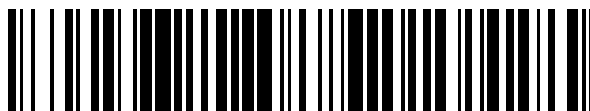


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 387 119**

51 Int. Cl.:  
**G02B 15/14** (2006.01)  
**G02B 27/58** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **07736240 .8**  
96 Fecha de presentación: **22.04.2007**  
97 Número de publicación de la solicitud: **2008143**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **31.12.2008**

54 Título: **Sistema y procedimiento para generar imagenes con profundidad de foco extendida y luz incoherente**

30 Prioridad:  
**20.04.2006 US 793226 P**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**14.09.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**14.09.2012**

73 Titular/es:  
**XCEED IMAGING LTD.  
P.O.B. 4201, 1 HERMON STREET  
ROSH HAAYIN 48560, IL**

72 Inventor/es:  
**ZALEVSKY, Zeev**

74 Agente/Representante:  
**Carpintero López, Mario**

ES 2 387 119 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Sistema y procedimiento para generar imágenes con profundidad de foco extendida y luz incoherente

### Campo de la invención

La presente invención se refiere a la generación óptica de imágenes con profundidad de foco extendida.

### 5 Lista de referencias

1. Z. Zalevsky D. Mendlovic y A. W. Lohmann, Progress in optics, Vol. XL, Ch. 4 (1999).
2. Z. Zalevsky y D. Mendlovic "Optical Super Resolution", Springer (2002).
3. W. Lukosz, JOSA 56, 1463 (1966).
4. A. I. Kartashev, Opt. Spectry. 9, 204 (1960).
- 10 5. W. Gartner y A. W. Lohmann, Z. Physik, 174, 18 (1963).
6. J. W Goodman, Introduction to Fourier Optics (McGraw-Hill, Nueva York 1996) págs.126-151.

### Antecedentes

15 La generación de imágenes con una gran profundidad de foco es deseable en muchas áreas, incluyendo la fotografía, películas y varias aplicaciones de detección. Sin embargo, la región de posiciones longitudinales en la que se puede generar la imagen definida de un objeto está limitada y, en general, cuanto más grande sea la apertura del módulo de generación de imagen, más pequeña es la profundidad de foco y cuanto más pequeña sea la apertura del módulo de generación de imagen, mayor será la profundidad de foco. Por ejemplo, una lente tiene una profundidad de foco limitada, pero en el caso extremo de pequeña abertura se comporta como una cámara estenopeica y por lo tanto proporciona prácticamente una profundidad de foco muy grande. Sin embargo, la elevada

20 profundidad de foco de una cámara estenopeica se realiza al precio de una resolución lateral baja y una eficiencia energética baja. En particular, la función del punto de difusión (PSF) del agujero diminuto es proporcional a  $\lambda D/d_i$  en

la que  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz,  $D$  es la apertura del agujero diminuto y  $d_i$  es una distancia entre la apertura

y una superficie de detección de la luz; tal PSF da como resultado una profundidad de foco proporcional a  $\left(\lambda D/d_i\right)^2$ ,

25 una resolución proporcional a  $\left(\lambda D/d_i\right)^{-1}$  y una eficiencia energética proporcional a  $D^2$ . Por ello, un agujero diminuto, en tanto que tiene una profundidad de foco muy grande debido a su muy pequeña apertura  $D$ , tiene al mismo tiempo una resolución baja (PSF grande) y una baja eficiencia energética.

El documento de la técnica anterior US 3 700 895 desvela un sistema de generación de imagen que comprende una unidad de apertura provista con una pluralidad de agujeros diminutos dispuestos en un patrón irregular. Tal sistema proporciona una eficiencia energética mejorada.

### 30 Descripción general

Existe necesidad en la técnica de una tecnología de generación de imágenes, que permita la generación de imágenes con una profundidad de foco relativamente grande, alta resolución de la imagen y elevada eficiencia energética de la generación de imagen. Una técnica novedosa presentada en el presente documento, construida por los inventores, tiene adaptaciones (versiones y realizaciones) útiles para tal generación de imagen.

35 La idea principal de la invención consiste en la utilización de al menos dos réplicas del patrón de difusión del objeto de modo que estas réplicas sean sustancialmente la misma pero se creen en diferentes localizaciones dentro del plano de apertura. Se debería entender que sustancialmente las mismas réplicas significa la misma distribución de fase del campo óptico generado por el patrón de difusión, este campo encaja consigo mismo (efecto del pico de autocorrelación). La cantidad de desviación entre las réplicas dentro del plano de apertura corresponde a cierta frecuencia espacial en un plano de imagen (en el detector). Como resultado, se proporciona una gran profundidad de foco para esta frecuencia espacial.

40 Los inventores han encontrado que, para una generación de imagen útil, se puede combinar una gran profundidad de foco, tal como la de un agujero diminuto, con una imagen de súper definición. En el campo de la súper resolución (es decir en el campo de la imagen súper definida), los grados de libertad espacial se recuperan sacrificando otros grados de libertad, tales como la polarización, longitudes de onda y tiempo. Por ejemplo, la gran profundidad de foco se relaciona en alguna forma con la súper resolución longitudinal.

45 Con respecto a la gran profundidad de foco, se puede obtener no solamente mediante la apertura en la forma de un agujero diminuto. De acuerdo con algunas realizaciones de la invención, se puede obtener también mediante la apertura con una matriz de agujeros diminutos distribuidos aleatoriamente; o con un difusor o tanto con una matriz como un difusor, así como mediante otras formas.

50

Una técnica de gran profundidad de foco en base al uso de una apertura aleatoria, también denominada placa aleatoria, puede ser de alguna forma ventajosa sobre la tecnología basada en lentes, dado que, en el caso extremo anteriormente mencionado de una pequeña apertura, cada una de las lentes no produce un efecto de fase cuadrática sustancial y por lo tanto puede ser redundante.

- 5 En consecuencia, en algunas adaptaciones, la técnica inventada para una gran profundidad de foco en una generación de imagen súper definida no se basa en lentes (es decir es sin lentes), sino que se basa más bien en una placa aleatoria colocada en el plano de apertura y desprovista de potencia óptica. La eficiencia energética de la técnica puede ser elevada; es decir mucho mayor que la de un único agujero diminuto. La técnica usa la generación de imagen con una función de transferencia de modulación (MTF) instantánea en la forma de una secuencia de picos, cuyas frecuencias espaciales se pueden cambiar.

En las realizaciones preferidas de la invención, el resultante de la súper definición se obtiene mediante escaneado, en algunas realizaciones escaneado mecánico; del plano de apertura con la placa aleatoria.

- 15 Se puede seleccionar la técnica de barrido de modo que se presenten las frecuencias espaciales en la imagen resultante y no se necesite un procesamiento digital. Volviendo a la placa aleatoria en el plano de apertura, se puede componer de una placa opaca con ventanas ópticas (por ejemplo agujeros) distribuidas aleatoriamente que crean una distribución de la transmisión / bloqueo aleatorio o se puede componer de una placa transparente con áreas de difusión distribuidas aleatoriamente que crean una distribución de fase aleatoria (es decir a partir de un *difusor*) o se puede componer tanto de un patrón de agujeros diminutos aleatorios como de un difusor. Se debería entender que el término *aleatorio* se usa aquí en conexión con la técnica de los inventores: se usa para referirse a patrones que producen una función de autocorrelación (de picos) característica, como será claro a partir de lo que sigue. La placa aleatoria presenta por sí misma una clase especial de filtro espacial óptico. En realizaciones preferidas, la distribución aleatoria es tal que al menos la mitad de la energía pasa a través de ella. Para una distribución espacial totalmente aleatoria, esta autocorrelación tiene aún un pico "función delta" como en el caso de un único agujero diminuto. Por ello, los inventores han hallado una forma de obtener concurrentemente una eficiencia energética relativamente elevada (de la mitad en lugar de casi cero en el caso de la cámara estenopeica) y gran profundidad de foco. Sin embargo, sin escaneado, la resolución es aun baja, debido al MTF, que es el valor absoluto de la OTF (es decir la función de transferencia óptica – auto correlación de la CTF, o función de transferencia coherente), de la placa consiste en un solo pico de función delta elevada y unos pocos picos de función delta más baja. Por lo tanto, los inventores han incluido una acción para escanear el plano de apertura con la placa aleatoria e integrar en el tiempo la intensidad en el detector dentro de su técnica. El escaneado conduce a la generación de imágenes con súper definición y permite la obtención concurrentemente de una profundidad de foco extendida, una resolución espacial elevada y una generación de imagen energéticamente eficiente. Se debería reiterar, que la súper resolución se puede obtener en una forma totalmente óptica, y que no se requiere un procesamiento de imagen. Sin embargo, en algunas realizaciones se puede obtener la súper resolución con el uso de procesamiento de imagen. La súper resolución aplicada en el enfoque descrito se puede clasificar como multiplexado en el tiempo.

