



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



①① Número de publicación: **2 114 799**

②① Número de solicitud: 9502470

⑤① Int. Cl.<sup>6</sup>: G01J 9/00

①②

PATENTE DE INVENCION

B1

④② Fecha de presentación: **15.12.95**

④③ Fecha de publicación de la solicitud: **01.06.98**

Fecha de concesión: **28.12.98**

④⑤ Fecha de anuncio de la concesión: **16.02.99**

④⑤ Fecha de publicación del folleto de patente:  
**16.02.99**

⑦③ Titular/es:  
**Universidad de Santiago de Compostela,  
y en su nombre y representación el Rector  
Centro de Transferencia de Tecnología  
Avda. das Ciencias s/n  
15706 Santiago de Compostela, Coruña, ES**

⑦② Inventor/es: **Acosta Plaza, Eva;  
Bará Viñas, Salvador Xurxo y  
Ríos Rodríguez, Susana**

⑦④ Agente: **No consta**

⑤④ Título: **Sensor de frente de ondas con matriz de microlentes distribuidas espacialmente según los nodos de fórmulas de cubatura.**

⑤⑦ Resumen:

Sensor de frente de ondas con matriz de microlentes distribuidas espacialmente según los nodos de fórmulas de cubatura.

Especialmente diseñado para realizar la recuperación modal de fases de un frente desconocido mediante la evaluación de sus integrales modales a través de diversas cubaturas, particularmente cubaturas de Albrecht.

Utiliza como elemento de muestreo una matriz de microlentes situadas en un determinado sustrato de forma que los centros de sus aberturas coinciden con los nodos de la cubatura utilizada. Este sensor permite obtener los coeficientes modales del frente respecto a una base ortogonal (particularmente, polinomios de Zerrilke) de forma independiente y sin acoplamiento mutuo, evitando usar rutinas de inversión matricial y minimizando errores de modelización.

Es de aplicación para análisis de frentes de ondas, control de calidad de componentes ópticos, óptica activa y adaptativa, en particular para control de haz en láseres de alta potencia, compensación adaptativa de imagen y deconvolución post-detección.

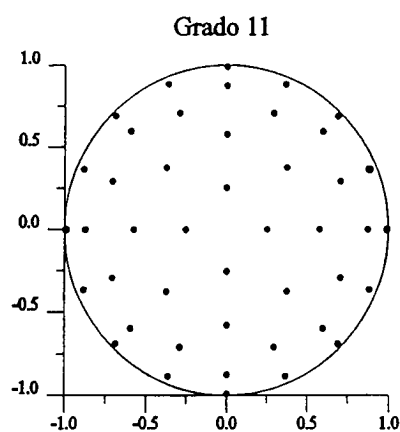


Figura 2c

ES 2 114 799 B1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el artº 37.3.8 LP.

## DESCRIPCION

Sensor de frente de ondas con matriz de microlentes distribuidas espacialmente según los nodos de fórmulas de cubatura.

5 Un sensor de frente de ondas es un dispositivo óptico que permite determinar la fase de un frente de ondas desconocido que incide sobre el mismo. Incluye como elementos básicos (Figura 1) una matriz de muestreo (a), un sensor de radiación (b) y un subsistema de procesado de datos (c). La matriz de muestreo permite aislar la radiación electromagnética asociada a determinadas regiones del frente (S) y, eventualmente, concentrarla en un conjunto discreto de focos ( $f_1 \dots f_N$ ) sobre la superficie del sensor de radiación. Este permite obtener información sobre la posición y estructura de estas regiones focales, información que, convenientemente procesada, permite a su vez la determinación de las características relevantes del frente de ondas estudiado.

15 Se refiere la presente invención a un nuevo sensor de frente de ondas especialmente diseñado para la recuperación modal de fases a través de la evaluación directa de las integrales modales por medios de fórmulas de cubatura. Este sensor utiliza como elemento de muestreo una matriz de microlentes situadas de forma que los centros de sus aberturas coincidan con la posición de los puntos nodales propios de la cubatura que se desea utilizar.

20 La determinación de la fase de un frente de ondas es una tarea básica en un gran número de aplicaciones tecnológicas en el ámbito de la óptica. Entre otras, y sin pretensiones de exhaustividad, caben destacar las relacionadas con el control de calidad de componentes ópticos, la determinación de posiciones y movimientos de objetos, la recuperación de imagen degradada por el paso de la radiación electromagnética a través de medios turbulentos y el control activo o adaptativo de haces láser o sistemas formadores de imagen.

25 La estimación de la fase de un frente de ondas puede realizarse, con gran precisión, mediante el uso de técnicas interferométricas convencionales, siempre que las condiciones particulares de la situación experimental así lo permitan. Existe, sin embargo, un gran número de situaciones de interés en las que no son aplicables este tipo de técnicas. Así sucede en todos aquellos casos en los que no se dispone de una adecuada onda de referencia, con las necesarias características de coherencia respecto a la onda que se desea estudiar, de forma que la obtención de patrones interferenciales estables resulta inviable. Este tipo de situaciones se presentan de forma habitual en los ámbitos de aplicación anteriormente mencionados como ejemplos.

35 En estos casos, existen enfoques alternativos, capaces de proporcionar una información precisa sobre la fase a partir de medidas de la irradiancia. Uno de ellos consiste en determinar, en un conjunto dado de puntos del espacio, y con la ayuda de dispositivos ópticos y detectores de radiación adecuados, el gradiente transversal local de la fase del frente que se desea estudiar. A partir de los valores medios del gradiente, y mediante la aplicación de algoritmos matemáticos adecuados, se pueden estimar los valores más probables de la fase desconocida. Entre otras ventajas, estos procedimientos permiten evitar el uso de ondas de referencia coherentes con las que se desea estudiar, de forma que se pueden utilizar fuentes policromáticas y, con determinadas limitaciones, espacialmente extensas.

45 Los algoritmos citados pueden dividirse en dos grandes grupos: los denominados de estimación zonal y los de estimación modal. En el primero de ellos, el objetivo es recuperar los valores de la fase en un conjunto discreto de puntos de la pupila del sistema. En el segundo, la fase desconocida se expande como combinación lineal de un conjunto de funciones (generalmente polinómicas y ortogonales sobre la pupila del sistema con respecto a una determinada métrica), usualmente polinomios de Zernike. El peso relativo de cada una de estas funciones (en lo sucesivo *funciones base*) viene dado por el valor de su correspondiente coeficiente multiplicativo en la mencionada combinación lineal (en lo sucesivo, *coeficiente modal*). El objetivo de la estimación modal es determinar, a partir de los valores medidos del gradiente, los valores más probables de estos coeficientes para el frente que se desea estudiar. Una descripción detallada de ambos procedimientos se puede encontrar en Southwell, W.H., J. Opt. Soc. Am. 70, 998-1006 (1980). En ambos casos la fase se determina unívocamente salvo una constante aditiva global, la cual es irrelevante para la mayor parte de las aplicaciones de interés.

60 Diversos trabajos demuestran la superioridad de los esquemas modales sobre los zonales, por cuanto permiten una detallada descripción del frente de ondas a partir de las medidas de su gradiente en un conjunto relativamente limitado de puntos, y presentan una menor sensibilidad de los resultados a los errores de carácter aleatorio que se producen en la realización de las medidas. Debido además a la particular forma de estimación de la fase, el problema de la interpolación de la misma entre puntos de medida

del gradiente se resuelve de forma obvia.

Los procedimientos modales tradicionalmente utilizados, presentan no obstante, algunos inconvenientes importantes. Para obtener una estimación de los valores más probables de los coeficientes modales se utiliza la condición de minimizar las diferencias cuadráticas medias entre los valores medidos del gradiente y aquellos que cabría esperar para una combinación lineal dada de funciones base. Los coeficientes modales actúan como parámetros libres cuya variación permite obtener el mejor ajuste. En la práctica, y dado que las derivadas de las funciones base utilizadas usualmente polinomios de Zernike, no son ortogonales en el conjunto de puntos de muestreo (Cubalchini, R., J. Opt. Soc. Am 69, 972-977 (1979)), la obtención de los coeficientes modales requiere de la resolución de un sistema lineal de ecuaciones para lo cual es preciso proceder a la inversión de determinadas matrices, las cuales pueden ser de dimensión elevada. Es bien conocido el hecho de que esta operación a menudo presenta problemas derivados de las singularidades de las matrices a invertir. Otro problema está relacionado con el llamado error de modelización. Este consiste en el hecho de que distintas suposiciones sobre el número y características de las funciones base que están presentes en la composición del frente de ondas darán lugar, para un mismo conjunto de medidas experimentales, a diferentes estimaciones del valor de los coeficientes modales y de sus varianzas, introduciendo así un factor de incertidumbre adicional. Por último, el hecho de que los coeficientes modales así obtenidos son los que minimizan la diferencia cuadrática media sobre la pupila del sistema entre los gradientes medidos y los estimados, no siempre garantiza que esos mismos coeficientes sean los que minimizan la diferencia cuadrática media sobre esa misma pupila de las fases real y estimada.

