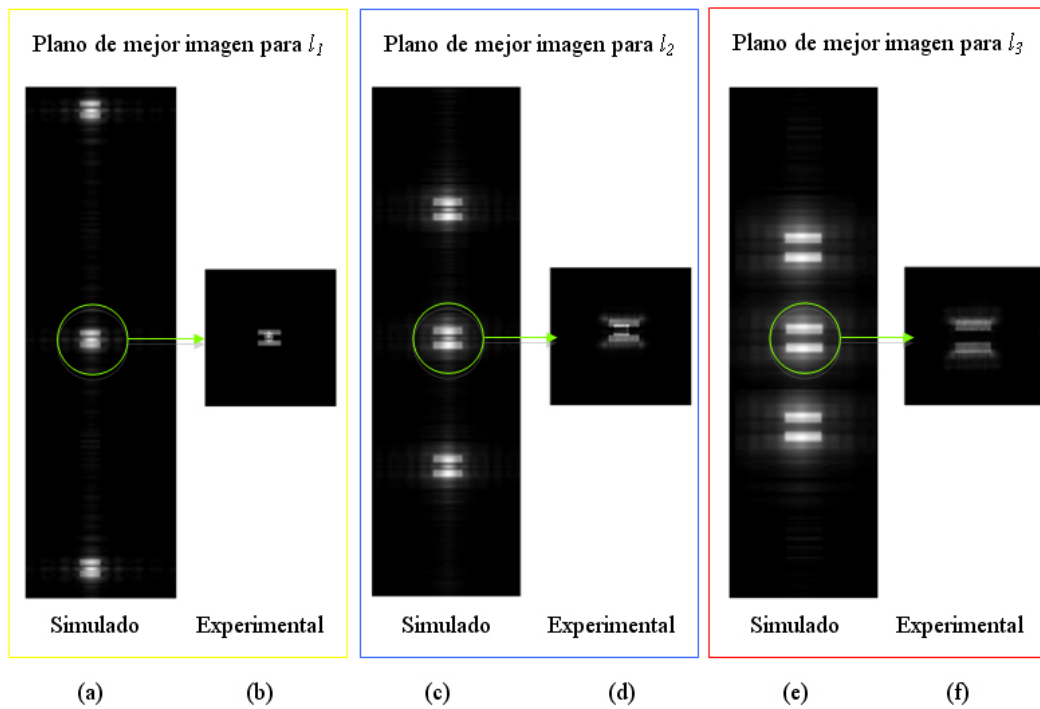


Fig. 10. Configuración coaxial y codificación por filas. Las imágenes (a), (c), (e) representan los planos imágenes simulados y las imágenes (b), (d), y (f) los resultados experimentales. (a)-(b) l_1 ($f_1 = 25$ cm), (c)-(d) l_2 ($f_2 = 30$ cm), (e)-(f) l_3 ($f_3 = 35$ cm).