- 40 Por ello, de acuerdo con un aspecto amplio de la presente invención, se proporciona una disposición óptica para su uso en la generación de imágenes con una gran profundidad de foco, comprendiendo dicha disposición óptica una unidad de apertura y una unidad de replicación configuradas para proporcionar una pluralidad de réplicas de un campo óptico de entrada de modo que dichas réplicas incluyan al menos dos réplicas que sean de sustancialmente la misma distribución de fase y se creen en diferentes regiones del plano de la unidad de apertura.

- 45 En realizaciones preferidas de la invención, la unidad de replicación comprende al menos una primera y una segunda unidades de simetrizado configuradas para proporcionar las al menos dos réplicas del campo óptico de entrada entre las que simetriza secuencialmente el campo óptico de entrada proyectado sobre dicha unidad de apertura con respecto al primer y al segundo centro de simetría, respectivamente. La primera unidad de simetrizado se puede configurar para simetrizar una parte de un patrón de difusión del campo óptico de entrada pasado a través de dicha unidad de apertura, mientras que la segunda unidad de simetrizado se configura para simetrizar una salida de la primera unidad de simetrizado.

- 50 En algunas realizaciones de la invención, la unidad de apertura y la unidad de replicación se configuran de modo que al menos una de las réplicas se pueda desplazar con respecto a la otra. Esto se puede conseguir usando un escáner, configurado y operativo para proporcionar tal desplazamiento proporcionando un desplazamiento relativo de al menos una de entre la unidad de apertura y la primera unidad de simetrizado con respecto a la segunda unidad de simetrizado.

La unidad de replicación se puede configurar con superficies reflectoras (por ejemplo espejos), o puede incluir prismas en esquina, SLM, fibras ópticas.

- 55 En algunas realizaciones de la invención, las superficies reflectoras se forman mediante al menos una primera y una segunda unidades reflectoras situadas en una relación de separación a lo largo de un eje óptico de propagación de la luz a través de la disposición óptica hacia un plano de imagen. Cada una de la primera y segunda unidades reflectoras puede incluir dos reflectores que definen superficies reflectoras mutuamente perpendiculares de modo que las superficies reflectoras en la primera unidad reflectora son sustancialmente paralelas a las superficies

reflectoras respectivas de la segunda unidad reflectora.

Como se ha indicado anteriormente, de acuerdo con la invención, la unidad de apertura comprende una placa aleatoria.

La disposición óptica puede incluir o usarse con una matriz de píxeles de detección en un plano de imagen.

5 De acuerdo con otro amplio aspecto de la invención, se proporciona un procedimiento para su uso en la generación de imagen para proporcionar una imagen con una gran profundidad de foco, comprendiendo el procedimiento el paso de un campo óptico de entrada de la imagen a ser creada a través de una placa de apertura, y procesando ópticamente el campo óptico pasado a través de la placa de apertura para producir una pluralidad de réplicas de dicho campo óptico de modo que dichas réplicas incluyan al menos dos réplicas que tengan sustancialmente la misma distribución de fase y se creen en diferentes regiones del plano de apertura.

### **Breve descripción de los dibujos**

15 Para clarificar adicionalmente lo anterior y otras ventajas y características de la presente invención y para mostrar adicionalmente como se puede llevar a cabo en la práctica, se producirá una descripción adicional, a veces más particular, de la invención y características de la invención en la descripción detallada a continuación, a veces con referencia a los dibujos adjuntos. Se apreciará que estos dibujos, cuando representan sólo realizaciones particulares de la invención, no se han de considerar como limitativos de su alcance. Por ello, la invención continuará siendo descrita y explicada con detalle y especificidad adicional por medio del uso de los dibujos adjuntos en los que:

20 las **Figs. 1A y 1B** muestran vistas laterales y posteriores, respectivamente, de un ejemplo del dispositivo de la presente invención; la **Fig. 1C** muestra un efecto de replicación de espejos situados cerca del plano de apertura; la **Fig. 1D** ilustra un mecanismo de acuerdo con el que un dispositivo estático de la invención consigue una elevada Función de Transferencia Óptica para ciertas frecuencias espaciales; las **Figs. 2A-2D** ilustran las Funciones de Transferencia Óptica conseguida mediante un dispositivo de la invención para diversos grados de desenfoque del objeto;

25 las **Figs. 3A-3D, 4A-4D y 5A-5D** muestran imágenes simuladas para varios objetos, obtenidas con el dispositivo inventado (Figs. "A", "C") y sin él (Figs. "B", "D"), para objetos situados fuera de foco (Figs. "A", "B") y en el foco (Figs. "C", "D");

la **Fig. 6** muestra un gráfico de dependencia de un ancho de la función de difusión del punto para el dispositivo inventado sobre la cantidad de desenfoque de la fuente del punto, el ancho se define como tres desviaciones estándar de la función de difusión del punto

### **Descripción detallada de realizaciones de ejemplo**

30 Con referencia a las **Figs. 1A y 1B**, se encuentra ilustrado esquemáticamente un ejemplo de un dispositivo **100** configurado y operativo de acuerdo con la invención. En la **Fig. 1A** se muestra una vista lateral del dispositivo **100**. El dispositivo incluye una unidad de apertura **10**, por ejemplo incluye una placa de apertura aleatoria **12** dentro de un obturador **14** e incluye una unidad de replicación, que en el presente ejemplo no limitativo se forma mediante una primera unidad óptica de simetrizado **16** y una segunda unidad óptica de simetrizado **26**.

35 En general, la unidad de replicación se configura para producir una pluralidad de réplicas de un campo óptico de entrada, incluyendo al menos dos réplicas de sustancialmente la misma distribución de fase creada en diferentes regiones del plano de apertura. En el presente ejemplo, este efecto se consigue usando dos unidades de simetrizado. También, en el ejemplo presente, las unidades de simetrizado se forman mediante superficies reflectoras. Se debería entender, sin embargo, que la invención no está limitada a este ejemplo específico y se pueden usar otras unidades de replicación, tal como las que incluyen prismas en esquina, matriz de fibras ópticas o moduladores de luz espaciales (SLM).

40 La primera unidad de simetrizado **16** incluye espejos **16A** y **16B**, orientados ortogonalmente con la placa aleatoria y entre sí y paralelos a un eje óptico **OA** del dispositivo (es decir un eje de propagación de la luz desde el plano de apertura hacia un plano de imagen en el que se sitúa el detector). Cada uno de los espejos puede ser opaco o parcialmente transparente, por ejemplo semitransparente. La segunda unidad de simetrizado **26** incluye dos espejos **26A** y **26B**, orientados ortogonalmente entre sí; una intersección de sus planos es paralela al eje óptico **OA** o coincide con él. De nuevo, cada uno de los espejos puede ser opaco o parcialmente transparente, por ejemplo semitransparente. Las unidades **16** y **26** se alinean relativamente entre sí; los espejos **16A** y **26A** así como los espejos **16B** y **26B**, son paralelos. El dispositivo **100** puede incluir también un detector de luz **30**, por ejemplo una matriz de píxeles de detección, situada en un plano de imagen **IP** del dispositivo. El plano de imagen está relativamente lejos, comparado con el tamaño axial de los espejos, desde el plano de apertura y los espejos.

45 Opcionalmente, el dispositivo **100** incluye un escáner **30**, configurado y operativo para desplazar efectivamente un cabezal de escaneado, incluyendo la apertura aleatoria **10** y la primera unidad de simetrizado **16**, en el plano de apertura. El escáner se puede programar (por ejemplo programar previamente) para un desplazamiento del cabezal de escaneado a lo largo de un recorrido deseado y tiempo planificado. El escáner puede ser mecánico, por ejemplo del tipo de pasos, o electrónico, proporcionando un efecto equivalente al del escáner mecánico, pero sin

desplazamiento mecánico de la apertura.