Para la medida experimental de los valores de los gradientes de la fase en un número determinado de puntos se han propuesto diversos tipos de matrices de muestreo en combinación con diversos tipos de sensores de radiación. El primero de ellos ha sido la bien conocida pantalla de Hartmann (Gozheil, D., en D. Malacara (ed.) *Optical Shop Testing*, Wiley Interscience, New York, capítulo 10 (1978)) consistente en una placa plana de material opaco en la cual se practican, a intervalos regulares, un conjunto de pequeñas aberturas circulares igualmente espaciadas entre sí formando sus centros una red cuadrada o polar equiespaciada en las direcciones radial y angular. Una onda plana propagándose en la dirección perpendicular al plano de esta pantalla dará lugar después de atravesarla, en la aproximación de la óptica geométrica, a un conjunto de haces de rayos que se propagarán paralelamente entre sí obteniéndose, en un plano de observación, un conjunto de regiones iluminadas, de frontera circular o elíptica, cuyos centros reproducirán la red equiespaciada formada por las aberturas. Cualquier otro frente de ondas dará lugar, después de atravesar las aberturas de la pantalla, a un conjunto de haces de rayos propagándose en distintas direcciones e incidiendo sobre el plano de observación en distintas posiciones, de tal forma que existirá en general una desviación entre los centros de las regiones iluminadas en este caso y las posiciones de los centros obtenidas en el caso de iluminación con onda plana colimada. Estas diferencias de posiciones, conocidas las características geométricas del sistema utilizado, permiten calcular de forma sencilla el valor medio del gradiente de la fase del frente bajo estudio en cada una de las aberturas de la pantalla, y a partir de ahí proceder a su tratamiento matemático por alguno de los procedimientos anteriormente citados. Además de las pantallas con aberturas cuyos centros forman redes equiespaciadas cartesianas o polares, se han utilizado otras con estructura espiral, cuya descripción se puede encontrar en la referencia anteriormente citada.

Una mejora sustancial de la pantalla de Hartmann fue introducida en los años 70 por Platt y Shack (B. Platt and R. V. Shack, *Optical Sciences Center Newsletter* vol. 5, p. 15, (1971)), configurando lo que actualmente se conoce como sensor Shack-Hartmann. Consiste esta mejora en la colocación, en todas y cada una de las aberturas de la pantalla de Hartmann, de una pequeña lente convergente de igual distancia focal. Esto permite conseguir dos objetivos: una mejor eficacia en la captación de luz y la focalización de la luz que atraviesa cada abertura en una región focal distinta y claramente diferenciada, sobre el plano de observación, aumentando así el rango dinámico del sensor. Como es bien sabido por ecuaciones fundamentales de la aproximación de la óptica geométrica, la posición de cada uno de estos focos se desplazará transversalmente en el plano de observación si la onda incidente presenta un gradiente transversal medio no nulo sobre la correspondiente abertura.

Existe actualmente una amplia gama de tecnologías disponibles para la fabricación de matrices de microlentes, de distintas aperturas numéricas y distancias focales sobre una amplia gama de sustratos. Entre ellas, y sin pretensión de exhaustividad, cabe destacar la técnica de intercambio iónico en vidrio, la generación directa de relieves binarios o continuos sobre fotorresina (por medio de exposiciones con una adecuada máscara, con o sin posterior fundido, con o sin previo modelado), la escritura directa sobre fotorresina por haz láser o haz de electrones, o la grabación de relieve en la superficie de un sustrato de vidrio mediante la técnica conocida como RIE (RIE: *reactive ion etching*). Estas matrices, con microlentes uniformemente distribuidas sobre su sustrato de forma que los centros de sus aberturas forman

una red cuadrada o hexagonal equiespaciada, son habitualmente utilizadas para recuperación modal de fases según los algoritmos anteriormente descritos. Por lo que respecta a la determinación del centro de la región focal de cada microlente, calculada como el centroide de la correspondiente distribución de irradiancias, esto se realizó inicialmente por medida directa sobre registros fotográficos de las mismas  
 5 efectuados sobre material fotosensible convencional situado en el plano de observación. Actualmente esta determinación se realiza, de forma muy eficiente y precisa, situando en el plano de observación diversos tipos de sensores de radiación optoelectrónicos (especialmente cámaras CCD, *Charge-Coupled Devices*) y procesando los datos por ellos adquiridos mediante algoritmos adecuados implementados en sistemas digitales de computación.

10 Recientemente ha sido desarrollada por los autores una nueva formulación matemática del problema de la recuperación modal de fases a partir de la medida de los gradientes locales (Acosta, E., Bará, S., Ríos, S. and Rama, M.A., *Opt. Letters* 20, 1083-1085 (1995)). Cada coeficiente modal se puede estimar directamente mediante una integral (en lo sucesivo, *integral modal*) del gradiente ponderado por una  
 15 cierta función, que depende del orden del modo que se desee calcular. Esta solución permite, de forma eficaz, obtener de forma independiente la estimación del valor más probable de cada coeficiente modal, evitando así los problemas derivados del acoplamiento modal y haciendo innecesario el uso de procedimientos de inversión matricial. Como consecuencia, se evitan asimismo los problemas derivados del error de modelización, por cuanto la estimación del valor y la varianza de cada uno de los coeficiente modales  
 20 no influye en las de los demás. Asimismo, los coeficientes obtenidos mediante la solución propuesta son los que minimizan la diferencia cuadrática media entre la fase real y la estimada.

El cálculo eficaz de los valores de las citadas integrales modales exige la aplicación de métodos de cálculo numérico para la evaluación de integrales a partir de un conjunto finito de medidas de los valores  
 25 del integrando en un dominio bidimensional. Estos métodos, denominados generalmente *cubaturas*, permiten obtener una estimación muy precisa, y en ciertas condiciones exacta, del valor de integrales como las citadas. Para ello es preciso conocer el valor del integrando en un conjunto determinado de puntos, denominados *nodos* o *puntos nodales*, designados por  $r_i$  ( $i=1 \dots N$ ) siendo evaluada la integral mediante una suma finita de la forma

$$30 \quad a_k = -c_k \int_{\sigma} (\nabla S) \cdot F_k d\sigma = -c_k \sum_i w_i (\nabla S(r_i)) \cdot F_k(r_i)$$

donde  $a_k$  es el coeficiente modal que se desea conocer ( $k$  es el índice que caracteriza cada modo del frente),  $\sigma$  es la superficie que define la pupila del sistema,  $\nabla S(r_i)$  es el valor del gradiente transversal local del frente de ondas medido en el punto  $r_i$  y  $F_k$  es una función auxiliar vectorial, que depende de  $k$ , y cuya  
 35 definición, características y forma de cálculo se puede encontrar en la referencia anteriormente citada. Las cantidades  $w_i$  son los denominados *pesos*, asociados a los nodos de la cubatura y dependientes de la forma de ésta. Se denomina *grado de precisión* de una cubatura al orden del mayor polinomio que puede ser integrado de forma exacta por medio de la misma.

40 La presente invención tiene por objeto el diseño de un sensor que realice la estimación modal de un frente de onda mediante el cálculo de los coeficientes modales a través de las citadas fórmulas de cubatura. Para ello es necesario diseñar previamente un elemento óptico que resuelva el problema técnico de obtener un conjunto de medidas del gradiente local de la fase de un frente de ondas desconocido en los puntos de la pupila del sistema necesarios para poder aplicar la nueva formulación matemática citada y  
 45 obtener así los valores más probables de los coeficientes modales.