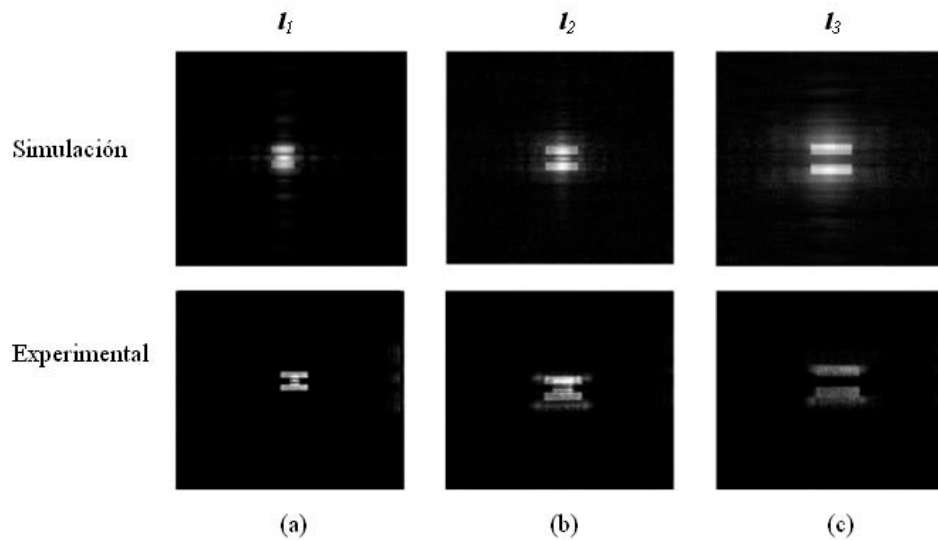


Fig. 11. Configuración coaxial y codificación aleatoria. Planos de mejor imagen correspondientes a: (a) l_1 ($f_1 = 25$ cm), (b) l_2 ($f_2 = 30$ cm), (c) l_3 ($f_3 = 35$ cm).

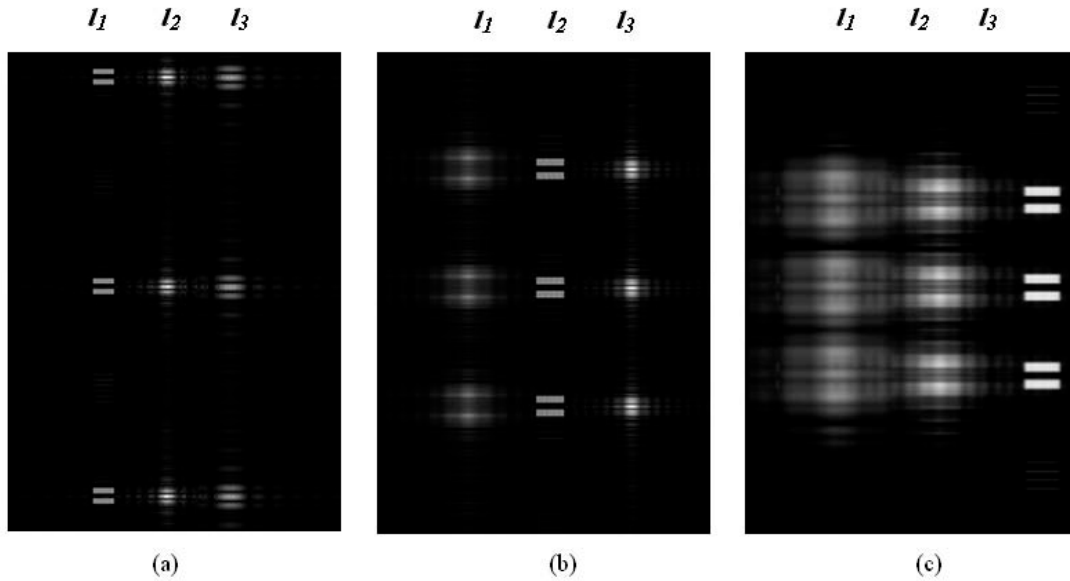


Fig. 12. Configuración multiteje y codificación por filas bajo la acción de un prisma de $\alpha = \pm 0.15^\circ$ sobre las sublentes l_1 y l_3 y en dirección horizontal. (a) l_1 ($f_1 = 25$ cm). (b) l_2 ($f_2 = 30$ cm). (c) l_3 ($f_3 = 35$ cm).

4.2.2. Codificación aleatoria (M2)

Siguiendo con la configuración multiteje mediante la asociación de prismas, repetimos la simulación, pero esta vez utilizando la codificación aleatoria (M2).

La Fig. 13, muestra las imágenes producidas por la codificación aleatoria al añadir un prisma con $\alpha = \pm 0.15^\circ$. El plano imagen correspondiente a la Fig. 13(a) corresponde a la sublente l_1 ($f_1 = 25$ cm), 13(b) a la sublente l_2 ($f_2 = 30$ cm) y 13(c) a la sublente l_3 ($f_3 = 35$ cm).