En la **Fig. 1B** se muestra una vista posterior del plano de apertura del dispositivo **100** y un efecto del dispositivo. La placa aleatoria **12** está dentro del cuadrante izquierdo inferior definido por los espejos **16A** y **16B** y dentro del cuadrante derecho superior definido por los espejos **26A** y **26B**. La placa aleatoria pasa o difracta la luz desde un plano de objeto (**OP** en la Fig. 1A) hacia el interior del dispositivo: hacia la primera unidad de simetrizado **16**, la segunda unidad de simetrizado **26** y el plano de imagen **IP**. La longitud axial de los espejos es relativamente pequeña en comparación con la longitud global del dispositivo.

Cuando el dispositivo **100** se usa para la generación de imagen de un objeto, el plano de apertura (el plano en el que se coloca el elemento de placa aleatoria) se ilumina por el patrón de difusión de fase **C**, ilustrado en la Fig. 1B por líneas concéntricas negras y grises, indicando la distribución de fase del patrón de difusión (solamente se muestra la parte del patrón de difusión que está dentro de la placa aleatoria **12**). El patrón de difusión tiene una distribución de fase cuadrática y se puede cuantificar por la cantidad de desenfoque [6].

La primera unidad de simetrizado **16** añade de modo efectivo tres réplicas **R<sub>1</sub>-R<sub>3</sub>** del patrón de difusión. Las réplicas se deben o bien a la luz reflejada desde los espejos o bien a la luz que pasa a través de los espejos (esto último es en el caso de espejos parcialmente transparentes y depende de la proyección de un punto de vista sobre el plano de apertura). Por ejemplo, una fotografía que ilustra la creación de cuatro réplicas de la tapa de un rotulador se muestra en la **Fig. 1C**.

Volviendo a la **Fig. 1B**, como resultado de la replicación mediante la unidad **16**, se genera el campo óptico que es proporcional a  $ag(x',y') + bg(-x',y') + cg(x',-y') + dg(-x',-y')$ , en la que {a, b, c, d} son coeficientes de reflexión de campo de los espejos **16A** y **16B**, y  $g(x',y')$  es el producto del campo de onda del patrón de difusión con la función de transmisión del campo de la placa aleatoria. Los ejes de coordenadas  $(-x',-y')$  tienen un origen (que es  $(x_0,y_0)$  en el sistema de coordenadas  $(x,y)$  global) en la esquina superior derecha de la placa aleatoria **12** y se puede mover con la placa aleatoria. Adicionalmente, se forma un patrón de difusión simetrizado **SC** en el cuadrante superior derecho definido por la segunda unidad de simetrizado **26** que incluye los espejos **26A** y **26B**. Por ello, de modo similar a la primera unidad de simetrizado **16**, la segunda unidad de simetrizado **26** añade al plano de apertura tres réplicas **SR<sub>1</sub>-SR<sub>3</sub>** del patrón de difusión simetrizado **SC** (el plano de imagen es remoto y el tamaño axial de las unidades de simetrizado **16** y **26** no es sustancial).

En la **Fig. 1D** se encuentra ilustrado un mecanismo de acuerdo con el que se forma la MTF (de picos) característica. La MTF y la OTF dependen de la autocorrelación de la distribución del campo en el plano de apertura. De hecho, el campo total en el plano de apertura se transforma mediante Fourier cuando la luz alcanza el plano del detector y su intensidad es capturada por el detector. A partir de las propiedades de la transformada de Fourier, la operación del valor cuadrado absoluto a través de la función de difusión del punto (PSF) del campo obtenida en el plano del detector es equivalente a la operación de autocorrelación realizada a través de Fourier de los campos en el plano de apertura. Por ello, se necesita autocorrelacionar el campo eléctrico en el plano de apertura.

Se puede ver que el campo **F**, que consiste en el patrón de difusión simetrizado **SC** y las tres réplicas **SR<sub>1</sub>-SR<sub>3</sub>**, sustancialmente sólo se solapan con una réplica **F'** de este campo, que consiste en el patrón de difusión simetrizado **SC'** y tres réplicas **SR'<sub>1</sub>-SR'<sub>3</sub>**, cuando el campo y la réplica se desplazan en una distancia específica relativamente entre sí. Por ejemplo, en la **Fig. 1D**, la réplica **SC'** casi coincide con la réplica **SR<sub>2</sub>**. Se ve que los distribuidores de fase entre estas réplicas están altamente correlacionados, debido a que las líneas negras y grises dentro de las réplicas están orientadas de modo similar.

Un campo eléctrico  $E$ , generado por el patrón de difusión difractado de la placa aleatoria iluminada con el patrón de difusión, depende no solamente de la distribución de fase del patrón de difusión, que debido al desenfoque es proporcional a  $\exp[iW_m(x^2 + y^2)]$ , siendo  $W_m$  la cantidad de desenfoque, siendo  $(x,y)$  un sistema de coordenadas centrado en el eje óptico **OA**, sino que también depende de la función de transmisión del campo  $m$  de la apertura. Por ello podemos escribir (las deducciones son exactas hasta una constante):

$$\begin{aligned}
 E(x', y') = & a \cdot m(x', y') \cdot \exp(iW_m((x'+x_0)^2 + (y'+y_0)^2)) + \\
 & + b \cdot m(-x', y') \cdot \exp(iW_m((-x'+x_0)^2 + (y'+y_0)^2)) + \\
 & + c \cdot m(x', -y') \cdot \exp(iW_m((x'+x_0)^2 + (-y'+y_0)^2)) + \\
 & + D \cdot m(-x', -y') \cdot \exp(iW_m((-x'+x_0)^2 + (-y'+y_0)^2))
 \end{aligned} \tag{1}$$

La placa aleatoria es una función de transmisión del campo aleatoria, y  $m(x',y')$  es su función de transmisión de campo. Como se ha explicado anteriormente, la disposición en espejo se obtiene debido a que los espejos **16** parcialmente transparentes son perpendiculares a la placa aleatoria.

Considerando el efecto de réplica de los espejos (que tienen coeficientes especulares de campo {A, B, C, D}) **26A** y **26B**, el resultado total se puede expresar como:

$$E_{tot}(x, y) = A \cdot E(x, y) + B \cdot E(-x, y) + C \cdot E(-x, -y) + D \cdot E(x, -y) \quad (2)$$

Esta función de transmisión  $m(x', y')$  se selecciona de modo que el término principal en su enfoque de autocorrelación es una función delta:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} m(x', y') m^*(x'-x'', y'-y'') dx' dy' = T_m \cdot \delta(x'', y'') \quad (3)$$

5 en la que  $T_m$  se define como:

$$T_m = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} m(x', y') m^*(x'-x'', y'-y'') dx' dy' \quad (4)$$

10 Prácticamente, las funciones de transmisión de campo deseadas (es decir cuyas funciones de autocorrelación se aproximan a la función delta) se pueden proporcionar mediante, por ejemplo, varias placas aleatorias. Los inventores han considerado que una función de transmisión de campo cuya autocorrelación tiene un pico con una energía entre el 50% y el 60%, o entre el 60% y el 70%, o entre el 70% y el 80%, o entre el 80% y el 90%, o entre el 90% y el 100% de la energía transmitida total, es preferido para su uso en la invención.