El citado elemento consta de un conjunto de microlentes, refractivas o difractivas, construídas según cualquiera de las tecnologías anteriormente mencionadas de igual distancia focal y situadas de forma que los centros de sus aberturas coincidan con los puntos nodales de la cubatura que se desee utilizar para la  
 50 evaluación de las integrales modales. Existe un gran número de formas de realizar este elemento, siempre de acuerdo con el principio de diseño mencionado. En particular, y a modo de ejemplo, las coordenadas ( $x,y$ ) de los centros de las aberturas de las citadas microlentes, normalizadas sobre el círculo de radio unidad, correspondientes a la utilización de cubaturas conocidas como de Albrecht se indican en la tabla I para diversos grados de precisión (H. Engels, *Numerical Quadrature and Cubature*, Academic Press, Londres (1980)). La distribución espacial de estos puntos sobre una pupila circular de radio unidad se  
 55 indica en la Figura 2.

La distribución de intensidades que se observa en el plano focal común de todas las microlentes se hace incidir, directamente o a través de un sistema óptico adecuado, sobre la superficie del sensor de radiación y las medidas proporcionadas por este son transferidas al subsistema de proceso de datos, a fin  
 60 de proceder al cálculo de la posición del centro de cada región focal  $r_{di}$ , definido como el centroide de la correspondiente distribución de irradiancias, y dado por

$$r_{di} = \frac{\int_{ci} I(r) r d\sigma}{\int_{ci} I(r) d\sigma}$$

5 donde  $I(r)$  representa la irradiancia en el punto  $r$  del plano del sensor de radiación,  $d\sigma$  es un elemento diferencial de área del mismo y  $ci$  es la zona del sensor de radiación sobre la que se forma la región de focalización de la microlente  $i$ .

10 Cuando un frente de ondas plano incide perpendicularmente sobre la matriz de microlentes, los centros de las regiones focales de todas y cada una de ellas formarán sobre el sensor una réplica de la red de centros de sus aberturas. Esto está representado en la Figura 3, en donde a cada centro de abertura  $r_i=(x_i,y_i)$  en el plano de las microlentes le corresponde un centro de región focal  $r_{di}$ , con las mismas coordenadas, en el plano del sensor de radiación. Si un frente de ondas diferente al citado incide sobre la matriz de microlentes, los centros de las regiones focales sufrirán un desplazamiento, en general de distinta  
15 dirección y magnitud en cada caso, tal y como se indica a modo de ejemplo en la figura 4, desviándose el centro de la región focal  $r_{di}=(x_{di},y_{di})$  de su posición original. El gradiente local del frente promediado sobre la abertura de cada microlente  $i$ ,  $\nabla S(r_i)$ , puede calcularse mediante la relación

$$\nabla S(r_i)=(\partial S/\partial x,\partial S/\partial y) \quad \text{evaluado en } r_i = (x_i,y_i)$$

$$\partial S/\partial x = (x_{di} - x_i)/f \quad \partial S/\partial y = (y_{di} - y_i)/f$$

20 donde  $(x_{di},y_{di})$  son las coordenadas de la posición del centro de la región focal correspondiente a la lente  $i$  cuando sobre el sensor incide el frente de ondas que se desea estudiar,  $(x_i,y_i)$  son las coordenadas de esa región focal cuando sobre el sensor incide una onda plana perpendicularmente a la matriz de microlentes, y  $f$  es la distancia focal de las microlentes utilizadas. Utilizando un conjunto de microlentes convenientemente dispuestas, midiendo las posiciones de los centros de sus regiones focales y conociendo el valor de la función  $F_k$ , puede calcularse directamente el valor del coeficiente modal  $a_k$  por medio de la suma infinita antes mencionada.

30 La distribución de las regiones focales de las microlentes sobre el elemento sensor de radiación es un importante factor de diseño por cuanto debe evitarse que, en la práctica, las regiones focales pertenecientes a microlentes vecinas se solapen total o parcialmente. Para grados de precisión elevados, la densidad de microlentes puede llegar a ser relativamente elevada en algunas zonas de la matriz (en particular, si se utilizan cubaturas de Albrecht, estas zonas están situadas cerca del borde de la pupila del sistema).  
35 Bajo iluminación plana colimada esto se traduce en una elevada densidad de regiones focales en la correspondiente zona del detector, disminuyendo así el rango dinámico del sensor para la detección de gradientes en estas zonas. Existe la posibilidad de aumentar ese rango dinámico, redistribuyendo las regiones focales sobre la superficie del detector de forma que sus centros estén situados en posiciones libremente elegidas cuando sobre la matriz incida una onda de características prefijadas. Esto se consigue mediante la codificación en cada microlente de una fase lineal. Con referencia a la figura 5, si se desea que la región focal de una determinada microlente  $i$ , cuyo centro está situado en un punto cuyo vector de posición es  $r_i$  tenga su centro en el punto  $r_{di}$  del detector si sobre ella incide un determinado frente cuya fase es  $\Phi(r)$ , se debe incluir en la función de transmisión de la microlente una fase lineal adicional con una frecuencia espacial dada por  
40

$$v_i = (r_{di} - r_i)/(\lambda f) - \nabla \Phi(r_i)/(2\pi)$$

45 donde  $\lambda$  es la longitud de onda y  $f$  es la distancia focal de las microlentes utilizadas.

50 Una configuración particular de gran interés es aquella en la que los centros de las regiones focales forman, sobre la superficie del detector, una red cuadrada regularmente espaciada cuando sobre la matriz de microlentes incide el frente prefijado.

55 Es claro que mediante el procedimiento descrito puede modificarse no sólo la estructura de la red que forman los centros de las regiones focales, sino también la escala de la misma. Esta posibilidad es de gran interés para facilitar el acoplamiento directo de una matriz de microlentes de un tamaño determinado a un sensor de radiación de tamaño diferente, sin que sea necesario el uso de elementos ópticos adicionales para obtener el deseado cambio de escala.

60 La introducción de la oportuna fase lineal sobre cada microlente puede realizarse por diversos procedimientos bien establecidos en el campo de la tecnología óptica. Entre ellos, puede mencionarse la modificación controlada del perfil de la superficie de microlentes refractivas, la utilización de redes lineales de difracción adecuadas, la codificación directa de la fase adicional en la función de transmisión

característica de las microlentes difractivas, etc.

Una característica adicional de una matriz de muestreo construida de acuerdo con esta especificación es que permite detectar con comodidad diferencias de gradiente entre un frente establecido a priori y uno desconocido, mediante la medida del desplazamiento de los puntos focales con respecto a sus posiciones nominales,  $r_{di}$ . De esta forma, si los frentes de onda a estudiar se pueden considerar como perturbaciones de un frente de ondas preestablecido, el rango dinámico del sensor puede ser aumentado de forma sensible.

Los componentes ópticos descritos, incorporados como elemento de muestreo de los gradientes transversales locales en un sensor tipo Shack-Hartmann, permiten determinar con elevada precisión los coeficientes modales de un frente desconocido, con las ventajas anteriormente descritas. En particular, es de interés su aplicación en el control de calidad de componentes ópticos, especialmente de óptica de gran abertura, permitiendo, si se utilizan como funciones base los polinomios de Zernike, una estimación independiente de los distintos términos de aberración representados por cada uno de estos polinomios. Asimismo, y como ya se ha mencionado, resultan de interés en aplicaciones relacionadas con la óptica activa y adaptativa, entre las que destacan el control activo de haz en láseres de alta potencia y la compensación adaptativa de imagen degradada por turbulencias (especialmente en astronomía, (así como la restauración de imagen mediante procesos de deconvolución post-detección.