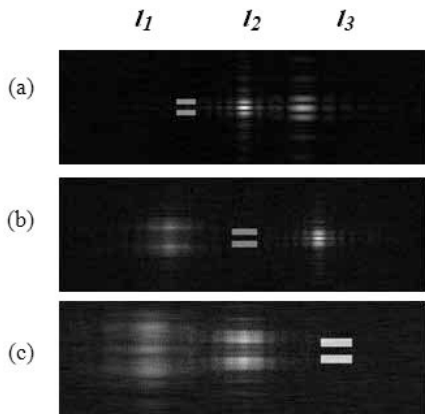


Fig. 13. Lente con configuración multiteje y codificada aleatoriamente con el efecto de un prisma de $\alpha = \pm 0.15^\circ$ sobre las sublentes l_1 y l_3 . Las imágenes representan el plano imagen simulado: (a) l_1 ($f_1 = 25$ cm). (b) l_2 ($f_2 = 30$ cm). (c) l_3 ($f_3 = 35$ cm).

4.2.3. División de la apertura (M3)

Como se mencionó en la sección 3.2.3. en esta configuración se divide la apertura del modulador en tres sectores independientes representando en cada sector una única lente, dando lugar a un sistema multilente. Al propagar el objeto extenso sobre esta multilente se obtienen los tres planos imagen que forman las sublentes mostrados en la Fig. 14. La columna izquierda representa los resultados obtenidos mediante simulación numérica, y la columna derecha los resultados experimentales. Para esta configuración, el plano imagen correspondiente a las figuras 14(a) corresponde a la sublente l_1 ($f_1 = 25$ cm), 14(b) a la sublente l_2 ($f_2 = 30$ cm) y 14(c) a la sublente l_3 ($f_3 = 35$ cm).

En la Fig.15, se muestran las imágenes por esta codificación y obtenidas mediante simulación al añadir un prisma con $\alpha = \pm 0.15^\circ$ y que desvía el haz sobre el eje horizontal en las sublentes l_1 y l_3 . Las líneas amarillas representan la posición de referencia donde se formaba la imagen sin el efecto del prisma añadido, como en la Fig. 14. Se observa el desplazamiento de la imagen de las sublentes l_1 y l_3 producto de la adición del prisma. Análogamente, en la Fig. 16 se muestran las imágenes al añadir un prisma con las condiciones anteriores pero desviando el haz sobre el eje vertical.

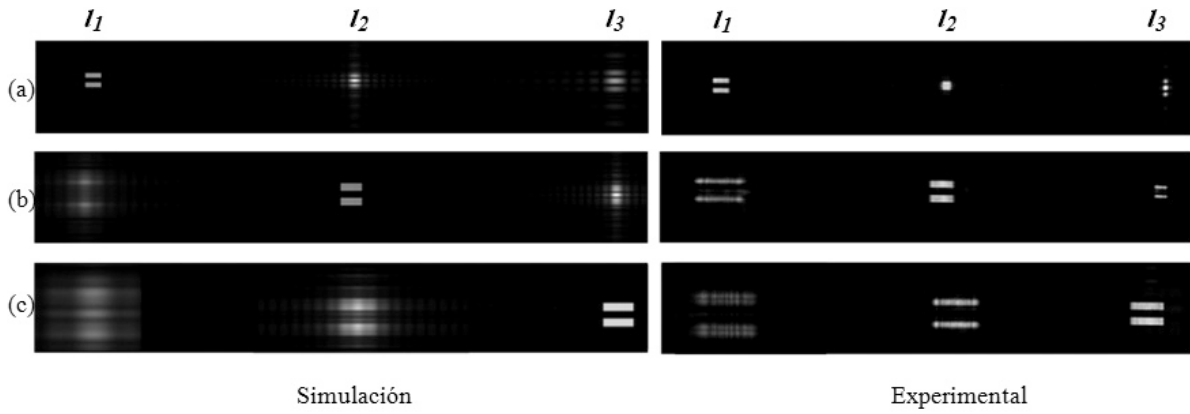


Fig. 14. Sistema multieje, división de la apertura. (a) l_1 ($f_1 = 25$ cm). (b) l_2 ($f_2 = 30$ cm). (c) l_3 ($f_3 = 35$ cm).