Cuando se calcula la OTF, se autocorrelaciona el campo total:

$$OTF(x'', y'') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_{tot}(x, y) E_{tot}^*(x-x'', y-y'') dx dy \quad (5)$$

por ello, el resultado global, obtenido con el uso de (2) en la expresión de auto correlación (5), es:

$$\begin{aligned} 15 \quad OTF(x'', y'') &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_{tot}(x, y) E_{tot}^*(x-x'', y-y'') dx dy \\ &= coef(0,0) \delta(x'', y'') + \\ &+ coef(1,0) \delta(x''-x_0, y'') + coef(-1,0) \delta(x''+x_0, y''-y_0) + \\ &+ coef(0,1) \delta(x'', y''-y_0) + coef(0,-1) \delta(x'', y''+y_0) + \\ &+ coef(1,1) \delta(x''-x_0, y''-y_0) + coef(-1,-1) \delta(x''+x_0, y''+y_0) + \\ 20 \quad &+ coef(1,-1) \delta(x''-x_0, y''+y_0) + coef(-1,1) \delta(x''+x_0, y''-y_0) \end{aligned} \quad (6)$$

En las que los coeficientes calculados con funciones delta son:

$$\begin{aligned} coef(0,0) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_2 E_0^* = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A \cdot C \cdot [ cb |m(x', -y')|^2 + da |m(-x', -y')|^2 + ad |m(x', y')|^2 + bc |m(-x', y')|^2 ] = \\ &= T_m [(AB + CD) (ab + cd)] \\ 25 \quad coef(1,0) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0 E_1^* + E_3 E_2^* = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A \cdot B \cdot [ cd |m(x', -y')|^2 + dc |m(-x', -y')|^2 + ab |m(x', y')|^2 + ba |m(-x', y')|^2 ] + \\ &+ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D \cdot C \cdot [ ab |m(x', -y')|^2 + ba |m(-x', -y')|^2 + cd |m(x', y')|^2 + dc |m(-x', y')|^2 ] = \\ &= T_m [(AB + CD) (ab + cd)] \\ coef(0,1) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_1 E_2^* + E_0 E_3^* = \end{aligned}$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B \bullet C \bullet [ db|m(x',-y')|^2 + ca|m(-x',-y')|^2 + bd|m(x',y')|^2 + ac|m(-x',y')|^2 ] +$$

$$+ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A \bullet D \bullet [ ca|m(x',-y')|^2 + db|m(-x',-y')|^2 + ac|m(x',y')|^2 + bd|m(-x',y')|^2 ] =$$

$$= T_m [(BC + AD) (ac + bd)]$$

$$coef(1,1) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0 E_2^* =$$

$$5 \quad = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A \bullet C \bullet [ cb|m(x',-y')|^2 + da|m(-x',-y')|^2 + ad|m(x',y')|^2 + bc|m(-x',y')|^2 ] =$$

$$= T_m [AC (bc + ad)]$$

$$coef(-1,-1) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_1 E_3^* =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B \bullet D \bullet [ da|m(x',-y')|^2 + cb|m(-x',-y')|^2 + bc|m(x',y')|^2 + ad|m(-x',y')|^2 ] =$$

$$= T_m [BD (ad + bc)]$$

$$10 \quad coef(1,-1) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_1^* E_3 = coef(-1,1)$$

$$coef(-1,0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0^* E_1 + E_3^* E_2 = coef(1,0)$$

$$coef(0,-1) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_1^* E_2 + E_0^* E_3 = coef(0,1) \quad (7)$$

$$coef(-1,-1) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0^* E_2 = coef(1,1)$$

Los coeficientes de espejo deben cumplir con la regla de conservación de la energía:

$$15 \quad |A|^2 \cdot [|a|^2 + |b|^2 + |c|^2 + |d|^2] +$$

$$|B|^2 \cdot [|a|^2 + |b|^2 + |c|^2 + |d|^2] +$$

$$|C|^2 \cdot [|a|^2 + |b|^2 + |c|^2 + |d|^2] +$$

$$|D|^2 \cdot [|a|^2 + |b|^2 + |c|^2 + |d|^2] = [|A|^2 + |B|^2 + |C|^2 + |D|^2] \cdot [|a|^2 + |b|^2 + |c|^2 + |d|^2] = 1 \quad (8)$$

20 Esta integral se puede presentar como un producto de la autocorrelación del campo del patrón de difusión y la autocorrelación de la función de transmisión del campo  $m$  de la apertura en varios casos. En particular, la transparencia  $m$  se puede tomar de la integral cuando es aleatoria. También son conocidos otros casos en que la fórmula (5) se puede presentar como un producto de dos autocorrelaciones. En las **Figs. 2A-2D** se muestran ejemplos de una OTF obtenida por los inventores como resultado de (5) aplicada para su dispositivo. Los ejemplos son diferentes en el grado de desenfoque: mientras que para la Fig. 2A este grado es cero, para las Figs. 2C-2D es mayor. El factor de desenfoque es tan elevado como 50 en la Fig. 2D. En cualquier caso, todas las Figs. 2A-2D tienen picos elevados en las frecuencias espaciales de aproximadamente -0,4 a 0,4. Esta magnitud de la frecuencia espacial corresponde al desplazamiento relativo entre los ejes ópticos de la primera y la segunda unidades de simetrizado. Tal pico elevado de la MTF para la magnitud de la frecuencia espacial seleccionada, y tal intervalo amplio del factor de desenfoque para el que existen estos picos se corresponde con la elevada eficiencia energética y gran profundidad de foco del dispositivo de la invención.

30 Adicionalmente, el dispositivo de la invención se puede usar para conseguir también la súper resolución, si el detector se usa para integrar la intensidad de luz mientras que se escanea el patrón de difusión. Como se ha

explicado anteriormente, moviendo la placa aleatoria a varias posiciones  $(x_0, y_0)$ , se crea una MTF que contiene picos en las frecuencias espaciales que corresponden a esas posiciones. La correspondencia a través de la transformada de Fourier significa: las posiciones en el plano de apertura son proporcionales a las frecuencias espaciales en el plano del detector. Por ello, se pueden obtener todas las varias frecuencias espaciales. Cuanto mayor sea el desplazamiento máximo desde los pares  $(x_0, y_0)$ , mayor será el factor de súper resolución obtenido. Este factor no tiene límite, en el sentido de que se puede transmitir una elevada frecuencia espacial a través de plano aleatorio diseñado apropiadamente y recuperado mediante escaneado.

Se ha simulado por los inventores el funcionamiento de un dispositivo de la invención. Con referencia las **Figs. 3-5**, se presentan los resultados de la simulación. El factor de desenfoque se mide como la fase máxima obtenida en los límites de la apertura. Se determina como:

$$\Psi = \frac{W_m D^2}{4} = \frac{\pi D^2}{4\lambda} \left( \frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_o} - \frac{1}{F} \right) \quad (9)$$

En la que  $d_o$  y  $d_i$  son las distancias desde el objeto y la imagen al plano de apertura, respectivamente y  $F$  es una longitud focal efectiva del dispositivo de imagen a la que se desea ajustar el rendimiento del dispositivo del inventor.

En las **Figs. 3A-3D** se muestra un conjunto de reconstrucciones de una imagen de texto (es decir una imagen que contiene escritura). En la **Fig. 3A** se representa el resultado obtenido por el dispositivo del inventor para un desenfoque  $\Psi=10$ . En la **Fig. 3B** se muestra la imagen obtenida por el mismo desenfoque  $\Psi$  obtenida sin la aplicación de la técnica del inventor. Las imágenes, mostradas en las **Figs. 3C y 3D**, se obtienen para la imagen de texto situada en el foco ( $\Psi=0$ ), usando y sin usar la técnica del inventor, respectivamente. Las **Figs. 4A-4D y 5A-5D** corresponden a las de las Figs. 3A-3D, pero para una imagen generada de un objeto siendo un objetivo de resolución o una cara de un bebé, respectivamente. Se debería indicar que los resultados presentados en las Figs. 3-5 son totalmente ópticos, debido a que se simuló el escaneado para recoger todas las frecuencias espaciales detectadas por el detector con los coeficientes apropiados. No se aplicó ningún procesamiento de imagen para mejorar adicionalmente las imágenes en las Figs. 3-5.

La **Fig. 6** presenta el ancho de las tres desviaciones estándar de una función de difusión del punto de intensidad obtenida en el plano de imagen respecto al desenfoque  $\Psi$ . Se ve que, incluso para un desenfoque muy fuerte de  $\Psi=25$ , la desviación estándar permanece solamente en 1 píxel y la función de difusión del punto espacial es por lo tanto relativamente estrecha, es decir no hay difusión.

Los expertos en la técnica apreciarán fácilmente que se pueden aplicar varias modificaciones y cambios a las realizaciones de la invención como se han descrito anteriormente en el presente documento sin separarse del alcance definido en él y mediante las reivindicaciones adjuntas.