Aunque la descripción anterior se refiere explícitamente a matrices de muestreo constituídas por microlentes convergentes, es claro que el mismo efecto se puede obtener mediante combinaciones de una matriz de microlentes divergentes y una lente convergente convencional, o bien mediante microespejos, trabajando en este último caso por reflexión. En la figura 6 se representa la primera posibilidad citada, en la cual una matriz de microlentes divergentes (a) da lugar a un conjunto de focos virtuales ( $f_1 \dots f_N$ ) cuando sobre ella incide un frente de ondas determinado. La lente convergente convencional (L) es utilizada para formar una imagen real ( $g_1 \dots g_N$ ) de estos focos sobre la superficie del sensor de radiación (b), siendo posteriormente procesados los datos de irradiancia en el sistema (c) de forma análoga a la descrita. La adaptación a este caso de las fórmulas que permiten evaluar el gradiente medio local del frente de ondas sobre la apertura de cada microlente es inmediata a partir de las fórmulas que describen el comportamiento de las lentes en la aproximación de la óptica geométrica. De forma análoga, en la figura 7 se indica el funcionamiento de un sensor basado en una matriz (a) en la que las microlentes han sido substituidas por microespejos cóncavos ( $e_1 \dots e_N$ ) de superficie esférica o asférica. Un elemento semirreflecente (E), que permite el paso del frente de fase  $\Phi(r)$  hasta la matriz de microespejos, atenuándolo pero sin deformarlo, permite también redirigir la luz reflejada por los microespejos de forma que los focos ( $f_1 \dots f_N$ ) se formen sobre la superficie del sensor de radiación (b), procesándose posteriormente los datos de irradiancia mediante el sistema (c) de forma similar a la anteriormente descrita. Un sistema análogo está constituido por una matriz en la que los microespejos sean convexos, utilizándose en este caso una lente convergente convencional para formar sobre el plano del sensor de radiación una imagen real de los focos virtuales producidos por aquellos.

No agotan éstas todas las posibilidades de obtener el efecto deseado, siendo también posible substituir la matriz de microlentes por una lente convergente convencional en combinación con una pantalla opaca con pequeñas aberturas situadas de forma que sus centros estén situados en los puntos nodales de una determinada cubatura. En estas aberturas es posible codificar fases lineales (por ejemplo, mediante redes lineales de difracción de período y orientación adecuados) a fin de controlar la posición de las regiones focales sobre el detector de radiación cuando sobre la pantalla incide un frente de ondas prefijado.

Ejemplo 1.

50 *Sensor de frente de ondas con matriz de Albrecht de 108 elementos.*

Este sensor utiliza como elemento de muestreo una matriz de microlentes convergentes, los centros de cuyas aberturas están situados, en coordenadas normalizadas del círculo de radio unidad, en los puntos nodales correspondientes a la cubatura de Albrecht de grado de precisión 23 (especificados en la Tabla I). La distribución espacial de los mismo está representada en la Figura 2. Valores típicos de los parámetros característicos de este sistema son los siguientes: radio de la matriz  $R=5$  mm, radio de cada microlente  $r=150 \mu\text{m}$ , distancia focal  $f=2$  cm. El tamaño del punto focal de cada microlente, en condiciones de funcionamiento limitado por difracción a una longitud de onda de  $633 \text{ nm}$  es de  $51.5 \mu\text{m}$ . Como sensor de radiación puede utilizarse ventajosamente una cámara CCD sensible a radiación visible con un tamaño de pixel entre  $5$  y  $10 \mu\text{m}$  de lado. La adaptación del tamaño de la región focal de la matriz al tamaño efectivo del elemento sensor de radiación se realiza mediante elementos ópticos refractivos convencionales. Para estudiar el comportamiento de este sensor ante frentes de onda de aberración moderada, se realizó

un estudio numérico suponiendo que sobre el mismo incide un frente de onda descrito por la combinación lineal de todos los términos polinómicos no triviales de Zernike hasta grado 16 (en total, 152 términos), y procediendo a la recuperación de todos los términos no triviales hasta grado 6 (en total, 27 términos). Los coeficientes del frente simulado fueron fijados como  $a_k^o = a_{nl}^o = 1/n^2$  donde (n,l) son los grados radial y angular, respectivamente, correspondientes al término de órdenes k de la serie. Para evaluar la calidad del frente de ondas recuperado, se analizaron las diferencias entre los coeficientes  $a_k^o$ , dados por la expresión anterior, y los coeficientes  $a_k^r$ , obtenidos a partir de los datos proporcionados por un sensor como el descrito, en condiciones de ausencia de ruido y detección exacta del gradiente local en el centro de cada microlente, realizando la evaluación numérica de las integrales modales de acuerdo con la fórmula arriba recogida (procedimiento que en lo sucesivo se designa como *Método A*). Los coeficientes no recuperados ( $a_k^r$  para k entre 29 y 153, inclusive) fueron igualados a cero. Como parámetro de calidad,  $\eta$ , se evaluó la diferencia cuadrática media normalizada sobre el círculo de radio unidad de los frentes de onda simulado  $W^o$  y recuperado  $W^r$ , que es igual a la diferencia cuadrática media entre ambos conjuntos de coeficientes, ponderada por los factores de normalización de cada término de Zernike,  $c_k$ , de acuerdo con la expresión:

$$\eta = \frac{\|W^o - W^r\|^2}{\|W^o\|^2} = \frac{\sum_{k=2}^{153} (a_k^o - a_k^r)^2 c_k}{\sum_{k=2}^{153} (a_k^o)^2 c_k}$$

Estos resultados se compararon con los obtenidos en el caso de utilizar una matriz de muestreo construida de forma que permita calcular las integrales modales mediante dos cuadraturas unidimensionales sucesivas: Gauss-Legendre para la coordenada radial, y regla trapezoidal compuesta para la coordenada angular (procedimiento que en lo sucesivo se denomina *Método B*), y asimismo, con los que se obtienen mediante la aplicación de la técnica convencional con matrices de microlentes situadas sobre los nodos de una red cartesiana equiespaciada y ajuste modal no ortogonal de los gradientes de fase, descrita, por ejemplo, en Cubalchini, R., J. Opt. Soc. Am. **69**, 972-977 (1979) (procedimiento designado como *Método C*).

La tabla II recoge los valores de  $\eta$  obtenidos con cada uno de los métodos indicados, así como el error relativo en la recuperación de dos coeficientes particulares, el de orden k=4 (correspondiente a los índices n=2, l=0, que representa el término conocido como defocalización o desplazamiento focal) y el de k=11 (correspondiente a n=4, l=-2). La comparación se ha efectuado para sensores que utilizan un número sensiblemente igual de microlentes (N), siendo las pequeñas variaciones entre unos y otros debidas a las condiciones impuestas por cada método. Como se puede observar, la calidad de la recuperación tanto global como de cada uno de los coeficientes modales es superior utilizando el método A (sensor con las microlentes situadas de forma que sus centros coinciden con los nodos de la cubatura de Albrecht), en comparación con el procedimiento tradicional (Método C). Entre las dos posibilidades analizadas con el sensor propuesto, la correspondiente al Método A ofrece unos mejores resultados que la correspondiente al Método B.

### Ejemplo 2.

*Sensor de frente de ondas con matriz de Albrecht de 12 elementos diseñada para obtener una distribución cartesiana equiespaciada de las áreas focales cuando sobre el sensor incide un frente de ondas esférico divergente de curvatura determinada.*

Es posible diseñar, de acuerdo con el procedimiento descrito, una matriz de muestreo que permita focalizar una onda incidente dada en una distribución predeterminada de áreas focales. Esto se realiza mediante la codificación en la función de transmisión de cada microlente de una fase lineal adecuada, utilizando cualquiera de las técnicas convencionales desarrolladas para ello.

A tal fin, y a modo de ejemplo, se considera una matriz de muestreo de Albrecht de contorno circular de radio R=1 cm, compuesta por 12 microlentes cuyos centros están situados en los puntos indicados con círculos en la figura 8, que tienen por coordenadas  $(x_i, y_i)$ , normalizadas en el círculo de radio unidad, las que figuran en la Tabla I para el grado de precisión 7. Se establece que la distribución de las zonas focales sobre el plano del sensor de radiación debe formar una red cartesiana regularmente espaciada, de forma que el centro de la región focal cada microlente i tenga por coordenadas los valores de  $(x_{di}, y_{di})$  recogidos en la tabla III (e indicados a la misma escala con cuadrados en la figura 8), cuando sobre la matriz incida una onda esférica divergente, con su foco situado sobre el eje óptico del sistema y un radio de curvatura Z=50 cm.

## ES 2 114 799 B1

Se considera que la longitud de onda de la radiación  $\lambda=633$  nm, y se fija en 10 cm la distancia focal de cada microlente.

En la Tabla III se explicitan las componentes  $v_x$  y  $v_y$  de la frecuencia espacial que debe ser codificada en cada microlente, de acuerdo con el procedimiento descrito, para obtener el efecto deseado.