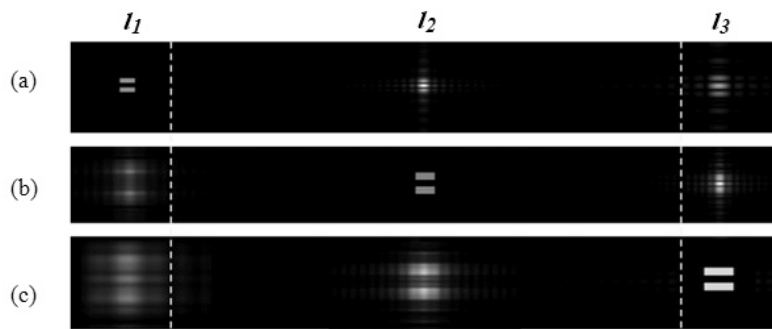


Fig. 15. Sistema multieje, división de la apertura con efecto de un prisma de $\alpha = \pm 0.15^\circ$ en dirección horizontal sobre las sublentes l_1 y l_3 mediante simulación numérica. (a) l_1 ($f_1 = 25$ cm). (b) l_2 ($f_2 = 30$ cm). (c) l_3 ($f_3 = 35$ cm).

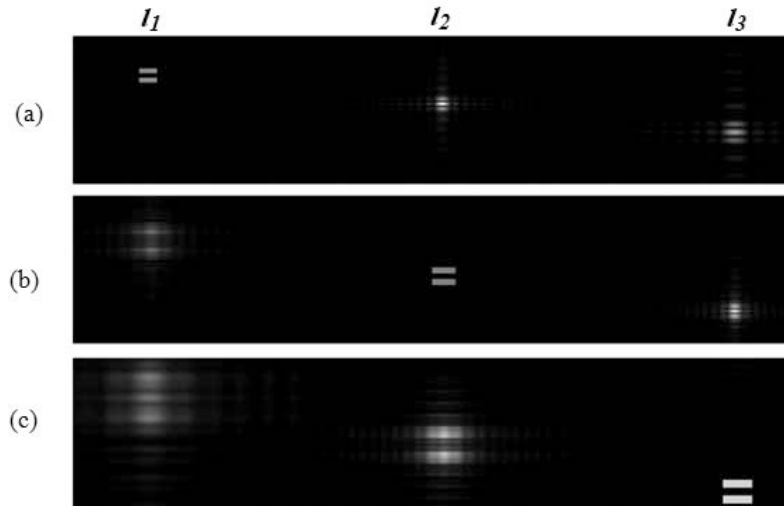


Fig. 16. Sistema multieje, división de la apertura con efecto de un prisma de $\alpha = \pm 0.15^\circ$ en dirección vertical sobre las sublentes l_1 y l_3 mediante simulación numérica. (a) l_1 ($f_1 = 25$ cm). (b) l_2 ($f_2 = 30$ cm). (c) l_3 ($f_3 = 35$ cm).

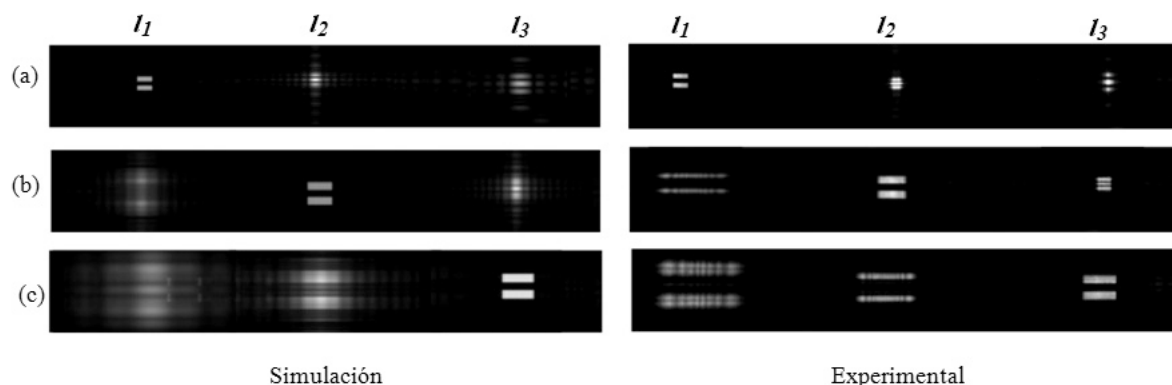


Fig. 17. Lentes multiplexada. (a) Plano imagen correspondiente a la distancia focal igual a 25 cm. (b) Plano imagen correspondiente a la distancia focal igual a 30 cm. (c) Plano imagen correspondiente a la distancia focal igual a 35 cm.