## REIVINDICACIONES

1. Una disposición óptica para su uso en la generación de imágenes con una gran profundidad de foco, comprendiendo dicha disposición óptica:
- 5 una unidad de apertura (10) que comprende una placa aleatoria (12) configurada como un filtro espacial óptico, que tiene una función de transmisión de campo óptico y desprovista de potencia óptica; **caracterizada porque** comprende además una unidad de replicación (16, 26) que recibe un campo óptico de entrada desde dicha unidad de apertura (10) y configurada para proporcionar una pluralidad de réplicas (Ri-R3) del campo óptico de entrada de modo que dichas réplicas (Ri-R3) incluyan al menos dos réplicas (Ri-R3) que sean de sustancialmente la misma distribución de fase y creadas en regiones diferentes del plano de la unidad de apertura (10).
- 10 2. La disposición óptica de la Reivindicación 1, en la que dicha placa aleatoria (12) está configurada como una placa opaca con ventanas ópticas aleatoriamente distribuidas que crean una distribución de transmisión / bloqueo aleatoria para un campo óptico de entrada.
- 15 3. La disposición óptica de la Reivindicación 1, en la que dicha placa aleatoria (12) está configurada como una placa transparente con islas de difusión distribuidas aleatoriamente que crean una distribución de fase aleatoria de un campo óptico de entrada.
4. La disposición óptica de la Reivindicación 1, en la que dicha placa aleatoria (12) comprende un patrón de agujeros diminutos aleatorios.
- 20 5. La disposición óptica de una cualquiera de las Reivindicaciones 1 a 4, en la que dicha unidad de replicación comprende al menos una primera y una segunda unidades de simetrizado (16, 26) configuradas para proporcionar las al menos dos réplicas (Ri-R3) del campo óptico de entrada mientras se simetriza secuencialmente el campo óptico de entrada proyectado sobre dicha unidad de apertura (10) con respecto al primer y segundo centros de simetría, respectivamente.
- 25 6. La disposición óptica de la Reivindicación 5, en la que dicha primera unidad de simetrizado (16) está configurada para sintetizar una parte de un patrón de difusión (C) de un campo óptico de entrada pasada a través de dicha unidad de apertura (10) y dicha segunda unidad de simetrizado (26) se configura para simetrizar una salida de dicha primera unidad de simetrizado (16).
- 30 7. La disposición óptica de la Reivindicación 5, en la que la unidad de apertura (10) y la primera y segunda unidades de simetrizado (16, 26) están configuradas de modo que al menos una de las réplicas (Ri-R3) se puede desplazar con respecto a la otra.
8. La disposición óptica de la Reivindicación 7, que comprende un escáner (30), configurado y operativo para proporcionar dicho desplazamiento de al menos una de las réplicas (Ri-R3) proporcionando un desplazamiento relativo de al menos una de entre la unidad de apertura (10) y dicha primera unidad de simetrizado (16) con respecto a la segunda unidad de simetrizado (26).
- 35 9. La disposición óptica de una cualquiera de las Reivindicaciones 1 a 4, en la que la unidad de replicación comprende superficies reflectoras.
10. La disposición óptica de la Reivindicación 9, en la que dichas superficies reflectoras están formadas mediante al menos una primera y una segunda unidades reflectoras alojadas en una relación de separación a lo largo de un eje óptico de propagación de la luz a través de la disposición óptica hacia un plano de imagen.
- 40 11. La disposición óptica de la Reivindicación 10, en la que cada una de la primera y segunda unidades reflectoras comprende dos reflectores que definen superficies reflectoras mutuamente perpendiculares de modo que la superficie reflectora de la primera unidad reflectora es sustancialmente paralela a las superficies reflectoras respectivas de la segunda unidad reflectora.
- 45 12. La disposición óptica de una cualquiera de las Reivindicaciones 1 a 4, en la que la unidad de replicación comprende al menos uno de los siguientes: una matriz de fibras ópticas, un modulador de luz espacial y uno o más prismas en esquina.
13. La disposición óptica de una cualquiera de las Reivindicaciones 1 a 12, que comprende una matriz de píxeles de detección en un plano de imagen.
- 50 14. Un procedimiento para su uso en la generación de imágenes para proporcionar una imagen con una gran profundidad de foco, comprendiendo el procedimiento el paso de un campo óptico de la imagen a ser generada a través de una placa de apertura que comprende una placa aleatoria (12) sin potencia óptica, **caracterizada porque** comprende además la etapa de procesamiento óptico del campo óptico pasado a través de dicha placa aleatoria (12) para producir una pluralidad de réplicas (Ri-R3) de dicho campo óptico de entrada de modo que dichas réplicas (Ri-R3) incluyan al menos dos

réplicas (Ri-R3) que sean de sustancialmente la misma distribuci3n de fase y se creen en regiones diferentes del plano de apertura.