Como se puede observar, el procedimiento descrito permite, por una parte, modificar la forma de la distribución de los centros de las regiones focales sobre el plano del sensor de radiación y, por otra, efectuar cambios de escala en la misma. La zona del plano del sensor de radiación que contiene a las regiones focales de las microlentes, bajo las especificaciones indicadas, es en este ejemplo de tamaño sensiblemente menor que la zona de la matriz de microlentes que contiene a los centros de sus aberturas. Esta última propiedad es de especial interés para acoplar directamente, sin necesidad de elementos ópticos convencionales intermedios, una matriz de microlentes y un elemento sensor de radiación de diferentes dimensiones.

TABLA I

Coordenadas  $(x_i, y_i)$  de los centros de las aberturas de las microlentes en la matriz de muestreo, normalizadas sobre el círculo de radio unidad, y pesos  $w_i$  asociados a los mismos, para cubaturas de Albrecht con grado de precisión 7, 11, 15 y 23. Cada par de coordenadas representa los puntos resultantes de considerar todas las posibles combinaciones de valores positivos y negativos de las mismas  $(\pm x_i, \pm y_i)$ .

### GRADO DE PRECISION: 7

$x_j$	$y_j$	$w_j$
.0000000	.9109958	.1656098
.9109958	.0000000	.1656098
.0000000	.4566708	.3870778
.4566708	.0000000	.3870778
.6123724	.6123724	.2327106

### GRADO DE PRECISION: 11

$x_j$	$y_j$	$w_j$
.0000000	.3266559	.2060229
.3266559	.0000000	.2060229
.0000000	.7209846	.1540637
.7209846	.0000000	.1540637
.0000000	.9797984	.0329592
.9797984	.0000000	.0329592
.4716296	.4716296	.1850349
.6786941	.6786941	.0444573
.8433828	.3493406	.0814301
.3493406	.8433828	.0814301



# ES 2 114 799 B1

## GRADO DE PRECISION: 15

	$x_i$	$y_i$	$w_i$
5	.0000000	.2528638	.1252902
	.2528638	.0000000	.1252902
10	.0000000	.5777289	.1095004
	.5777289	.0000000	.1095004
	.0000000	.8738369	.0662375
	.8738369	.0000000	.0662375
15	.0000000	.9897468	.0167126
	.9897468	.0000000	.0167126
	.3754168	.3754168	.1274284
	.5976143	.5976143	.0660009
20	.6892994	.6892994	.0261029
	.7074388	.2930307	.0815396
	.2930307	.7074388	.0815396
25	.8830971	.3657908	.0425231
	.3657908	.8830971	.0425231

## GRADO DE PRECISION 23

	$x_i$	$y_i$	$w_i$
35	.0000000	.1653024	.0542145
	.1653024	.0000000	.0542145
	.0000000	.3880374	.0536198
40	.3880374	.0000000	.0536198
	.0000000	.6253741	.0442574
	.6253741	.0000000	.0442574
45	.0000000	.7607197	.0285279
	.7607197	.0000000	.0285279

50

55

60

ES 2 114 799 B1

	.0000000	.9287052	.0216953
	.9287052	.0000000	.0216953
5	.0000000	.9985378	.0039735
	.9985378	.0000000	.0039735
	.2515734	.2515734	.0608778
10	.4254834	.4254834	.0427205
	.5284725	.5284725	.0341636
	.6549720	.6549720	.0219435
	.7049819	.7049819	.0043323
15	.4946735	.2049005	.0474630
	.2049005	.4946735	.0474630
	.6702738	.2776365	.0447135
	.2776365	.6702738	.0447135
20	.8511183	.3525448	.0223072
	.3525448	.8511183	.0223072
	.9182798	.3803640	.0051126
	.3803640	.9182798	.0051126
25	.8327824	.1656507	.0303868
	.7059988	.4717333	.0303868
	.4717333	.7059988	.0303868
	.1656507	.8327824	.0303868
30	.9537853	.1897197	.0135830
	.8085801	.5402760	.0135830
	.5402760	.8085801	.0135830
35	.1897197	.9537853	.0135830

TABLA II

45	<b>METODO:</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
	N	108	91	112
50	$\eta$	$1.058 \times 10^{-3}$	$3.410 \times 10^{-3}$	$1.414 \times 10^{-3}$
	Error relativo en $a_4$	$1.6 \times 10^{-7}$	$-1.3 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-2}$
	Error relativo en $a_{11}$	$9.3 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-1}$	$1.4 \times 10^{-1}$
55				
60				

**TABLA III**

Componentes  $v_x, v_y$  (en ciclos/mm) de la frecuencia espacial a codificar en la microlentes  $i$ , los centros de cuyas aberturas están situados en las coordenadas  $(x_i, y_i)$  (en metros) para que las correspondientes áreas focales estén centradas en los puntos  $(x_{di}, y_{di})$  (en metros) cuando sobre la matriz incide una onda esférica divergente de radio de curvatura  $Z = 50$  cm. Focal de las microlentes: 10 cm. Longitud de onda de la radiación = 633 nm.

$i$	$x_i$	$y_i$	$x_{di}$	$y_{di}$	$v_x$	$v_y$
1	-9.1099580000E-03	0.0000000000E+00	-3.7500000000E-03	0.0000000000E+00	1.1345891943E+02	0.0000000000E+00
2	-4.5667080000E-03	0.0000000000E+00	-1.2500000000E-03	0.0000000000E+00	6.6825428120E+01	0.0000000000E+00
3	4.5667080000E-03	0.0000000000E+00	1.2500000000E-03	0.0000000000E+00	-6.6825428120E+01	0.0000000000E+00
4	9.1099580000E-03	0.0000000000E+00	3.7500000000E-03	0.0000000000E+00	-1.1345891943E+02	0.0000000000E+00
5	-6.1237240000E-03	-6.2137240000E-03	-3.7500000000E-03	-1.2500000000E-03	5.6847848341E+01	9.8048480252E+01
6	0.0000000000E+00	-4.5667280000E-03	-1.2500000000E-03	-1.2500000000E-03	-1.9747235387E+01	6.6825807267E+01
7	0.0000000000E+00	-9.1099580000E-03	1.2500000000E-03	-1.2500000000E-03	1.9747235387E+01	1.5295339021E+02
8	6.1237240000E-03	-6.1237240000E-03	3.7500000000E-03	-1.2500000000E-03	-5.6847848341E+01	9.6342319115E+01
9	-6.1237240000E-03	6.1237240000E-03	-3.7500000000E-03	1.2500000000E-03	5.6847848341E+01	-9.6342319115E+01
10	0.0000000000E+00	4.5667080000E-03	-1.2500000000E-03	1.2500000000E-03	1.9747235387E+01	-6.6825428120E+01
11	0.0000000000E+00	9.1099580000E-03	1.2500000000E-03	1.2500000000E-03	1.9747235387E+01	-1.5295339021E+02
12	6.1237240000E-03	6.1237240000E-03	3.7500000000E-03	1.2500000000E-03	-5.6847848341E+01	-9.6342319115E+01

## REIVINDICACIONES

1. Sensor de frente de ondas con matriz de microlentes distribuídas espacialmente según los nodos de fórmulas de curvatura. Está constituido por un elemento sensor de radiación, un sistema de adquisición y procesado de datos y una matriz de microlentes convergentes, todas ellas con la misma distancia focal, distribuidas espacialmente sobre un substrato de forma que los centros de sus aberturas estén situados en las coordenadas de los puntos nodales propios de cualquier fórmula de cubatura, y sus regiones focales estén situadas sobre la superficie del sensor de radiación, para su aplicación en la estimación modal de fases de frentes de ondas a partir de medidas de sus gradientes locales (medidas realizadas determinando las desviaciones de los centros de las correspondientes regiones focales con respecto a unas determinadas posiciones de referencia), y el cálculo posterior de las integrales modales mediante sumas finitas de la forma

$$a_k = -c_k \int_{\sigma} (\nabla S) \cdot F_k d\sigma = -c_k \sum_i w_i (\nabla S(r_i)) \cdot F_k(r_i)$$

en donde  $a_k$  representa el valor del coeficiente modal que se desea calcular,  $c_k$  es la constante de normalización del modo de orden  $k$ ,  $\nabla S$  representa el valor del gradiente local del frente de ondas,  $F_k$  es una función vectorial asociada al modo de orden  $k$ ,  $\sigma$  es el dominio sobre el cual se define la expansión modal del frente,  $r_i$  son los puntos nodales de la cubatura utilizada en la evaluación de la integral y  $w_i$  sus pesos asociados.