4.2.4. Multiplexada Espacial (M4)

Se realiza el producto de la distribución compleja de las tres lentes, lo que equivale a sumar sus fases, representando en cada píxel de la apertura del modulador la fase resultante de dicha distribución multiplexada. La Fig. 17 muestra los resultados obtenidos mediante simulación numérica (columna izquierda) y los resultados experimentales (columna derecha).

Realizando una comparación entre los perfiles de intensidad experimentales de un elemento en un mismo plano imagen, por ejemplo para la lente de distancia focal de 25 cm, tanto para el sistema multiteje con división de la apertura (primer elemento experimental de la Fig. 14 (a)), como para el sistema de multiplexado espacial (primer elemento experimental de la figura 17(a)), observamos que en el primero como la apertura de cada sublente es menor que en el segundo, es de esperar que el sistema multilente tenga una eficiencia inferior (Fig. 18).

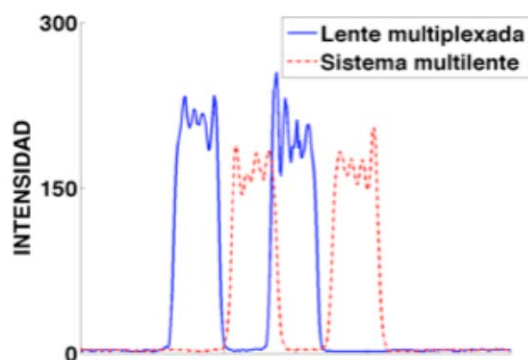


Fig. 18. Perfiles de intensidad calculados para imágenes experimentales correspondiente a la configuración multiteje para el sistema multilente (división de apertura) y la lente multiplexada. Los perfiles se representan desplazados para facilitar su visualización.

5. Conclusiones

Se ha estudiado la generación de un DOE compuesto por la combinación de tres sublentes de focal distinta y con ejes ópticos en configuración coaxial y multiteje (de ejes paralelos, cruzados o que se cortan). Se han analizado cuatro métodos de codificación espacial de la distribución de fase del sistema compuesto.

En general, las aplicaciones de estos métodos y configuraciones son las que corresponden a los dispositivos ópticos difractivos programables, cuyas propiedades pueden variarse dinámicamente y ser controladas por ordenador. La posibilidad de combinar prismas y lentes encuentra aplicación en el campo de las interconexiones ópticas holográficas, los desviadores de haz (*beam steering*), los escáneres ópticos y los interruptores opto-electrónicos. También se pueden aplicar a la obtención de lentes difractivas de focal variable o varifocales, para la extensión de la profundidad de foco.

En la configuración multiteje algunas combinaciones asocian lentes y prismas difractivos de tal manera que al sumar fases lineales con ángulos $\pm\alpha$ a algunas de las sublentes, el frente de onda a la salida del sistema sufre una descomposición en tres haces orientados en los ejes $+\alpha, 0, -\alpha$. De esta manera, es posible convertir un sistema de configuración coaxial a configuración multiteje.

Gracias a la flexibilidad en el diseño de DOEs programables para la generación de sistemas ópticos compuestos, hemos obtenido sistemas de lentes multifocales y ejes distintos, aun compartiendo un mismo plano para la apertura.

Los resultados obtenidos por simulación son coherentes con los efectos considerados al idear el diseño. Los resultados experimentales confirman, a su vez, los obtenidos por simulación.

El método de lente multiplexada (M4) presenta ventajas en eficiencia y calidad respecto al sistema multilente por división de apertura (M3) para las sublentes con ejes ópticos paralelos entre sí. El método de codificación espacial aleatoria (M2) presenta ventajas respecto al de codificación por filas (M1), ya que no genera las replicas múltiples de las que adolece este último método.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración del Dr. J. Otón y el apoyo económico del Ministerio de Ciencia e Innovación así como de los fondos FEDER (proyectos DPI2006-05479 y DPI2009-08879).