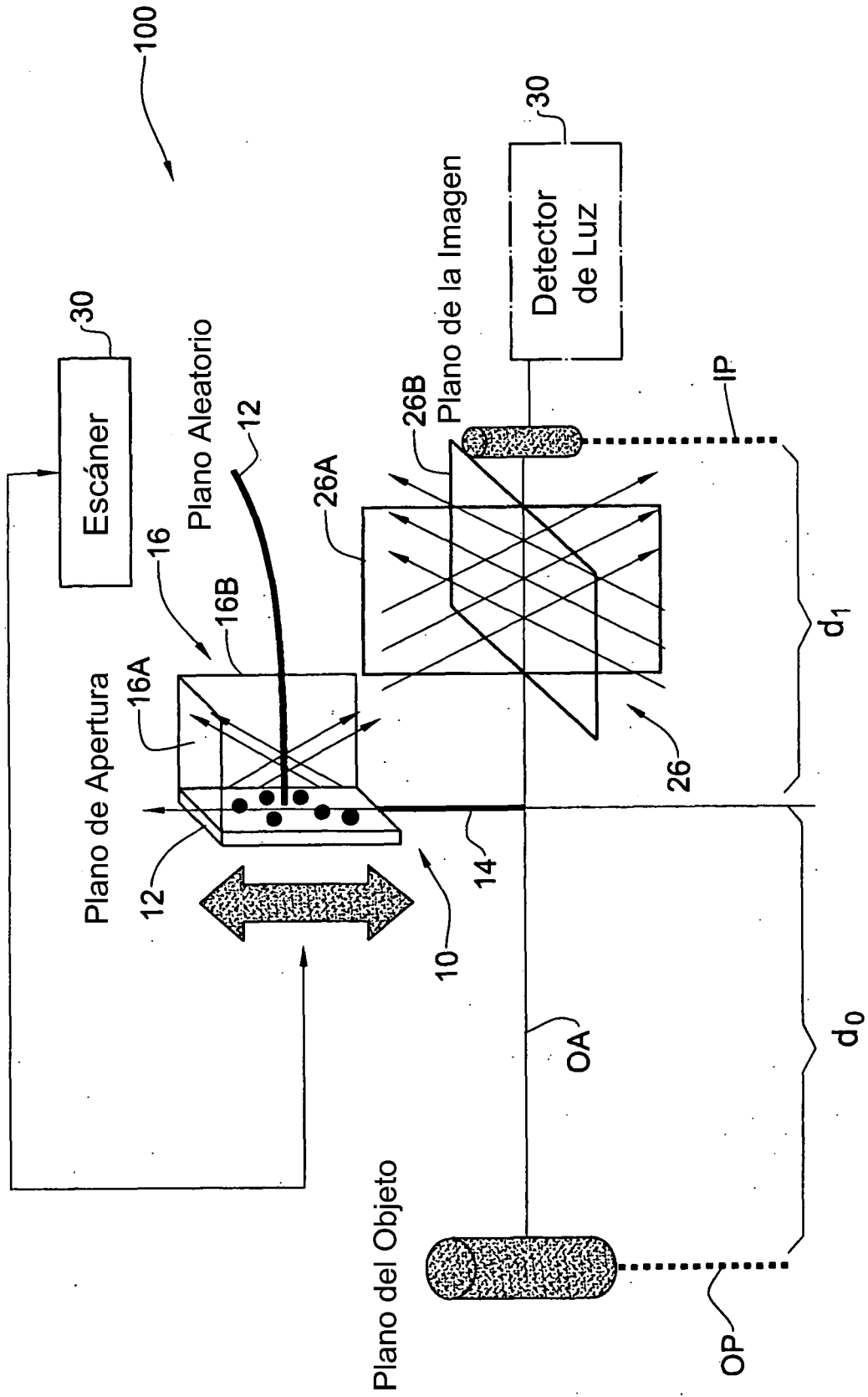


FIG. 1A

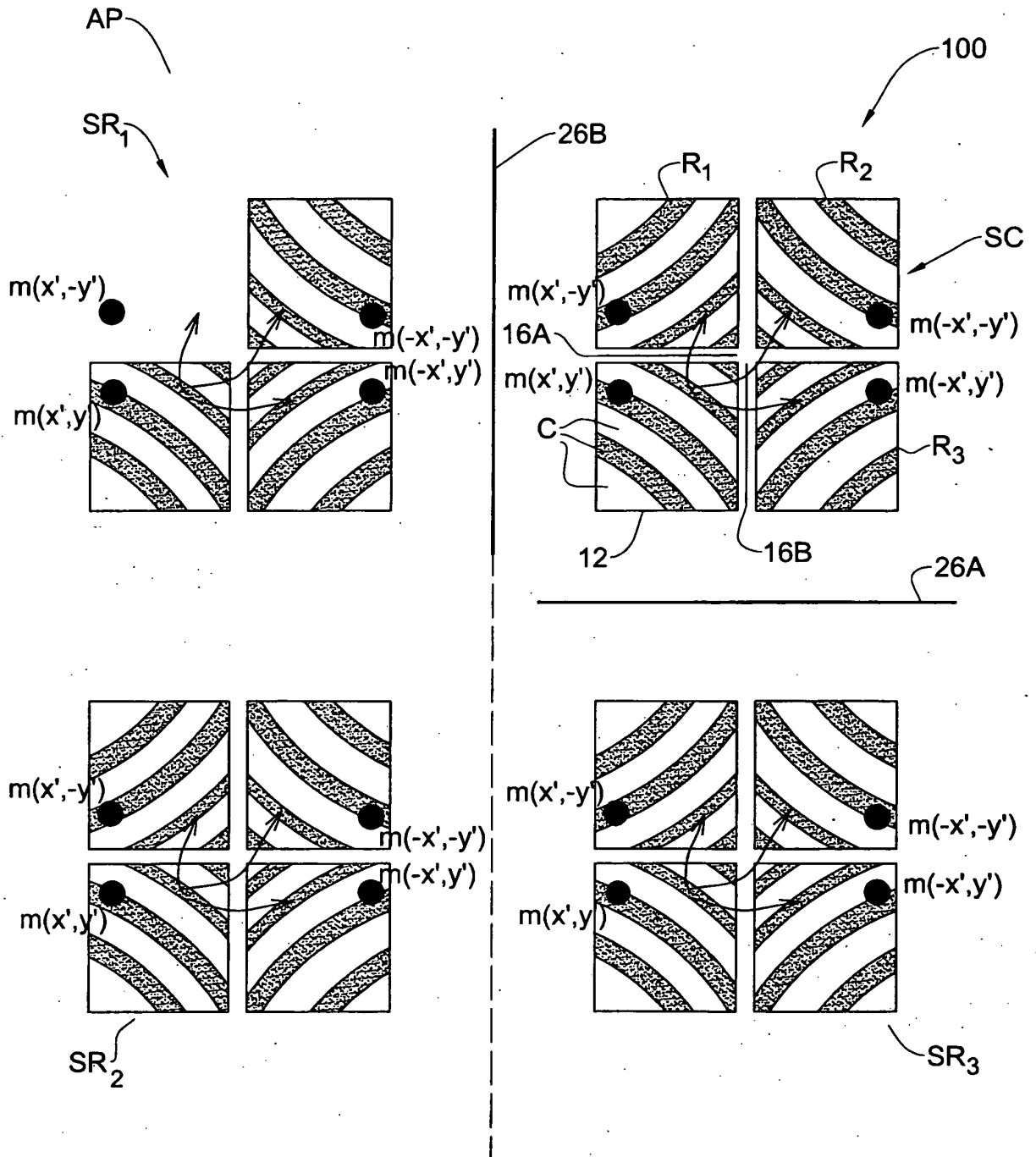


FIG. 1B

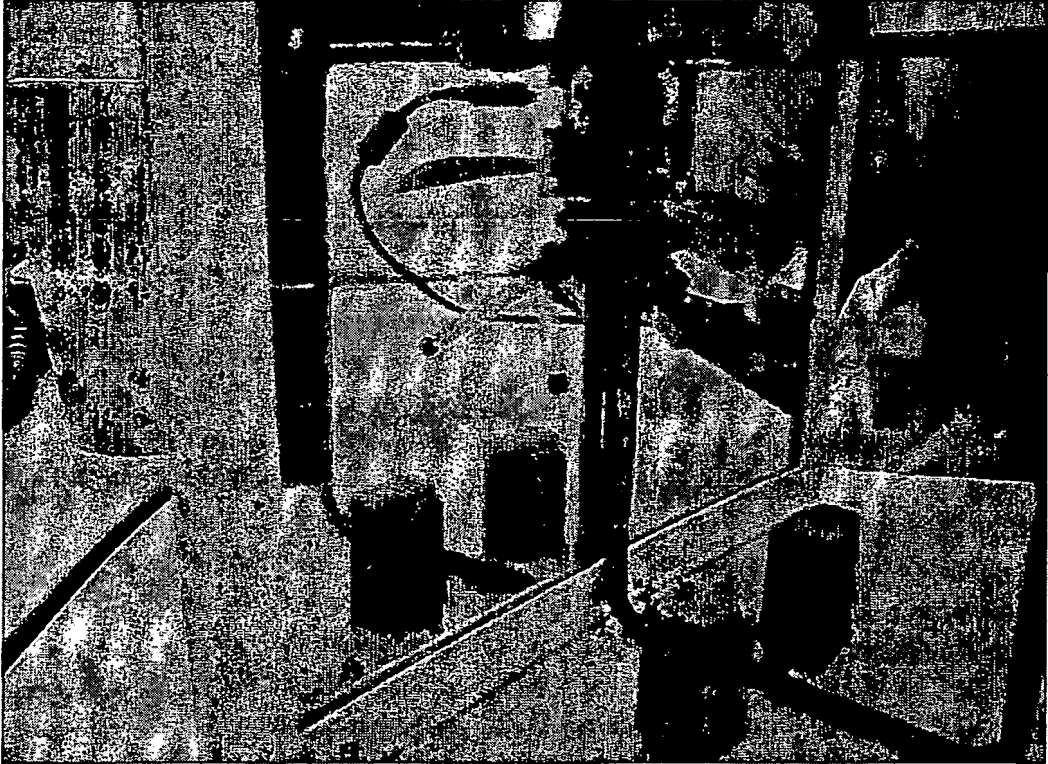


FIG. 1C

5

10

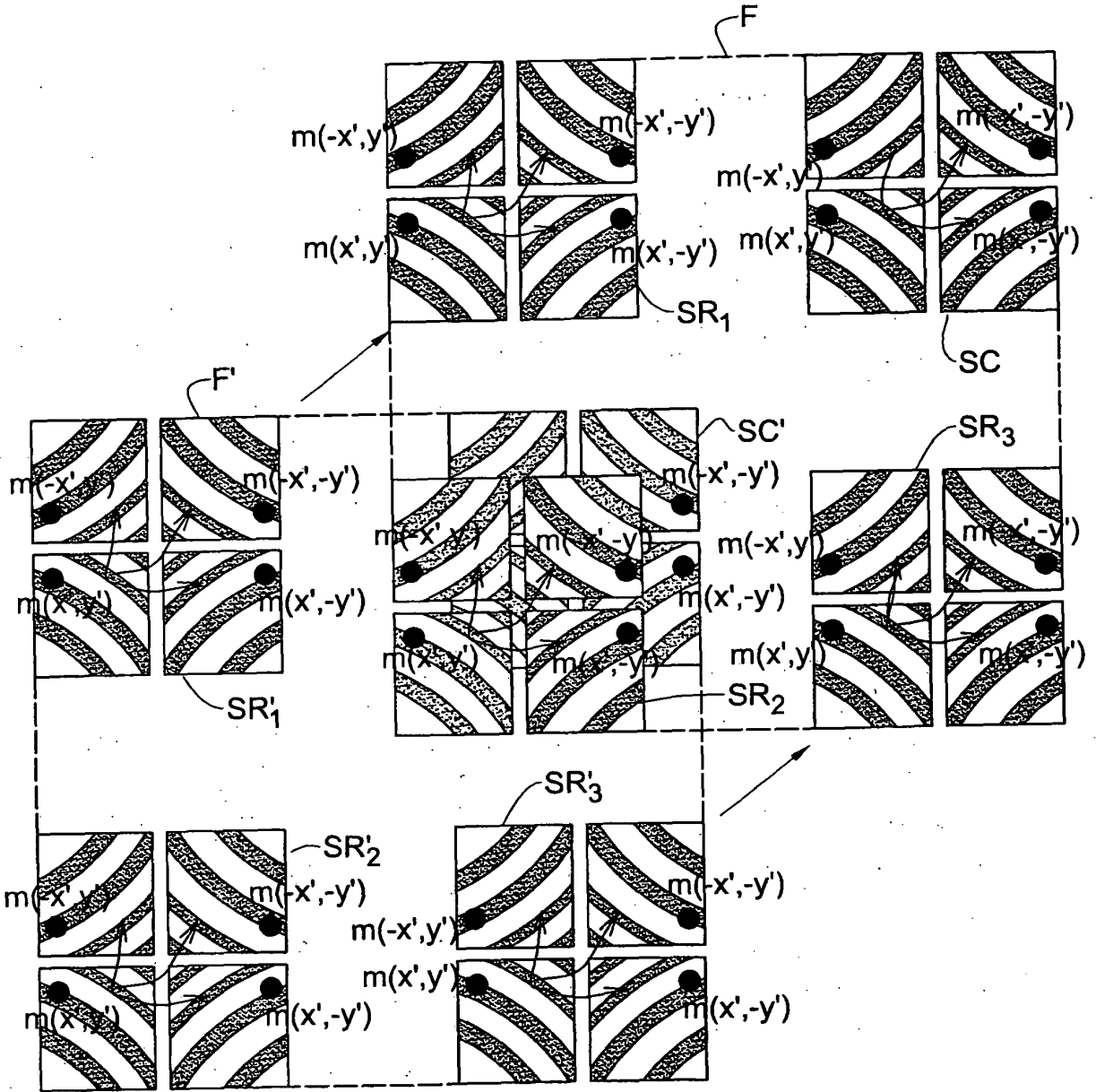