2. Sensor de frente de ondas, según la reivindicación 1, **caracterizado** porque los centros de las aperturas de las microlentes están situados en los puntos nodales de una cubatura bidimensional directa, en particular una cubatura de Albrecht.

3. Sensor de frente de ondas, según la reivindicación 1, **caracterizado** porque los centros de las aperturas de las microlentes están situados en los puntos nodales de la cubatura que resulta de la aplicación sucesiva de dos cuadraturas unidimensionales, una sobre la coordenada radial y otra sobre la angular, en particular las conocidas como de Gauss-Legendre y regla trapezoidal compuesta, respectivamente.

4. Sensor de frente de ondas, según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado** por realizar la estimación de fases mediante el cálculo de los valores de los coeficientes modales asociados a la expansión del frente de onda desconocido como combinación lineal de polinomios de Zernike.

5. Sensor de frente de ondas, según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado** por la introducción en la función de transmisión de cada microlente de una fase lineal adicional que permita obtener en el plano del elemento sensible a la radiación una distribución espacial predeterminada de las zonas focales cuando sobre la matriz incida un frente de ondas determinado, fase lineal cuyas componentes  $v=(v_x, v_y)$  vienen dadas por la expresión:

$$v_i = (r_{di} - r_i)/(\lambda f) - \nabla \Phi(r_i)/(2\pi)$$

donde el subíndice  $i$  indica la microlente para la cual se calcula  $v$ ,  $r_i$  es la posición del centro de su apertura,  $r_{di}$  es la posición deseada del centro de su distribución focal cuando sobre la matriz incida un frente de ondas de fase  $\Phi(r)$ ,  $\lambda$  es la longitud de onda de la radiación utilizada y  $f$  es la distancia focal común a todas las microlentes.

6. Sensor de frente de ondas, según la reivindicación 5, **caracterizado** porque la fase lineal que se introduce en cada microlente es la adecuada para que los centros de las regiones focales formen sobre el sensor de radiación una distribución de puntos igualmente espaciados a lo largo de ambos ejes cartesianos, para una distribución dada de los centros de las aberturas de las microlentes en el plano de la matriz y para una onda incidente de características prefijadas.

7. Sensor de frente de ondas, según cualquiera de las reivindicaciones 5 y 6, **caracterizado** porque la fase lineal que se introduce en cada microlente es la apropiada para acoplar directamente la matriz de microlentes al elemento sensor de radiación, realizando el oportuno cambio de escala de la distribución de regiones focales, sin necesidad de utilizar elementos ópticos intermedios.

8. Sensor de frente de ondas, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** por estimar los coeficientes modales de un frente de onda con relación a los de otro que se toma como referencia, mediante la medida de las diferencias entre las posiciones de los centros de las regiones focales producidas por cada microlente cuando sobre el sensor inciden uno y otro frente por separado.

## ES 2 114 799 B1

9. Sensor de frente de ondas, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la matriz de microlentes convergentes es substituida por la combinación de una lente convergente convencional y una pantalla opaca en la que se practican un conjunto de aberturas, en las que se introduce o no una fase lineal como la descrita en la reivindicación 5, y cuyos centros están situados en las posiciones de los centros de las aberturas de las microlentes a las que substituyen.

10. Sensor de frente de ondas, según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que la matriz de microlentes convergentes es substituida por la combinación de una matriz de microlentes divergentes, todas ellas con la misma distancia focal y con los centros de sus aberturas situados en las posiciones descritas, y una lente convergente convencional.

11. Sensor de frente de ondas, según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que la matriz de microlentes convergentes es substituida por una matriz de microespejos cóncavos, planos o convexos, con los centros de sus aberturas situados en las posiciones descritas, en combinación o no con una lente convergente convencional.

20

25

30

35

40

45

50

55

60

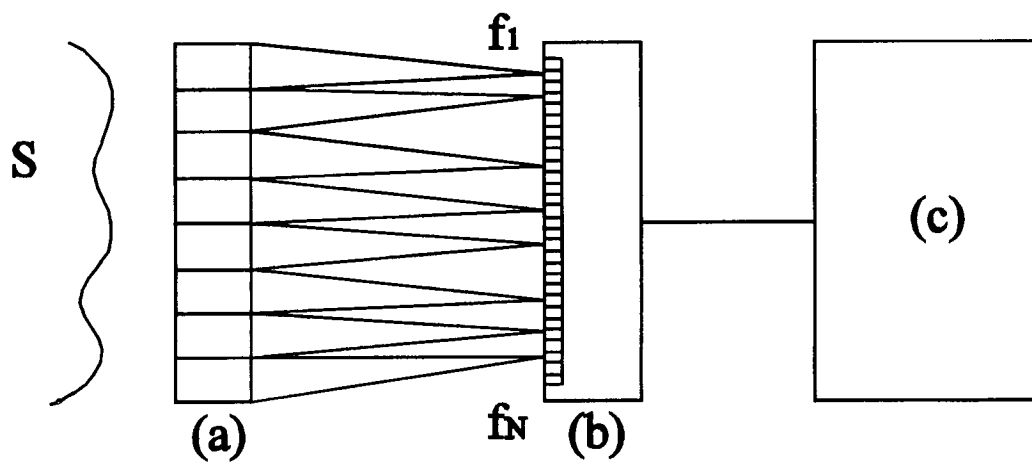


Figura 1

### Grado 7

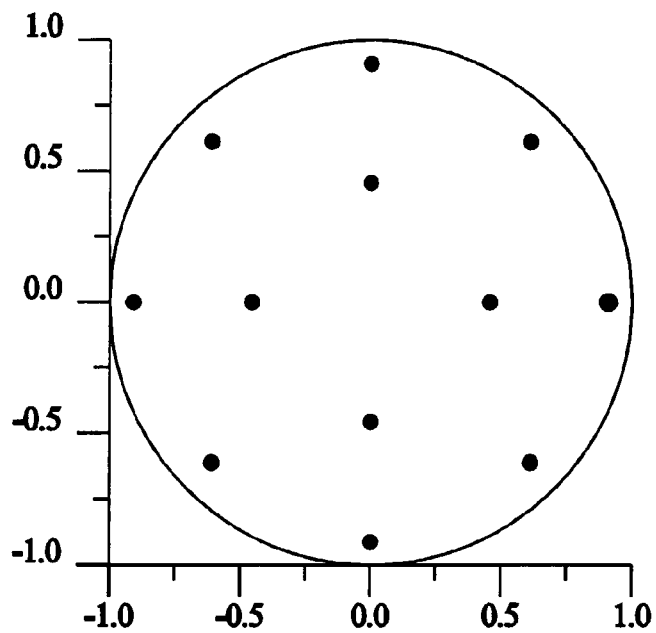


Figura 2a

### Grado 11

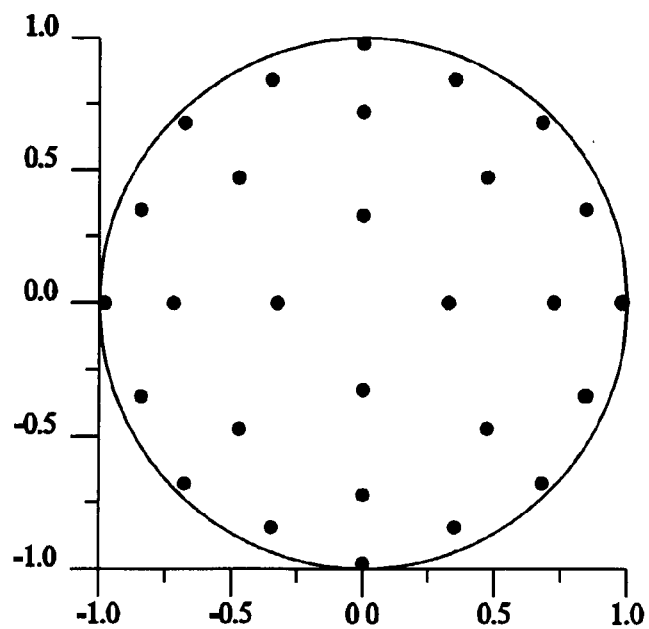
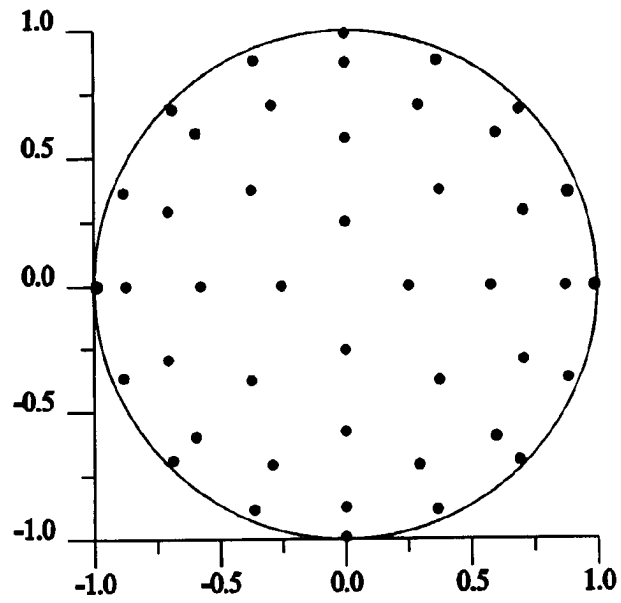