FIG. 1D

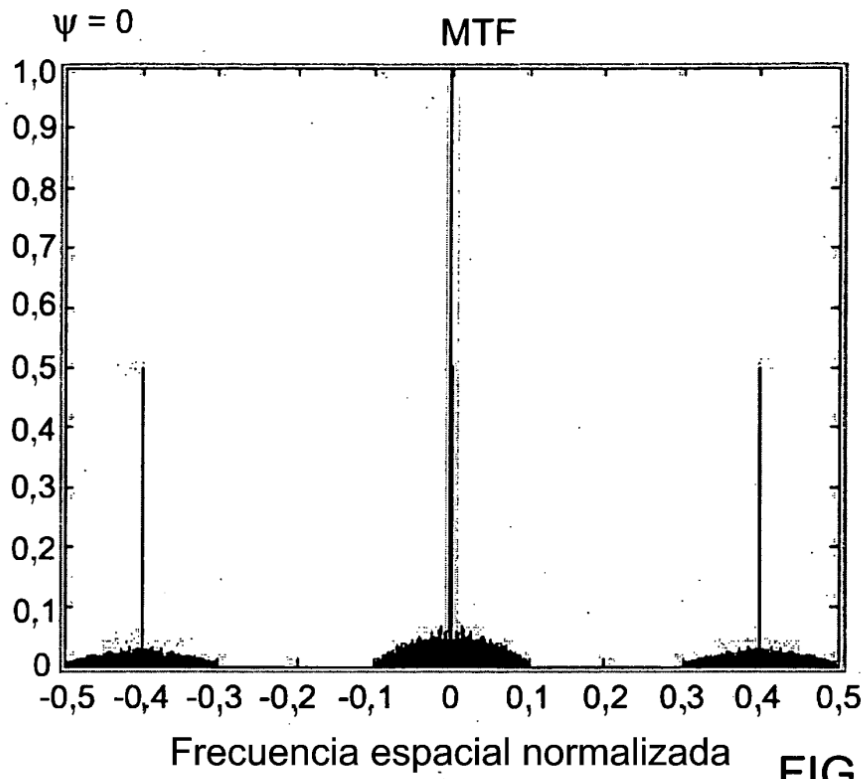


FIG. 2A

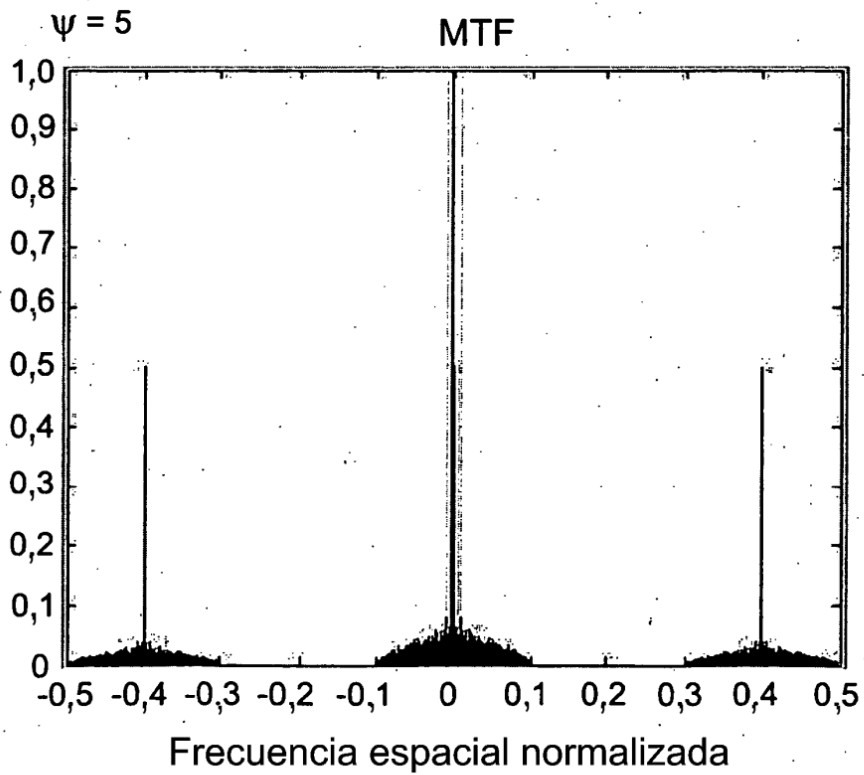
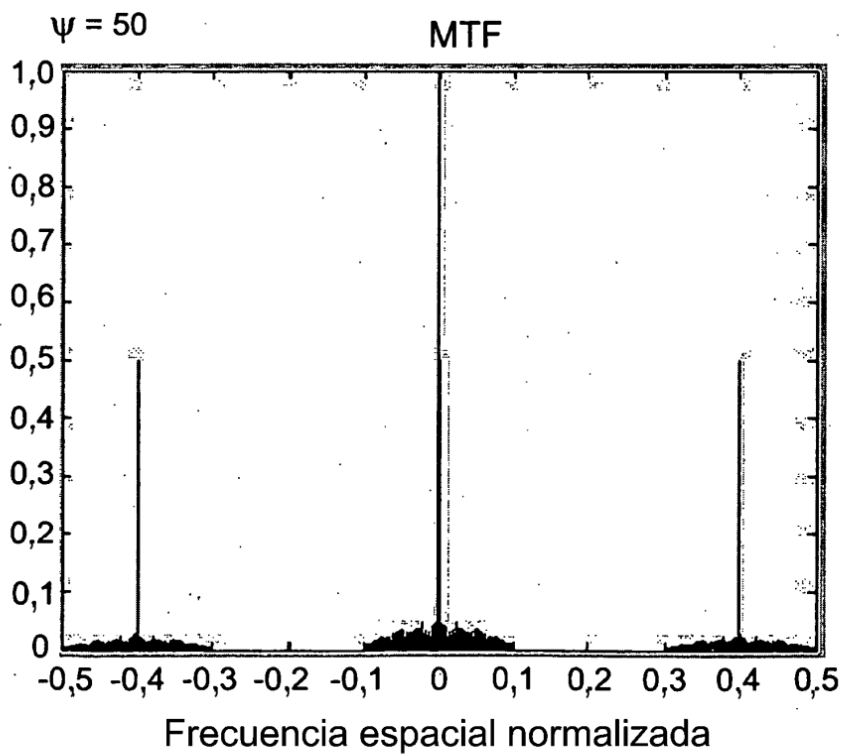
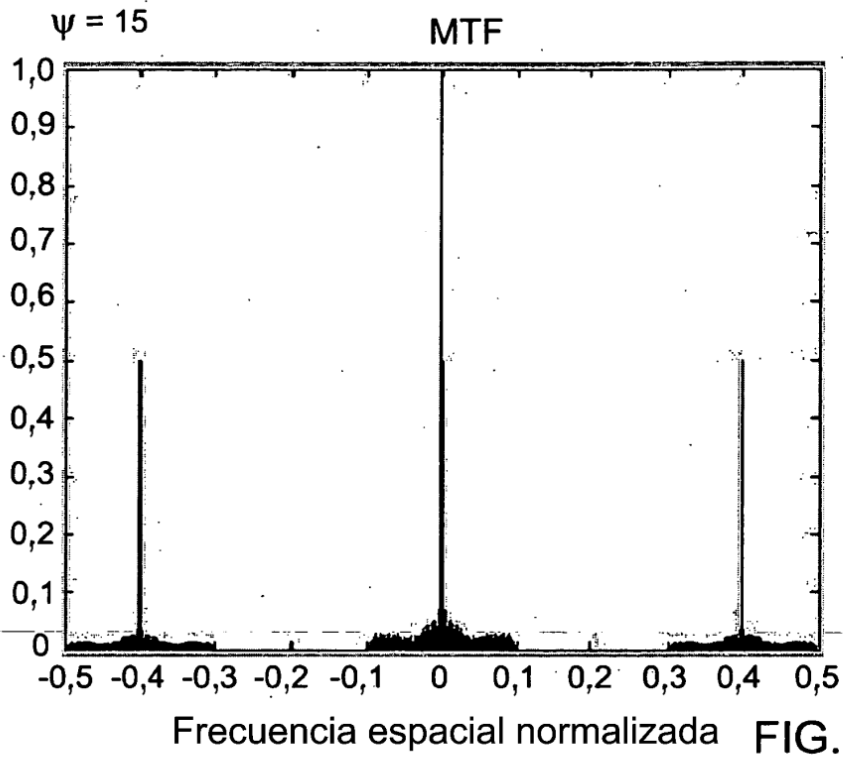