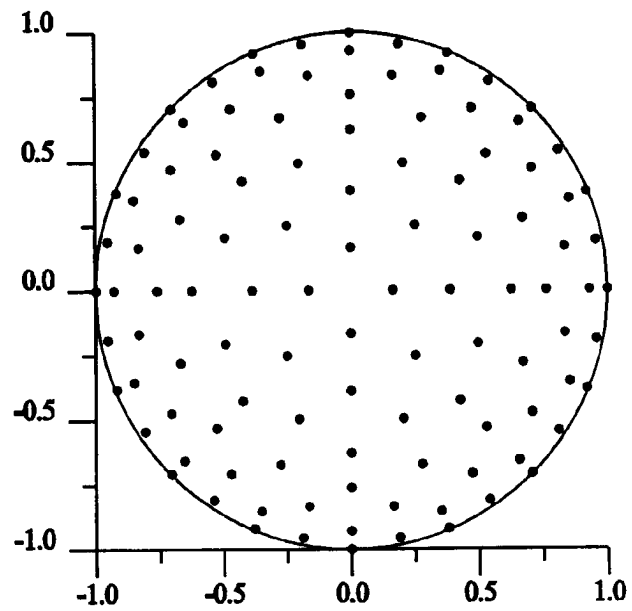
Figura 2b

**Grado 11**



**Figura 2c**

**Grado 23**



**Figura 2d**



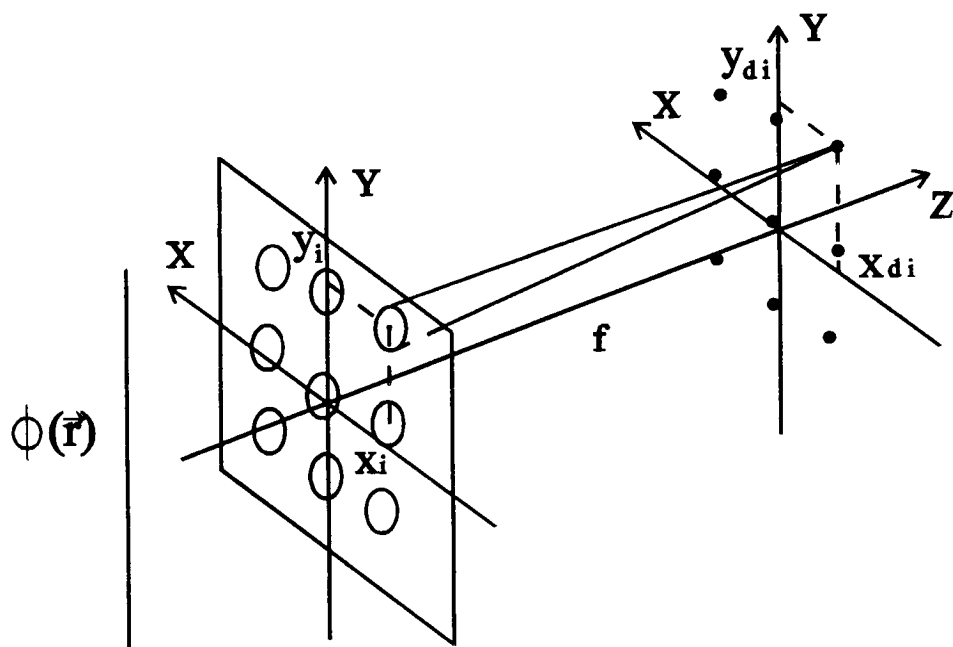


Figura 3

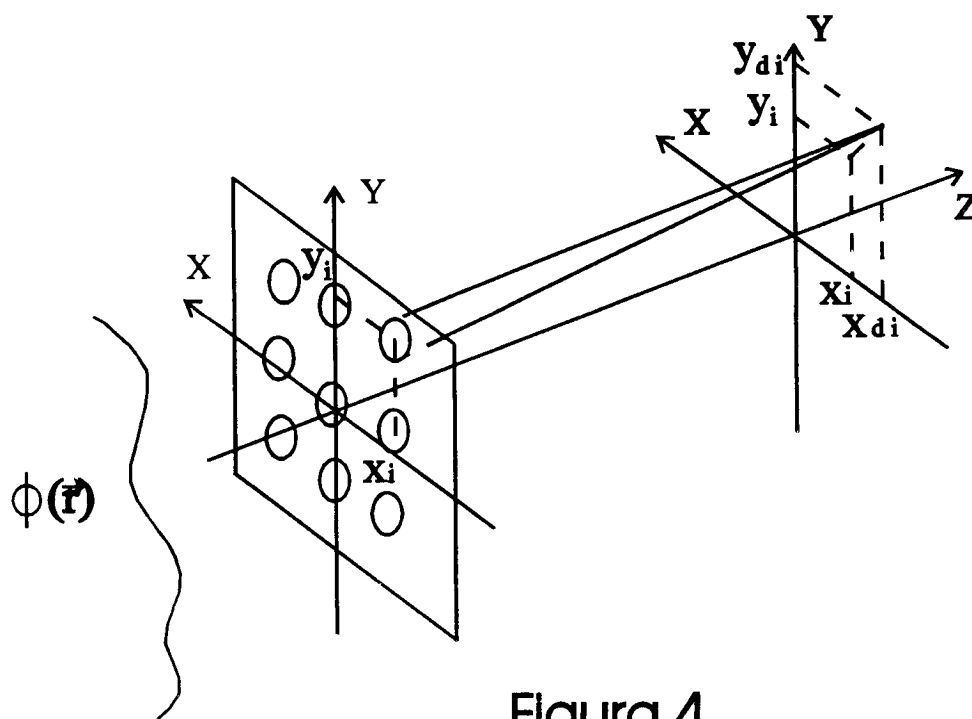


Figura 4

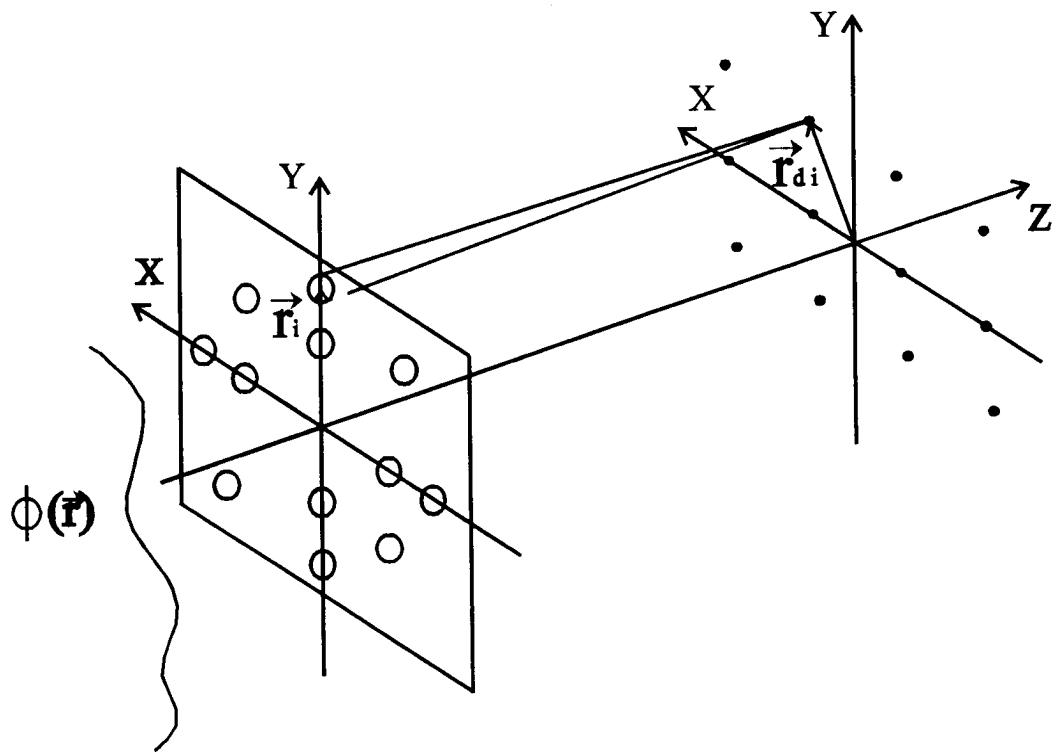


Figura 5

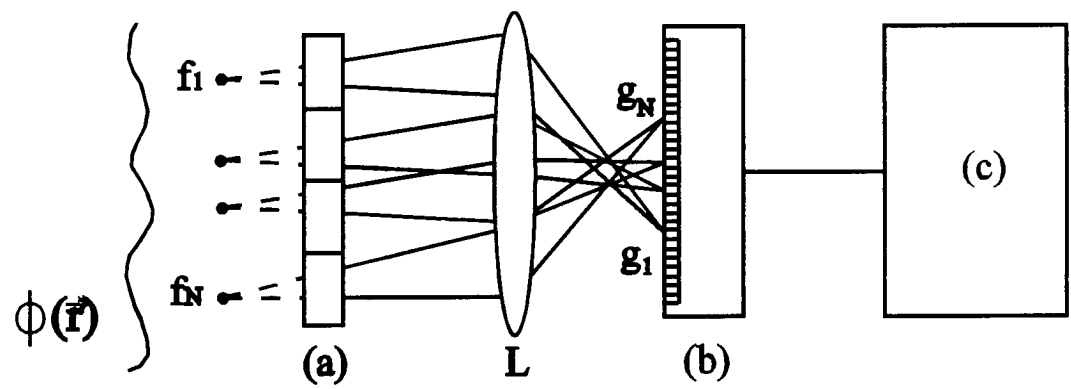


Figura 6

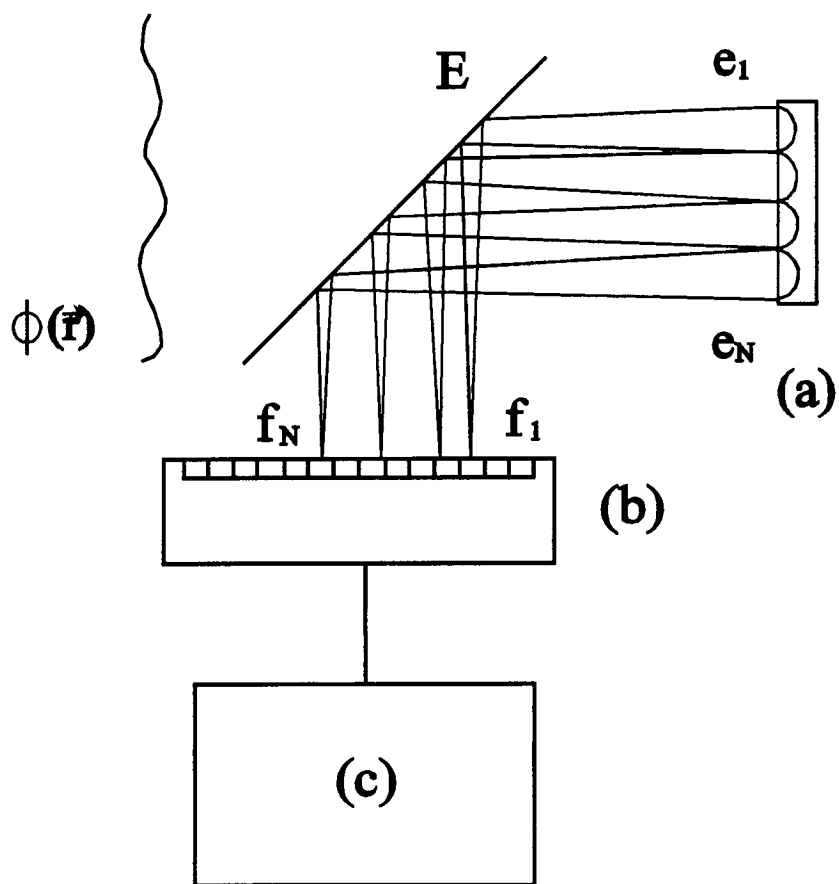
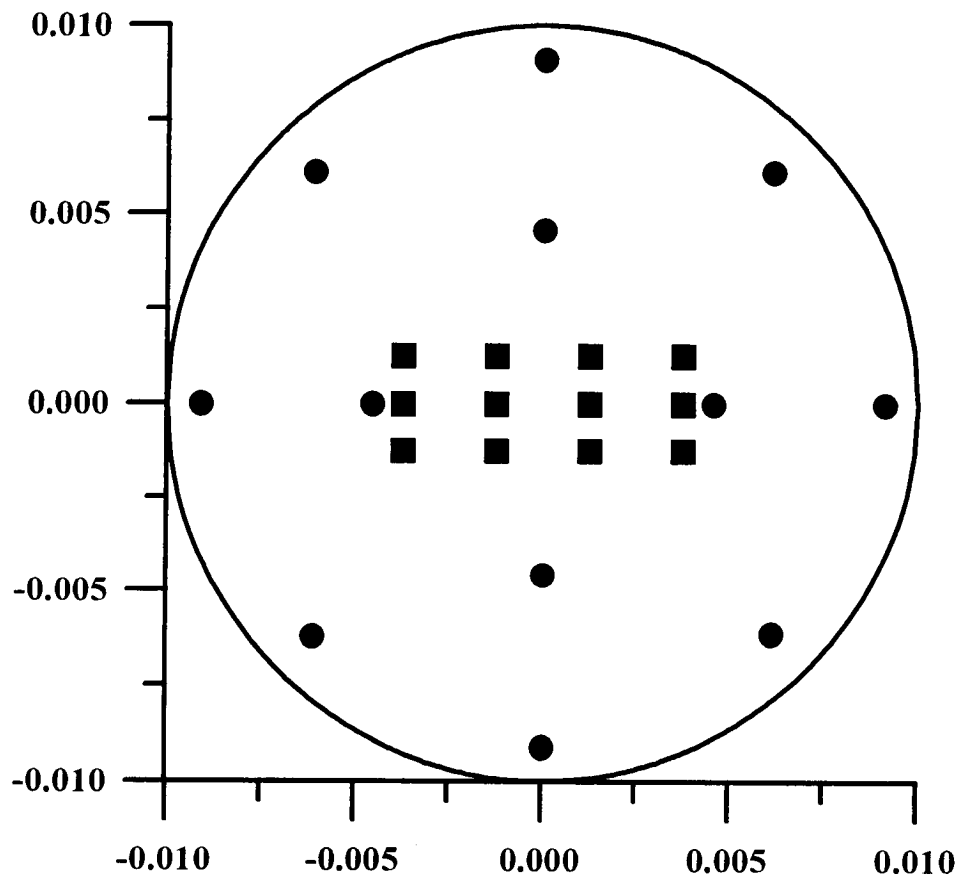
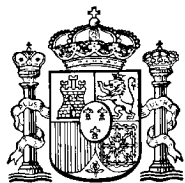


Figura 7



**Figura 8**



## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤ Int. Cl.<sup>6</sup>: G01J 9/00

### DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	FR-2665955-A (OFFICE NATIONAL D'ETUDE ET DE RECHERCHES AEROSPATIALES) 21.02.92 * Todo el documento *	
A	US-5235405-A (H.G. SILLITTO; J.C. PARKER) 10.08.93 * Todo el documento *	

#### Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

#### El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones n.º:

Fecha de realización del informe

30.01.98

Examinador

O. González Peñalba

Página

1/1