FIG. 2B





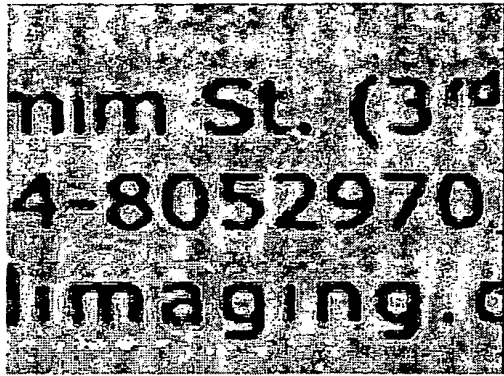


FIG. 3A

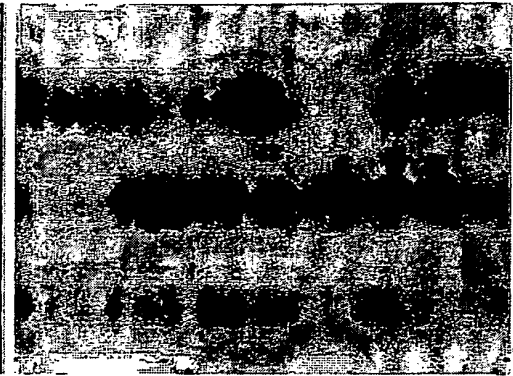


FIG. 3B



FIG. 3C



FIG. 3D

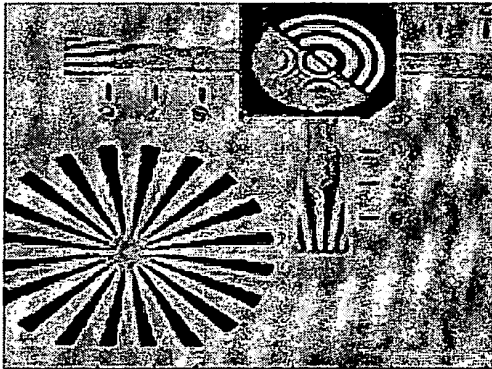


FIG. 4A



FIG. 4B

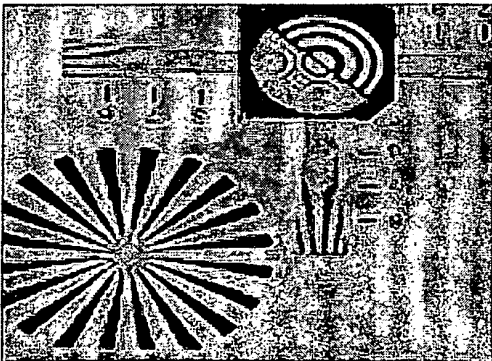


FIG. 4C

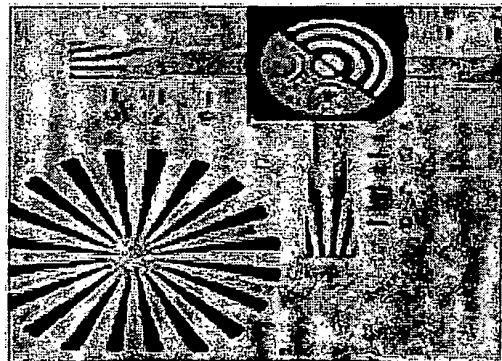


FIG. 4D



FIG. 5A

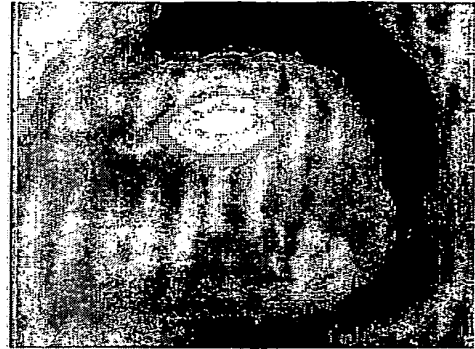


FIG. 5B



FIG. 5C



FIG. 5D

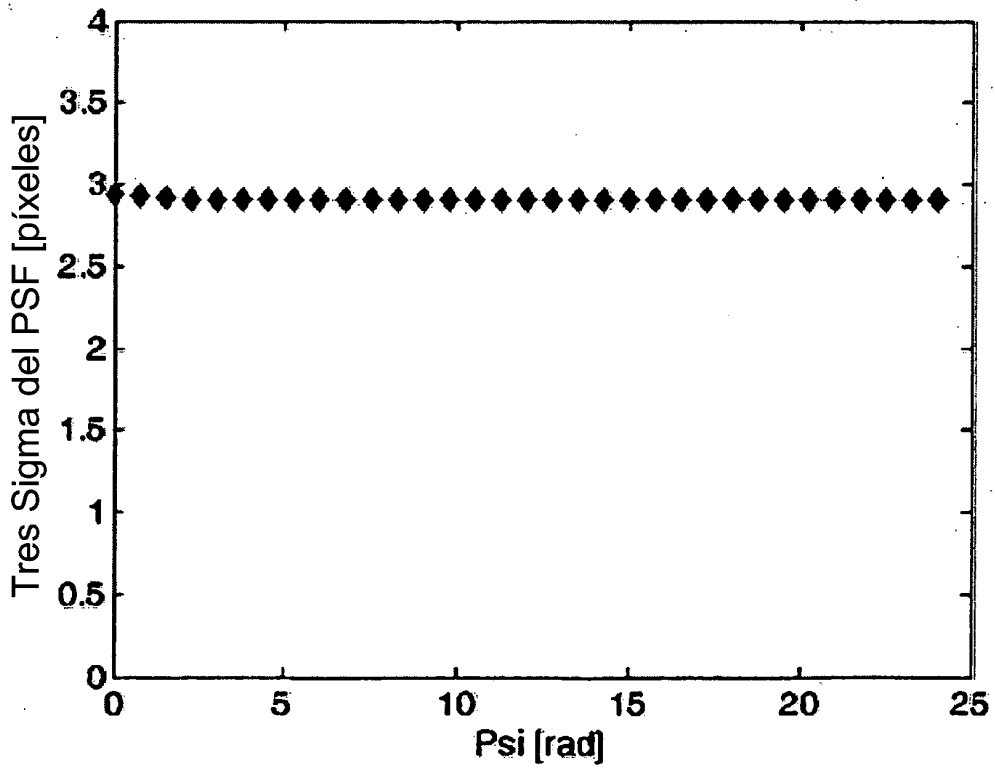


FIG. 6